Анализ распространения колебательных процессов в канале с перфорированной преградой / М.А. Серегина, В.Я. Модорский, И.Е. Черепанов, А.В. Бабушкина. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.08 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 6. – С. 83–94.

Perm Polytech Style: Analysis of the propagation of oscillatory processes in a channel with a perforated barrier. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 6, pp. 83–94. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.08

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.08
УДК 534.2

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАНАЛЕ С ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПРЕГРАДОЙ

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 20 августа 2025 г.
Одобрена: 10 ноября 2025 г.
Принята к публикации:
10 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

акустика, транспортировка водорода, энергоноситель, шум, вибрации, система инженерного анализа, 2FSI, газоход, колебательные процессы, распространение волны, численное моделирование, взаимодействие газа с преградой, звукопоглощение, резонанс

АННОТАЦИЯ

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью создания конструкций с низким уровнем шума. Понимание колебательных процессов в каналах может привести к повышению качества проектируемых систем, что, в свою очередь, повысит их конкурентоспособность. Каналы с перфорированными перегородками являются элементом большого числа инженерных систем. Использование таких конструкций, заполненных газами, например, водородом, представляет интерес с точки зрения транспортировки новых источников энергии и исследования поведения газа при его взаимодействии с деформируемой преградой. Цель исследовательской работы заключается в анализе колебательных процессов при взаимодействии газа и конструкции с перфорированной преградой. Исследования, приведенные в данной работе, осуществляются с использованием системы инженерного анализа ANSYS, позволяющей моделировать рассматриваемые процессы в 2FSI постановке. Рассчитаны зависимости давления и перемещений во времени в различных точках модельной установки, заполненной водородом при наличии препятствий, в том числе с перфорацией. В данной статье рассмотрено взаимовлияние газодинамического потока и канала с одной, двумя или тремя деформируемыми перегородками на характеристики колебаний газа и конструкции. Рассмотрены три случая: ближайшая к источнику колебаний перегородка не имеет отверстия, отверстие в перегородке имеет диаметр 20 мм и диаметр отверстия в перегородке составляет 14 мм. Вторая и третья перегородка (при наличии) – без отверстия. Анализ колебательных процессов в модельном канале с перфорированными (или глухими) перегородками, заполненном водородом, показал значительное влияние перфорации перегородок на динамику системы для разных условий сочетания перегородок. Результаты и выводы, полученные в ходе данного анализа, могут лежать в основе дальнейших экспериментов и разработок в области газодинамики и аэроупругости, а также при проектировании малошумных и виброустойчивых элементов для водородной энергетики и акустических систем.

© **Серегина Маргарита Андреевна** – аспирант кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем, инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: maseregina@pstu.ru
Модорский Владимир Яковлевич – доктор технических наук, доцент, декан аэрокосмического факультета, директор Центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: modorsky@pstu.ru
Черепанов Иван Евгеньевич – инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: cherepanovie@sbiw.ru
Бабушкина Анна Викторовна – кандидат технических наук, доцент 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 Y. Modorskii – Doctor of Technical Sciences, Ass. Professor, Dean of Aerospace Faculty, Head of the Center for High-Performance Computing Systems, 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)

ANALYSIS OF THE PROPAGATION OF OSCILLATORY PROCESSES IN A CHANNEL WITH A PERFORATED BARRIER

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 August 2025
Approved: 10 November 2025
Accepted for publication:
10 December 2025

Keywords:

acoustics, hydrogen transportation, energy carrier, noise, vibrations, engineering analysis system, 2FSI, gas channel, oscillatory processes, wave propagation, numerical modeling, interaction of gas with barrier, sound absorption, resonance.

ABSTRACT

The relevance of the research topic is due to the need to create structures with low noise levels. Understanding the oscillatory processes in channels can lead to improved quality of designed systems, which in turn will increase their competitiveness. Channels with perforated partitions are an element of a large number of engineering systems. The use of such structures filled with gases, such as hydrogen, is of interest in terms of transporting new energy sources and studying the behavior of gas when it interacts with a deformable barrier. The purpose of this research is to analyze the oscillatory processes that occur when gas interacts with a perforated structure.The research presented in this article is conducted using the ANSYS engineering analysis system, which allows for the modeling of these processes in 2FSI.The dependencies of pressure and displacement on time at various points of a model installation filled with hydrogen in the presence of obstacles, including those with perforations, are calculated. This article discusses the interaction of a gas-dynamic flow and a channel with one, two, or three deformable partitions on the characteristics of gas and structural vibrations. Three cases are considered: the partition closest to the source of vibrations does not have a hole, the hole in the partition has a diameter of 20 mm, and the hole in the partition has a diameter of 14 mm. The second and third partitions do not have a hole. An analysis of oscillatory processes in a model channel with perforated (or solid) partitions filled with hydrogen showed a significant effect of perforation on the system dynamics for different conditions of partition combination. The results and conclusions obtained during this analysis can serve as a basis for further experiments and developments in the fields of gas dynamics and aeroelasticity, as well as for the design of low-noise and vibration-resistant elements for hydrogen energy and acoustic systems.

Введение

Современные инженерные системы требуют не только высокой эффективности, но и низкого уровня шума и вибраций [1; 2]. Особую актуальность приобретает анализ взаимодействия газового потока с элементами конструкций, особенно в системах транспортировки газа, вентиляции и энергетических установках. Каналы с перфорированными перегородками широко используются благодаря своим шумопоглощающим свойствам [3–22]. Перфорация позволяет управлять аэродинамическими характеристиками и резонансными явлениями, однако усложняет динамику системы «газ – конструкция» (технология *FSI – Fluid Structure Interaction*) [23–26].

Особый интерес представляет случай, когда рабочим телом является водород – перспективный энергоноситель с высокой подвижностью и низкой плотностью [1–7]. Его динамическое поведение в каналах с деформируемыми стенками слабо изучено. Недостаточно исследовано влияние перфорации на колебательные процессы [7–8]. Кроме того, вопросы безопасности транспортировки требуют комплексного подхода [27–35].

Целью работы является исследование взаимовлияния газодинамического потока и канала с одной, двумя или тремя деформируемыми перегородками на характеристики колебаний газа и конструкции. Рассмотрены три случая: ближайшая к источнику колебаний перегородка не имеет отверстия, отверстие в перегородке имеет диаметр 20 мм и диаметр отверстия в перегородке составляет 14 мм. Вторая и третья перегородки (при наличии) – без отверстия. Основное внимание уделено выявлению временных зависимостей давления и перемещений в контрольных точках системы.

