Серегина М.А., Бабушкина А.В., Модорский В.Я., Черепанов И.Е., Микрюков А.О. 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. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.07

Seregina M.A., Babushkina A.V., Modorskii V.Ya., Cherepanov I.E., Mikryukov A.O. Numerical simulation of the interaction between a wave in hydrogen and a barrier in a model channel. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 6, pp. 68-77. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.07

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.07
УДК 534.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ВОЛНЫ ВОЗМУЩЕНИЯ В ВОДОРОДЕ И ПЕРЕГОРОДКИ В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 ноября 2023 г.
Одобрена: 20 ноября 2023 г.
Принята к публикации:
31 ноября 2023 г.

Ключевые слова:

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

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются вопросы влияния физико-механических характеристик материала конструкции на распространение акустических волн в газе в модельном канале. Исследование влияния материала конструкции, в частности трубопроводов, на распространение волновых процессов связано с проблемой шума, возникающего при транспортировке природного газа и водородсодержащих смесей. Особенно актуальной является проблема шума с учетом прогнозов по развитию отрасли транспортировки и хранения водородной энергетики. Моделирование акустических процессов зачастую связано с источниками возникновения и распространения в моделируемой среде. При этом не учитываются возможное возникновение резонансных явлений или процессов ослабления акустических волн в динамической системе «газ – конструкция».

Краевая задача сформулирована в постановке двунаправленного взаимодействия (2-way Fluid-Structure Interaction, или 2FSI) между деформируемой конструкцией и потоком водорода. Прогнозирование поведения конструкции трубопровода в модельном представлении при воздействиях газа в процессе транспортировки позволит подобрать оптимальный вариант материала для снижения акустического воздействия как внутри канала, так и за его пределами.

Исследования, приведенные в данной работе, осуществляются с использованием системы инженерного анализа ANSYS, позволяющей моделировать рассматриваемые процессы в 2FSI-постановке. В работе приводится анализ поведения волны, генерируемой одномодальным источником звука, взаимодействующей с перегородками, защемленными в трубе прямоугольного сечения. Представлены основные результаты исследования в виде зависимостей амплитуды давления от времени в характерных точках; зависимости перемещений от времени модельных перегородок из различных материалов; зависимости изменения давления и перемещения для разных рабочих тел.

© ПНИПУ

© **Модорский Владимир Яковлевич** – д.т.н., доц., декан аэрокосмического факультета, e-mail: modorsky@mail.ru.
Бабушкина Анна Викторовна – к.т.н., доц. каф. механики композиционных материалов и конструкций, e-mail: annvikoz@mail.ru.
Серегина Маргарита Андреевна – асп. каф. ракетно-космической техники и энергетических систем, инж. центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: sereginarita@gmail.com.
Черепанов Иван Евгеньевич – инж. центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: cherepanovie@sbiw.ru.
Микрюков Антон Олегович – асп. каф. ракетно-космической техники и энергетических систем, инж. центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: anto-mikryuko@yandex.ru.

Vladimir Y. Modorskii – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Aerospace Faculty, e-mail: modorsky@mail.ru.
Anna V. Babushkina – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, 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: sereginarita@gmail.com.
Ivan E. Cherepanov – Engineer of the Center for High-Performance Computing Systems, e-mail: cherepanovie@sbiw.ru.
Anton O. Mikryukov – Postgraduate student of the Department of Rocket and Space Engineering and Energy Systems, Engineer of the Center for High-Performance Computing Systems, e-mail: anto-mikryuko@yandex.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 THE INTERACTION BETWEEN A WAVE IN HYDROGEN AND A BARRIER IN A MODEL CHANNEL

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 November 2023
Approved: 20 November 2023
Accepted for publication:
31 November 2023

Keywords:

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

ABSTRACT

The paper considers the influence of physical and mechanical characteristics (PMC) of materials of the constructions to propagate acoustic waves in gas at a model channel. The research of the influence of PMC materials, pipelines, in particular, on the propagation of wave processes is associated with the problem of noise that arises during the transportation of natural gas and hydrogen-containing mixtures. The problem of noise is especially relevant given the forecasts for the development of the hydrogen energy transportation and storage industry. Modeling of acoustic processes is often associated with the sources of occurrence and propagation in the simulated environment. In this case, the possible occurrence of the resonance phenomena or processes of attenuation of acoustic waves in the dynamic gas-structure system are not taken into account.

The boundary value problem is formulated in a bidirectional interaction statement (2-way Fluid-Structure Interaction or 2FSI) between the deformable structure and the hydrogen flow. Predicting the behavior of the pipeline structure in a model representation under the influence of gas during transportation will make it possible to select the optimal PMC material to reduce the acoustic impact both inside and outside the channel.

The research presented in this work is carried out using the ANSYS engineering analysis system, which allows modeling the processes under consideration in the 2FSI statement. The paper analyzes the behavior of a wave generated by a unimodal sound source interacting with a barrier clamped in a rectangular pipe. The main results of the research are presented in the form of dependencies of the pressure amplitude versus time at characteristic points; the dependence of displacement versus time of the model barriers made of different PMC materials; the dependencies of changes in pressure and displacement for different working fluids.