Моделирование выполняется в системе инженерного анализа *ANSYS* с использованием 2*FSI*-постановки, что обеспечивает точное описание обратной связи между деформацией стенки и потоком [27]. Полученные данные позволяют оценить влияние перфорации на динамику системы и могут быть использованы при проектировании малошумных и виброустойчивых элементов для водородной энергетики и акустических систем [33].

Постановка задачи исследования

Необходимо провести анализ колебательных процессов в газе и конструкции при их взаимодействии, выявить зависимости давления и перемещений во времени в различных точках модельной установки при заполнении канала транспортируемой средой. Газоход имеет канал прямоугольного сечения, с двумя или тремя перегородками, одна из которых имеет перфорацию. На рис. 1 представлена схема моделируемой части транспортной системы [5].

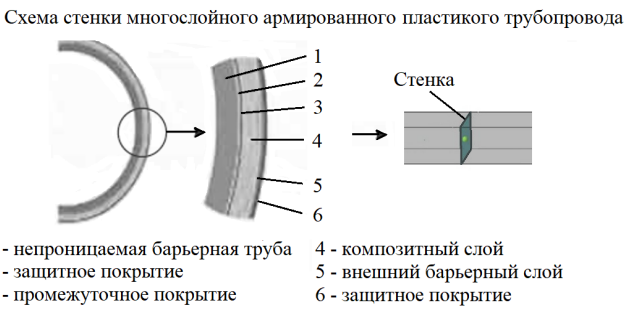


Рис. 1. Схема моделируемой части транспортной системы
Fig. 1. Scheme of the modeled part of the transport system

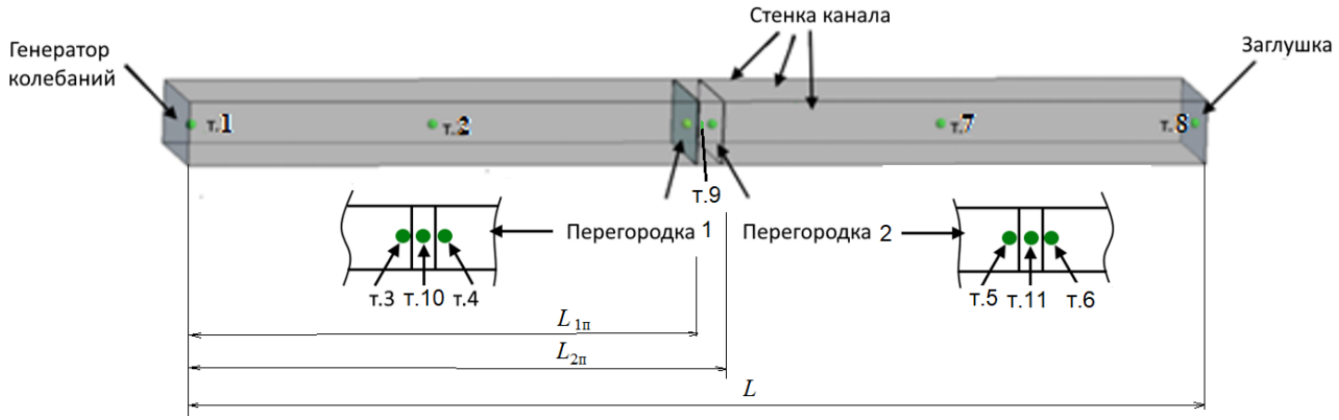


Рис. 2. Схема модельного канала с расположением областей и точек для задания граничных условий

Fig. 2. Scheme of the channel with the location of areas and points for setting boundary conditions

Схема модельного канала с расположением контрольных расчетных точек представлена на рис. 2. Сечение канала имеет размеры 50 × 100 мм. Две перегородки, толщиной 1 мм, делят канал на три части: первая моделирует область генерации колебаний, вторая – моделирует область между перегородками, третья полость позволяет оценить колебательные процессы снаружи трубопровода.

Для оценки влияния материала перегородки на процессы распространения и гашения колебательных процессов 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.

В качестве рабочего тела выбран идеальный газ постоянного состава с заданными свойствами, соответствующими воздуху или водороду. Материал элемента перегородки имеет упругие свойства.

Математическая модель связанной 2*FSI* постановки для обозначенной рабочей области базируется на методе расщепления по физическим областям: газодинамической и механической [9; 25].

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 (перегородки 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 недеформирована.

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.

В прямоугольном канале модельной конструкции моделируется следующий процесс: волна, задаваемая на открытом торце, распространяется по каналу, достигает тонкой перегородки, сталкивается с ней, отражается, частично поглощается, деформирует преграду, которая в свою очередь, воздействует на рабочее тело, расположенное за ней, и возбуждает в рабочем теле волну давления.

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 [9] (англ. *Shear-StressTransform*) и позволяет описывать распространение акустической волны по потоку. Для механической области математическая модель описывается дифференциальными уравнениями в перемещениях в приближении линейной изотропной теории упругости [15–19]. В соответствии с принятой концептуальной моделью разработана математическая модель, которая базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкается уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями. Полная система уравнений математической модели исследуемых процессов представлена в работе [9].

Уравнение неразрывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \mathbf{V}) = 0, \qquad (1)$$

где ρ – плотность газа; t– время; $\mathbf{V}$ – вектор скорости газа; ∇ – оператор градиента; $\nabla \bullet (\rho \mathbf{V})$ – дивергенция плотности потока.

Уравнение количества движения (сохранения импульса)

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V})\mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \bullet \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M, \qquad (2)$$

где $\nabla \bullet (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V})$ – дивергенция тензора конвективного переноса импульса; $\otimes$ – тензорное произведение векторов; p – давление; $\mathbf{S}_M$ – источниковый член для импульса; $\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязких напряжений, записываемый в виде

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \bullet \mathbf{V} \right],$$

где μ – коэффициент динамической вязкости; δ – символ Кронеккера

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Уравнение состояния

$$\rho = \rho(T, p). \qquad (3)$$

Система уравнений Навье – Стокса (1)–(3) и модель турбулентности образуют замкнутую математическую модель газовой динамики [9].

Для решения задачи напряженно-деформированного состояния требуется использовать систему уравнений (4)–(11) [9].

Движение перегородки описывается дифференциальными уравнениями в перемещениях $\mathbf{U}$ в рамках линейной теории упругости (ЛТУ). Это обосновывается тем, что материал перегородки принимается сплошной и однородной средой (стеклопластик), а в силу малости перемещений является линейным.

Ограничиваясь ЛТУ для описания движения перегородки, принимается малость возможных деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$, которые определяются через градиенты перемещений:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{U} + \mathbf{U} \nabla), \qquad (4)$$

где $\mathbf{U}$ – поле перемещений, представимое в виде функций изменения эйлеровых (пространственных) координат x_i :

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}(x_1, x_2, x_3, t). \qquad (5)$$

В процессе упругой деформации на поверхности твердого тела перегородки действуют силы, которые приводят к возникновению напряжений. В качестве соотношения, связывающего возникающие напряжения $\boldsymbol{\sigma}$ и деформации $\boldsymbol{\varepsilon}$ выступает изотропный закон Гука в конечной форме:

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \mathbf{I}_1(\boldsymbol{\varepsilon})\mathbf{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}, \qquad (6)$$

где λ и μ – параметры Ламе, $\mathbf{I}_1(...)$ – первый инвариант тензора деформаций (сумма диагональных элементов тензора деформаций); $\mathbf{I}$ – единичный тензор.

Параметры Ламе определяются следующими соотношениями:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \qquad (8)$$

где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

Поскольку соотношение (6) реализуется в рамках ЛТУ, то параметры Ламе являются неизменными величинами.

Дифференциальные уравнения движения сплошной среды, которыми описывается поведение перегородки, следуют из уравнений статического равновесия при учете объемных сил инерции:

$$\nabla \bullet \boldsymbol{\sigma} + \rho_k f_{\text{м}} + f_{\text{вн}} = \rho_k \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2}, \qquad (9)$$

где ρ_k – плотность материала перегородки; $f_{\text{м}}$ – плотность массовых (внутренних) сил; $f_{\text{вн}}$ – плотность внешних сил.

При этом плотность материала перегородки является неизменной величиной, поскольку материал перегородки предполагается однородным, т.е. его физико-механические свойства во всех точках тела одинаковы. Плотность массовых сил в общем случае является функцией пространственных координат и формулируется из физических соображений о происходящих процессах внутри тела:

$$f_{\text{м}} = f_{\text{м}}(x_1, x_2, x_3, t). \qquad (10)$$

Однако в рамках настоящих исследований не подразумевается наличие внутренних массовых источников, т.е. $f_{\text{м}} = 0$ Внешние силы определяются из граничных условий, обусловленных внешним взаимодействием.

Таким образом, подставляя в соотношение (9) выражения (4), (6)–(8), получим дифференциальные уравнения движения перегородки в перемещениях:

$$(\lambda + \mu)\nabla \nabla \bullet \mathbf{U} + \mu \Delta \mathbf{U} + f_{\text{вн}} = \rho_k \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2}, \qquad (11)$$

где Δ – оператор Лапласа.

Математическая модель замыкается граничными условиями (ГУ) на входе, на перегородке и на стенках трехмерной области 2*FSI*-системы, а также на контактных поверхностях взаимодействия областей «газ – конструкция» и «конструкция – газ».

Начальные условия для конструкции:

$$\mathbf{U}\,|_{t=0} = \mathbf{0}\,,\ \boldsymbol{\varepsilon}\,|_{t=0} = \mathbf{0}\,,\ \boldsymbol{\sigma}\,|_{t=0} = \mathbf{0}\,. \qquad (12)$$

Начальные условия для газа:

$$P\,|_{t=0} = 1{,}013\cdot 10^5 \text{ Па},\ \mathbf{V}\,|_{t=0} = \mathbf{0} \text{ м/с},\quad \rho\,|_{t=0} = 1{,}29 \text{ кг/м}^3,\ k = 1{,}4\,. \qquad (13)$$

Задавались следующие граничные условия. На внешние кромки перегородок наложено граничное условие жесткого защемления (рис. 3):

$$\mathbf{U}\big|_E = \mathbf{0},\ \left.\frac{d\mathbf{U}}{dx}\right|_E = 0. \qquad (14)$$

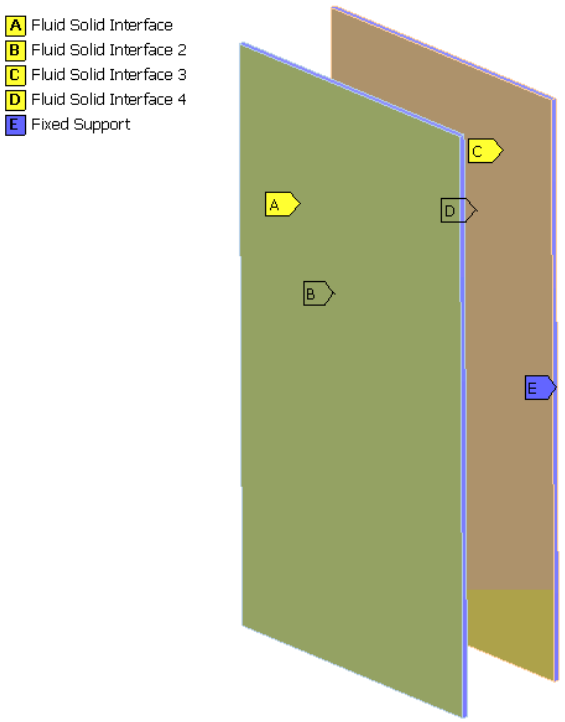


Рис. 3. Поверхности для граничных условий перегородок
Fig. 3. Surfaces for boundary conditions of partitions

Правый торец канала закрыт заглушкой, которая также является жесткой стенкой (см. рис. 2). На поверхности пластин передавалось давление газа, полученное в газодинамическом расчете:

$$\sigma_n\big|_A = -P,\ \sigma_n\big|_B = -P,\quad \sigma_n\big|_C = -P,\ \sigma_n\big|_D = -P. \qquad (15)$$

В модельном канале на левой границе (см. рис. 2) задается граничное условие «Генератор колебаний». Колебания задаются по синусоидальному закону:

$$V_x = 0{,}01 sin\left(2\pi 50 t\right). \qquad (16)$$

Частота колебаний 50 Гц. На границе «деформируемая преграда – газ» задаются граничные условия совместности по перемещениям и скоростям перемещений [25–26].

Равенство скоростей газа и конструкции на перегородке 1 и перегородке 2:

$$\mathbf{V}^k\,|_{x=L_{1\text{п}}} = \mathbf{V}^r\,|_{x=L_{1\text{п}}},\ \mathbf{V}^k\,|_{x=L_{1\text{п}+\delta}} = \mathbf{V}^r\,|_{x=L_{1\text{п}+\delta}},$$

$$\mathbf{V}^k\,|_{x=L_{2\text{п}}} = \mathbf{V}^r\,|_{x=L_{2\text{п}}},\ \mathbf{V}^k\,|_{x=L_{2\text{п}+\delta}} = \mathbf{V}^r\,|_{x=L_{2\text{п}+\delta}}.$$

Внешние стенки газодинамического канала приняты неподвижными и недеформируемыми, поэтому граничное условие записывается в виде равенства нулю компонент вектора скорости:

$$\mathbf{V}\big|_W = \mathbf{0}. \qquad (17)$$

На первом этапе исследований разработана методика проведения расчетов в связанной 2*FSI* постановке, позволяющая учитывать взаимовлияние газа и колебания перегородки и обратное их взаимодействие.