© PNRPU

Введение

Одним из приоритетных направлений развития энергетики в Российской Федерации, согласно энергетической стратегии ЭС-2035, выступает транспортировка и хранение водорода и водородосодержащих газовых смесей как для внутреннего потребления, так и для экспорта [1–10].

На сегодняшний день основным способом транспортировки водорода и водородосодержащих смесей являются существующие трубопроводы природного газа, зачастую изготовленные из стали. Однако при эксплуатации таких трубопроводов имеют место существенные проблемы:

– потери объема водорода из системы превышают более чем в 3 раза, чем таковые природного газа;

– повышенный шум, возникающий при транспортировке водорода и водородосодержащих газовых смесей, на газораспределительных станциях (ГРС). Действующие нормы для помещений ГРС, установленные в 85 ДБ, предъявляются и к транспортировке водорода.

Проблема шума, или акустических процессов, становится наиболее актуальной с учетом прогнозов по развитию отрасли. Так, к 2040 г. прогнозируется система трубопроводов для транспортировки водорода протяженностью более 23 тыс. км, из которых 75 % будут составлять переоборудованные действующие магистрали для транспортировки природного газа [11; 12]. В связи с этим в работе затрагиваются вопросы, связанные с шумом, возникающим при транспортировке водорода. Так, рассматриваются процессы, связанные с возникновением, распространением акустической волны в трубопроводе в условиях транспортировки водорода.

Моделирование акустических процессов зачастую связано с источниками их возникновения и распространения в моделируемой рабочей среде. Необходимо определить акустические характеристики на установке «канал с потоком» [13–28]. 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 [29; 30]. Примеров исследований акустических процессов в 2*FSI*-постановке недостаточно. На данный момент подобные исследования в связанной постановке задачи имеют отражения в работах таких авторов, как Р.В. Мормуль и А.С. Голдобин, В.Я. Модорский, А.О. Микрюков, А.Е. Кирюшкин, Л.Л. Миньков, И.К. Марчевский, В.В. Лукин, Ф.С. Кулешов и др. [31–35]

В данной работе моделируются акустические процессы в трубопроводе при транспортировке водорода с использованием 2*FSI*-подхода. Исследования направлены на выявление закономерностей по распростра-

нению и гашению звуковой волны в модельном приближении трубопровода. В качестве модельного приближения рассматривается канал прямоугольного сечения, разделенный одной или несколькими перегородками, жестко защемленными по периметру.

В качестве материала перегородки рассматриваются несколько вариантов, существенно различающихся по физико-механическим характеристикам: сталь, титан, полиэтилен и стеклопластик. При интенсивном воздействии водорода на перегородке появляются деформации и возможно возникновение процессов поврежденности и/или разрушения, что может также сказаться на поведении акустического поля. Данные процессы также требуют дополнительного изучения.

В качестве рассматриваемых рабочих тел используются воздух или чистый водород.

Таким образом, исследования направлены на оценку влияния физико-механических характеристик конструкции перегородки на распространение и гашение акустических волн в воздухе/водороде внутри модельного канала прямоугольного сечения.

1. Постановка задачи моделирования акустических процессов в модельном канале

В работе исследуются два варианта конструкции: с одной и двумя перегородками.

Вначале рассмотрен вариант геометрии канала прямоугольного сечения с одной установленной перегородкой. Расположение областей задания начальных и граничных условий, контрольных точек измерений представлено на рис. 1. Канал прямоугольного сечения составляет 50 × 100 × 800 мм. Перегородка толщиной 1 мм делит длину канала пополам.

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

– 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 по рисунку;

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

– т. 5, 6 располагаются после перегородки, т. 5 – посредине правой полости, т. 6 – вблизи заглушки слева;

– т. 7 располагается внутри перегородки, по центру, для возможности оценки ее перемещений.

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 являются два рабочих тела: воздух или чистый водород. Рабочие тела обладают постоянством состава с заданными свойствами.

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 и после перегородки.

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

8. Для исследуемых процессов не учитывается влияние гравитации.

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

10. Рабочее тело влияет на перегородку как процесс перераспределения газодинамических полей потока и в то же время является откликом на процесс деформирования перегородки; при этом генерируемая на входе волна распространяется по длине канала, достигает перегородки, сталкивается с ней, отражается, частично гасится и проникает через перегородку с последующей трансляцией возмущений в поток.