Опишем подготовительную процедуру вычислительных экспериментов. Для создания расчетной области использовался геометрический и сеточный препроцессор *ANSYS*. На рис. 4, *a*, *b* представлены сеточные модели моделируемой области. Для проведения оценки сеточной сходимости были построены сеточные модели с разным количеством элементов. Сравнение результатов проводилось по изменению максимального значения избыточного давления в контрольной точке 4 (рис. 4, *c*). Максимально необходимое количество элементов составило 250 000; при дальнейшем увеличении количества элементов в сеточной модели отклонение значения избыточного давления не превысило 1,6 %.

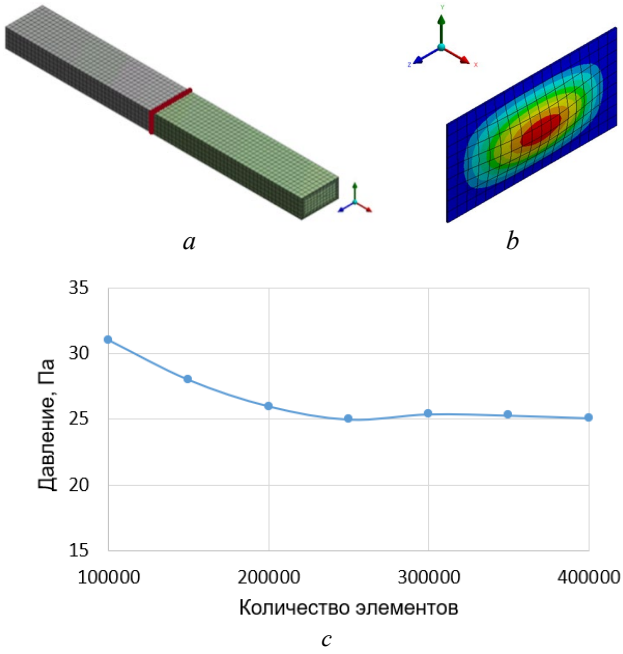


Рис. 4. Сеточная модель
расчетной газовой области (*a*) и расчетной области
для перегородки (*b*); оценка сеточной сходимости (*c*)

Fig. 4. Grid model of the computational
gas domain (*a*) and the computational domain for the partition (*b*);
evaluation of grid convergence (*c*)

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. 5.

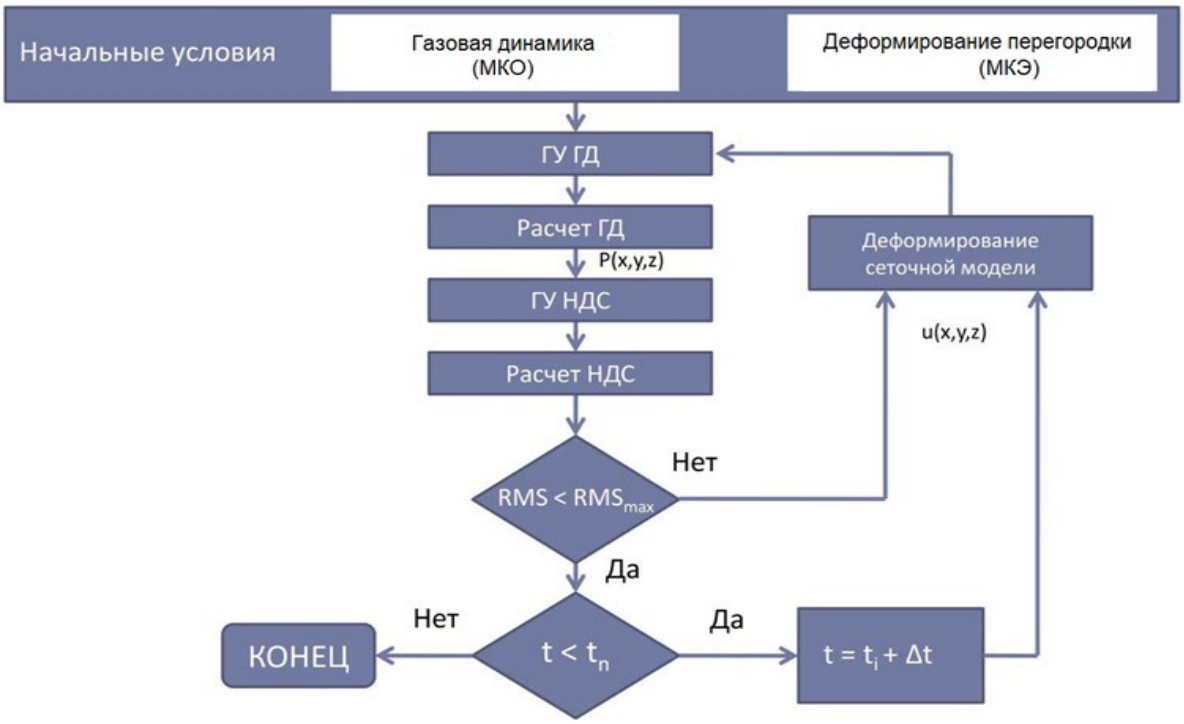


Рис. 5. Алгоритм расчета
Fig. 5. Calculation algorithm

На первом этапе выполняется инициализация расчетных областей. Для газодинамической области задается начальное распределение параметров газа (давления и температуры), определяемое аналитической зависимостью или результатами стационарного расчета. Для конструкции задаются нулевые начальные перемещения и скорости 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 напряженно-деформированного состояния (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 проведения сравнительного анализа были использованы результаты, полученные ранее, для рабочей среды «воздух» [10]. В работе [9] отражено, что введение второй перегородки меняет характер колебаний.

В настоящей работе представлены исследования колебательных процессов в трех конструкциях модельного канала.

Первая конструкция: первая перегородка деформируемая, без отверстия.

Вторая конструкция: первая перегородка с отверстием площадью S (d = 14,14 мм).

Третья конструкция: первая перегородка с отверстием площадью S (d = 20 мм).

Вторая перегородка во всех трех конструкциях также деформируемая, но не имеет перфорации.

Рабочее тело – водород, перегородка изготовлена из стеклопластика.

На рис. 6 показаны численные зависимости перемещений на первой пластине во времени в точке 10, которая располагается, в случае пластины без перфорации, в центре, а в случае с перфорацией на кромке отверстия. На рис. 6 видно, что амплитуда перемещений на пластине без отверстия на порядок больше, чем амплитуда перемещения у пластины с отверстием, за исключением переходного процесса.

Частота пластины на переходном процессе без отверстия на порядок меньше, чем с отверстием.

На рис. 6 введены следующие обозначения:

U_x пластины 1 без отверстия – перемещение для первой пластины без отверстия для схемы с двумя перегородками, вторая перегородка без отверстия;

U_x пластины 1 с отверстием 14 – перемещение для первой пластины с отверстием диаметром 14,14 мм, для схемы с двумя перегородками, вторая перегородка без отверстия;

U_x пластины 1 из трех – перемещение для первой пластины без отверстия, для схемы с тремя перегородками, вторая и третья перегородка без отверстия;

U_x пластины 1 с отверстием 20 – перемещение для первой пластины с отверстием диаметром 20 мм, для схемы с двумя перегородками, вторая перегородка без отверстия,

Собственная частота у сплошной пластины больше, чем у пластины с отверстием, что подтверждается аналитическими расчетами, при увеличении диаметра отверстия собственная частота понижается, а амплитуда увеличивается при переходном режиме и почти выравнивается после установления колебаний [15].

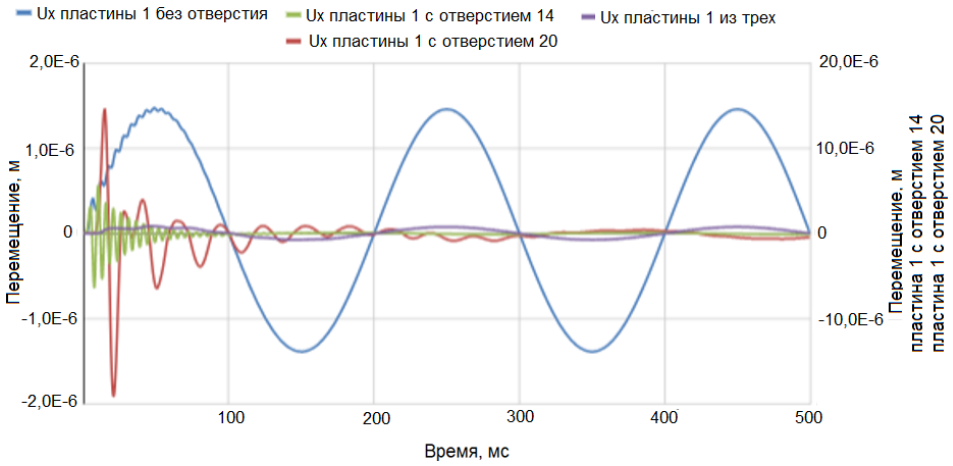


Рис. 6. Зависимость U_1 (т.10) с отверстием и без от времени (до 50 мс); рабочая среда водород

Fig. 6. Dependence of U_1 (p.10) on time (up to 50ms); working environment hydrogen

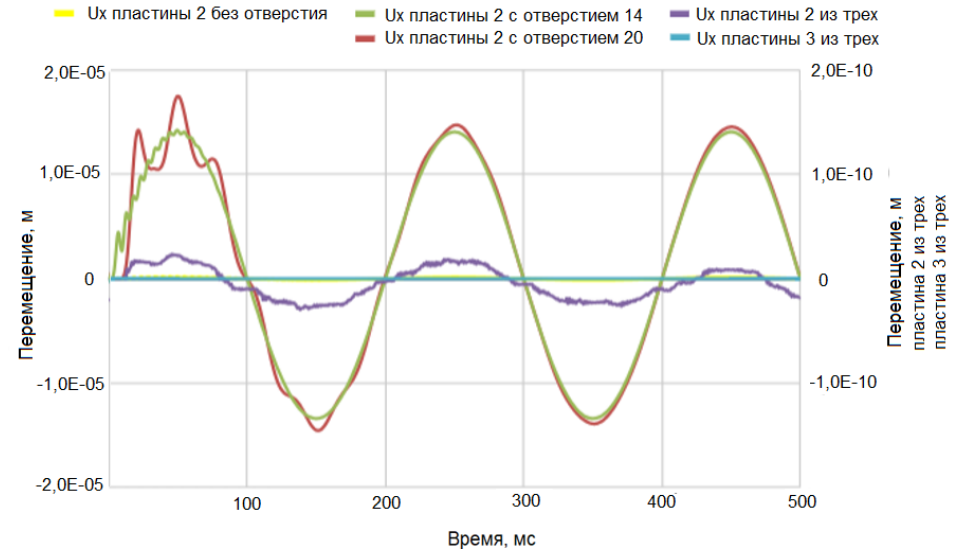


Рис. 7. Зависимость U_2 в пластине без отверстия (т.11) от времени (до 50 мс); рабочая среда водород

Fig. 7. Dependence of U_2 (p.11) on time (up to 50 ms); working environment hydrogen

На рис. 6 видно, что наличие отверстия приводит к появлению высокочастотной составляющей на графике перемещений первой пластины. Причем, переход от пластины с отверстием 14,14 мм к пластине с отверстием 20 мм повышает частоту колебаний в 1,75 раза.

Это подтверждено экспериментально и численно в ряде исследований, включая классическую работу [16–20].

В аналитических расчетах по влиянию отверстия на собственную частоту пластинки применяется поправочный коэффициент, основанный на результатах исследований А.С. Вольмира [17], в котором показано, что наличие концентраторов напряжений приводит к снижению жёсткостных характеристик и, как следствие, к уменьшению собственных частот. Для отверстий, диаметр которых составляет 20–30 % от характерного размера пластины, снижение первой частоты оценивается в пределах 15–20 %.

На рис. 7 приводятся результаты численных расчетов и показаны перемещения второй пластины для нескольких случаев: когда первая перегородка не перфорирована, когда первая перегородка имеет отверстие 20 мм или 14,14 мм, и когда в канале расположены три неперфорированные пластины. Перемещение второй пластины, если первая перегородка не перфорированная составляет $1{,}5 \cdot 10^{-7}$ м. При наличии перфорации на первой пластине амплитуда колебаний на второй пластине становится на два порядка больше.

На этом же рисунке показана зависимость перемещения от времени для второй пластины, в случае размещения трех неперфорированных пластин, амплитуда колебаний на третьей пластине стремиться к нулю.

Наличие дополнительных глухих перегородок снижает амплитуду колебаний наружной, по отношению к источнику звука, перегородки. Вместе с тем введение третьей перегородки снижает амплитуду колебаний первой и второй перегородок, за счет взаимовлияния перегородок.

Наличие отверстия 20 мм в первой перегородке приводит к тому, что вторая перегородка перемещается на $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ м, а первая на $5 \cdot 10^{-6}$ м. В случае отсутствия перфорации первая перегородка перемещается на $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ м, а вторая перегородка на $1{,}5 \cdot 10^{-7}$ м. Это может означать, что при определенных условиях перфорация может привести к увеличению амплитуды колебаний давления в первой перегородке при ее перфорировании. Во второй перегородке,

расположенной за перфорированной перегородкой, так же увеличиваются амплитуды колебаний.

На рис. 7 введены следующие обозначения:

U_x пластины 2 без отверстия – перемещение для второй пластины без отверстия для схемы с двумя перегородками, первая перегородка без отверстия;

U_x пластины 2 с отверстием 14 – перемещение для второй пластины без отверстия, для схемы с двумя перегородками, первая пластина с отверстием диаметром 14,14 мм;

U_xпластины 2 из трех – перемещение для второй пластины без отверстия, для схемы с тремя перегородками, первая и третья перегородка без отверстия;

U_x пластины 3 из трех – перемещение для третий пластины без отверстия, для схемы с тремя перегородками, первая и вторая перегородка без отверстия;

U_x пластины 2 с отверстием 20 – перемещение для второй пластины без отверстия, для схемы с двумя перегородками, первая перегородка с отверстием диаметром 20 мм.

Рассмотрим характер изменения величины давления при введении нескольких перегородок (рис. 8). По полученным результатам можно отметить, что при наличии двух перегородок и более снижается давление за второй перегородкой до нулевого значения. При наличии первой перегородки, даже с перфорацией наблюдается снижение давления за второй перегородкой. На рис. 8 видно, что давление за единственной перегородкой в 9 раз больше, чем если перед ней установлена перфорированная перегородка с отверстием 14,14 или 20 мм.

На рис. 9 приведены численные расчеты для канала, заполненного воздухом, с двумя перегородками, полученные в работе [11]. Сравнение рис. 8 и 9 показывает, что давление за перегородками на воздухе 0,10 Па, а для водорода ничтожно мало и можно предположить, то транспортировка водорода сопряжена с меньшими амплитудами колебания давления на внешней стороне модельной установки.

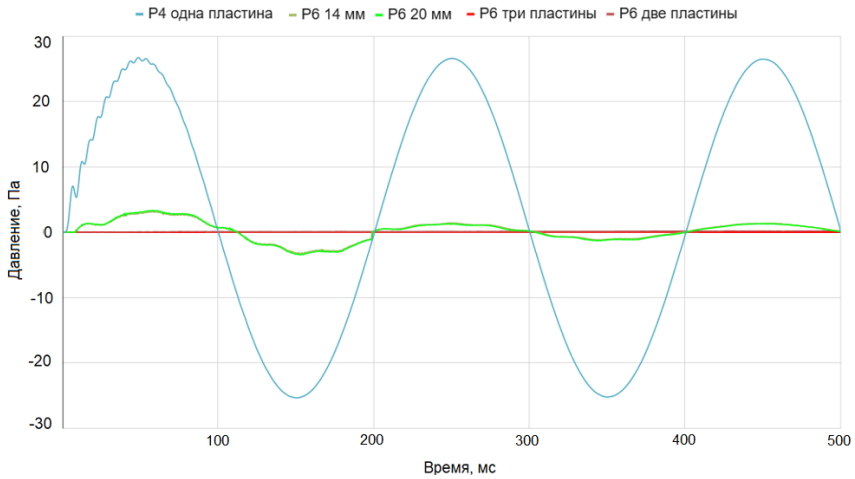


Рис. 8. Зависимость P_6 (т. 6) с отверстием d = 20 мм, d = 14,14 мм и без отверстия, а также с одной (т. 4), двумя (т. 6) и тремя перегородками от времени (до 50 мс); рабочая среда водород

Fig. 8. Dependence of P_6 (t. 6) with a hole d = 20 mm, d = 14,14 mm and without a hole, as well as with one (t. 4), two (t. 6) and three partitions on time (up to 50 ms); working environment hydrogen

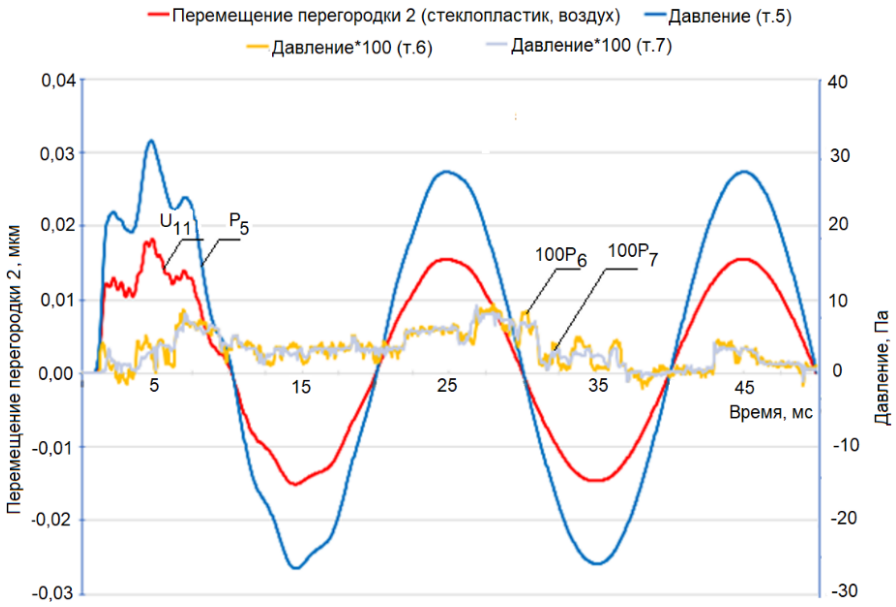


Рис. 9. Зависимости перемещений перегородки 2 U_{11} (т. 11)и давления P_5, P_6, P_7 от времени (до 50 мс); рабочая среда воздух

Fig. 9. 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); working environment air

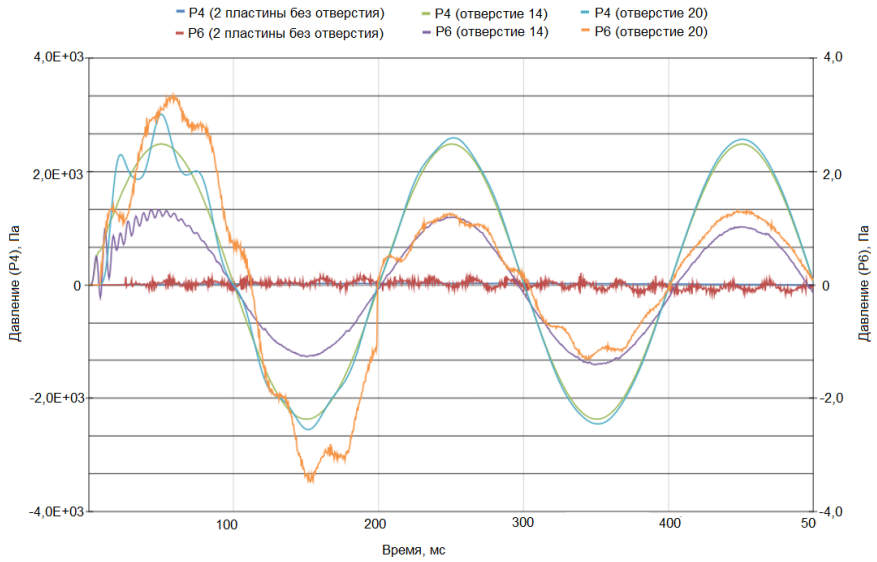


Рис. 10. Зависимости давления P_4, P_6 от времени (до 50мс); рабочая среда водород

Fig. 10. Dependences of the pressure P_4, P_6 on time (up to 50ms); working environment hydrogen

На рис. 10 представлены зависимости давления в контрольных точках 4 и 6 от времени, то есть после первой перегородки амплитуда 27 Па и после второй перегородки амплитуда 0,13 Па, соответственно. С учетом того, что исходное возмущение имеет амплитуду $2{,}5 \cdot 10^3$ Па можно сказать, что первая перегородка снижает давление на два порядка, вторая примерно еще на два порядка.

Заключение

Анализ колебательных процессов в модельном канале с перфорированными перегородками, заполненном водородом, показал значительное влияние перфорации перегородок на динамику системы.

Наличие отверстий в перегородке приводит к снижению амплитуды колебаний её перемещений. Так, амплитуда перемещений сплошной пластины на порядок выше, чем у перфорированной. Перфорация эффективно гасит давление за второй перегородкой, снижая его амплитуду на порядок по сравнению с единственной сплошной перегородкой. Введение дополнительных перегородок усиливает демпфирующий эффект.

Амплитуда перемещения пластины без отверстия на порядок выше, чем амплитуда перемещения пластины с отверстием, за исключением переходного процесса. При наличии перфорации на первой пластине амплитуда колебаний на второй пластине становится на два порядка больше.

Наличие дополнительных глухих перегородок снижает амплитуду колебаний наружной, по отношению к источнику звука, перегородки. Вместе с тем введение третьей перегородки снижает амплитуду колебаний первой и второй перегородок, за счет взаимовлияния перегородок.

Транспортировка водорода сопряжена с меньшими амплитудами колебания давления на внешней стороне модельной установки. Первая перегородка снижает давление на два порядка, вторая примерно еще на два порядка.

2*FSI* подход позволяет учесть новые факторы при проведении численных расчетов парциальных колебательных процессов. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования 2*FSI* подход для исследования преград и перфорированных конструкций. Исследования могут быть полезны для понимания динамики потоков не только водорода, но и других газов.

Таким образом, результаты и выводы, полученные в ходе данного анализа, могут лежать в основе дальнейших экспериментов и разработок в области газодинамики и аэроупругости.

Библиографический список

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

2. Карасевич В. А., Руденко С. Ю., Кортяков А. В. Текущее состояние и потенциал использования природного газа для производства и экспорта водородосодержащей продукции // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2022. – № 1. – С. 160-165.

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

4. 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, Issue 1. – 6 p.

5. Дусалимов М. Э., Валиуллина С. Я., Гундорова И. Г., Алексеев В. А. Основные проблемы транспорта и хранения водорода // Neftegaz.RU. – 2022. – № 9. – С. 52-57.

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

7. Аношкин А. Н., Модорский В. Я., Старцев А. С. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. –2015.– № 1. – С. 5-20.

8. Захаров А.Г., Аношкин А.Н., Паньков А.А., Писарев П.В. Акустические резонансные характеристики двух- и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 3 (46). – С. 144-159.

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

10. Серегина М. А. и др. Численное моделирование процессов взаимовлияния волны газа и деформированной преграды в модельном канале авиационного двигателя //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – №. 69. – С. 92-99.

11. Серегина М. А. и др. Численное моделирование колебательных процессов в модельном канале с двумя перегородками, заполненном водородом //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – №. 6. – С. 47-59.

12. Leissa A. W. Vibration of plates // Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration. – 1969. – 360 p.

13. Устойчивость круговых цилиндрических оболочек / Э.И. Григолюк, В.В. Кабанов. – Изд-во: Москва, 1969. – 346 с.

14. Биргер И. А. Прочность. Устойчивость. Колебания. – Изд-во: Рипол Классик, 2013.– 574 с.

15. Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells // McGraw-Hill, 1959. – 580 p.

16. Soedel W. Vibrations of Shells and Plates // CRC Press, 2004. – 586 p.

17. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластин и оболочек. – Наука, 1972. – 432 с.

18. Allam S. M. et al. Vibration analysis of composite plates with cutouts // Journal of Vibration and Control. – 2010. – Vol. 16, No. 5. – P. 721-744.

19. Reddy J. N. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells // CRC Press, 2007. – 560 p.

20. Kerwin E. M. Damping of flexural waves by a constrained viscoelastic layer // JASA. – 1959. – Vol. 31, No. 7. – P. 952-962.

21. Ingard K. U. On the theory and design of acoustic resonators // JASA. – 1953. – Vol. 25, No. 6. – P. 1037-1061.

22. Maa D.-Y. Potential of microperforated panel absorbers // JASA. – 1998. – Vol. 104, No. 5. – P. 2861-2866.

23. Bolton J. S. et al. Sound transmission through multi-panel structures // JSV. – 1996. – Vol. 191, No. 3. – P. 317-347.

24. Weaver D. S., Ziada S. Flow-induced vibrations in industrial applications // J. Pressure Vessel Tech. – 2007. – Vol. 129, No. 3. – P. 368-375.

25. Paidoussis M. P. Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow. Vol. 1. – Academic Press, 1998. – 508 p.

26. Dowell E. H. A Modern Course in Aeroelasticity // Springer, 2015. – 747 p.

27. ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical User's Guide. Release 2023 R1, 2023.

28. Zhang X., Li W. Numerical study on sound absorption of perforated panels // Applied Acoustics. – 2019. – Vol. 148. – P. 335-343.

29. Liu Y., He C. Acoustic performance of multilayer micro-perforated panel absorbers // Applied Acoustics. – 2020. – Vol. 162. 107225.

30. Kuo S.-M. et al. Real-time DSP implementation of active noise control // IEEE Trans. Control Syst. Technol. – 2005. – Vol. 13, No. 5. – P. 835-843.

31. Zhang Z. et al. Acoustic impedance of perforated materials under high-level excitation // JASA. – 2012. – Vol. 132, No. 4. – P. 2433-2444.

32. Huang X. Sound transmission through a perforated plate with bias flow // JSV. – 2008. – Vol. 313, No. 3–5. – P. 782-799.

33. Zhang Q. et al. A review of acoustic metamaterials and phononic crystals // Appl. Phys. Rev. – 2021. – Vol. 8, No. 3. 031314.

34. Wang X. et al. Hydrogen embrittlement in pipeline steels // Int. J. Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47, No. 12. – P. 6543-6561.

35. Smith B. L. et al. Safety and efficiency in hydrogen transport via pipelines // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2021. – Vol. 145. 111098.

References

1. Yakubson K. I. Perspektivy proizvodstva i ispol′zovaniia vodoroda kak odno iz napravleniĭ razvitiia nizkouglerodnoĭ ėkonomiki v Rossiĭskoi Federatsii (obzor) [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, T. 93, No. 12, pp. 1675-1695.

2. 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.

3. Ismagilova V. S., Chekushina T. V. Transportirovka truboprovodnogo i szhizhennogo prirodnogo gaza: sravnitel′nyi analiz dostoinstv i nedostatkov [Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of advantages and disadvantages] // *Earth Sciences and Subsoil Use*, 2023, T. 46, No. 1 (82), pp. 61-71.

4. 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, Issue 1, 6 p.

5. Dusalimov M. E., Valiullina S. Ya., Gundorova I. G., Alekseev V. A. Osnovnye problemy transporta i khraneniia vodoroda [The main problems of hydrogen transportation and storage] // *Neftegaz.RU*, 2022, № 9, pp. 52-57.

6. 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.

7. 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.

8. Zakharov A.G., Anoshkin A.N., Pankov A.A., Pisarev P.V.Akusticheskie rezonansnye kharakteristiki dvukh- i trekhslonykh sotovykh zvukopogloshchaiushchikh panelei [Acoustic resonance characteristics of two- and three-layer cellular sound-absorbing panels] // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospaceengineering*, 2016, № 3 (46), C. 144-159.

9. 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.

10. 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.

11. Seregina M. A. et al. Chislennoe modelirovanie kolebatel′nykh protsessov v model′nom kanale s dvumia peregorodkami, zapolnennom vodorodom [Numerical modeling of oscillatory processes in a model channel with two partitions filled with hydrogen] // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*, 2024, No. 6, pp. 47-59.

12. Leissa A. W. Vibration of plates // *Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration*, 1969, 360 p.

13. Ustoichivost′ krugovykh tsilindricheskikh obolochek [Stability of circular cylindrical shells] / E.I. Grigolyuk, V.V. Kabanov. Moscow, 1969, 346 p.

14. Birger I. A. Prochnost′. Ustochivost′. Kolebaniia [Durability. Stability. Oscillations]. Ripol Classic, 2013. 574 p.

15. Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells // *McGraw-Hill*, 1959, 580 p.

16. Soedel W. Vibrations of Shells and Plates // *CRC Press*, 2004, 586 p.

17. Volmir A.S. Nelineĭnaia dinamika plastin i obolochek [Nonlinear Dynamics of Plates and Shells]. Nauka, 1972, 432 p.

18. Allam S. M. et al. Vibration analysis of composite plates with cutouts // *Journal of Vibration and Control*, 2010, Vol. 16, No. 5, pp. 721-744.

19. Reddy J. N. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells // *CRC Press*, 2007. 560 p.

20. Kerwin E. M. Damping of flexural waves by a constrained viscoelastic layer // *JASA*, 1959, Vol. 31, No. 7, pp. 952-962.

21. Ingard K. U. On the theory and design of acoustic resonators // *JASA*, 1953, Vol. 25, No. 6, pp. 1037-1061.

22. Maa D.-Y. Potential of microperforated panel absorbers // *JASA*, 1998, Vol. 104, No. 5, pp. 2861-2866.

23. Bolton J. S. et al. Sound transmission through multipanel structures // *JSV*. – 1996, Vol. 191, No. 3, pp. 317-347.

24. Weaver D. S., Ziada S. Flow-induced vibrations in industrial applications // *J. Pressure Vessel Tech*, 2007, Vol. 129, No. 3, pp. 368-375.

25. Paidoussis M. P. Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow. Vol. 1. Academic Press, 1998, 508 p.

26. Dowell E. H. A Modern Course in Aeroelasticity // *Springer*, 2015, 747 p.

27. ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical User's Guide. Release 2023 R1, 2023.

28. Zhang X., Li W. Numerical study on sound absorption of perforated panels // *Applied Acoustics*, 2019, Vol. 148, pp. 335-343.

29. Liu Y., He C. Acoustic performance of multilayer micro-perforated panel absorbers // *Applied Acoustics*, 2020, Vol. 162, 107225.

30. Kuo S.-M. et al. Real-time DSP implementation of active noise control // *IEEE Trans. Control Syst. Technol*, 2005, Vol. 13, No. 5, pp. 835-843.

31. Zhang Z. et al. Acoustic impedance of perforated materials under high-level excitation // *JASA*, 2012, Vol. 132, No. 4, pp. 2433-2444.

32. Huang X. Sound transmission through a perforated plate with bias flow // *JSV*. – 2008, Vol. 313, No. 3-5, pp. 782-799.

33. Zhang Q. et al. A review of acoustic metamaterials and phononic crystals // *Appl. Phys. Rev*, 2021, Vol. 8, No. 3, 031314.

34. Wang X. et al. Hydrogen embrittlement in pipeline steels // *Int. J. Hydrogen Energy*, 2022, Vol. 47, No. 12, pp. 6543-6561.

35. Smith B. L. et al. Safety and efficiency in hydrogen transport via pipelines // *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2021, Vol. 145, 111098.

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 while fulfilling the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for basic scientific research (FSNM-2023-0004 project) "Hydrogen energy. Materials and technology of storage, transportation and application of hydrogen and hydrogen-containing mixtures".
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The authors' contributions are equal.