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

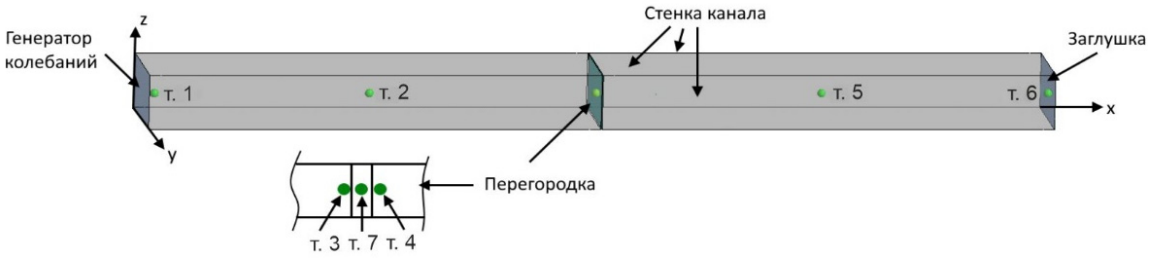


Рис. 1. Схема модельной геометрии канала с перегородкой и расположением областей для задания граничных условий

Fig. 1. Scheme of the model channel geometry with a barrier and the location of areas for specifying boundary conditions

1. Процессы в перегородке описываются в линейном приближении 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 рассеивая волну, с последующим распространением остаточного возмущения в потоке по другую сторону перегородки.

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

Таким образом, разработанная математическая модель связанной 2*FSI*-постановки для исследуемых акустических процессов в канале прямоугольного сечения с перегородкой базируется для газодинамической области на уравнениях Рейнольдса, замкнутых моделью турбулентности *k*-ω (англ. Shear-Stress Transform), позволяющей разрешать распространение акустической волны по потоку. Для механической области описывается дифференциальными уравнениями в перемещениях в приближении линейной изотропной теории упругости. Полная система уравнений математической модели исследуемых процессов представлена в работе коллектива авторов [36]. В работе [36] приведены результаты подобных исследований, полученных для рабочей среды – воздух. Данные результаты используются для последующего сравнительного анализа.

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

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

– на поверхностях «Заглушка» и «Стенка канала» определены условия типа неподвижная стенка, без прилипания потока, отсутствует шероховатость.

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

2. Моделирование акустических процессов для модели канала с одной перегородкой

Были проведены вычислительные эксперименты для трех вариантов материала перегородки: из стали (модуль упругости $E = 2\cdot10^{11}$ Па), из титана ($E = 1{,}12\cdot10^{11}$ Па) и полиэтилена ($E = 1{,}1\cdot10^{9}$ Па). Моделируемый отрезок времени соответствует 50 мс.

По результатам вычислительных экспериментов, проиллюстрированных на рис. 2, получены зависимости амплитуды перемещений перегородки от времени для исследуемых материалов в условиях воздуха и чистого водорода. Стоит отметить, что результаты, полученные для перегородки из полиэтилена, для воздуха и чистого водорода на диаграмме (см. рис. 2) построены по вспомогательной оси ординат, расположенной справа на рисунке.

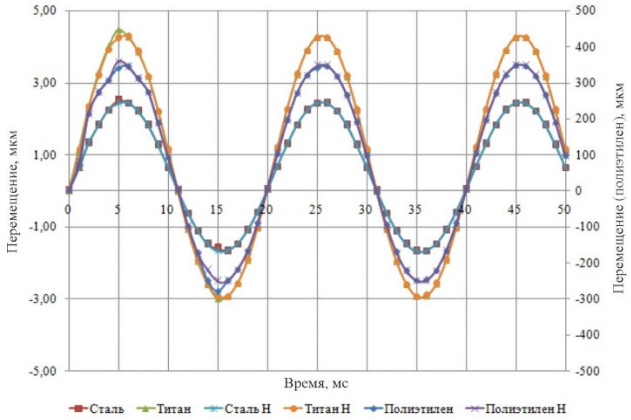


Рис. 2. Диаграммы зависимости перемещений точки 7 от времени при различных материалах перегородки при воздействии воздуха (сталь, титан, полиэтилен) и чистого водорода (сталь Н, титан Н, полиэтилен Н)

Fig. 2. Diagrams of the dependence displacements (point 7) on time for various barrier materials when exposed to air (steel, titanium, polyethylene) and pure hydrogen (steel H, titanium H, polyethylene H)

При анализе результатов выявлено, что амплитуда колебаний перегородки обратно пропорциональна модулю упругости применяемого материала. Так, применение полиэтилена (модуль упругости $E = 1{,}1\cdot10^{9}$ Па) вместо стали (модуль упругости $E = 2\cdot10^{11}$ Па) приводит к двукратному увеличению амплитуды колебаний. Эта зависимость прослеживается как в воздушной рабочей среде, так и в водороде.

С другой стороны, колебания перегородки имеют несимметричный характер как в пространстве, так и во времени. То есть перемещения перегородки в направлении распространения возмущения в потоке имеют большие значения, чем в противоположном направлении. Продолжительность полупериодов колебаний перегородки также неодинакова. При движении в направлении распространения возмущения в потоке полупериод больше, чем в противоположном направлении.

По результатам вычислительных (см. рис. 2) экспериментов на интервале от 0 до 7 мс наблюдается

нелинейность как по перемещениям перегородки, так и по распределению параметров потока в водородной среде.

Анализ зависимости разности давлений в исследуемых рабочих средах в контрольной точке 3 (рис. 3) от времени показал, что максимум наблюдается в момент прохождения перегородкой положения равновесия в конце полупериода колебаний. Разность давлений ΔP определена как разность давления в водороде и воздухе ($\Delta P = P_{H2}$-P_{air}).

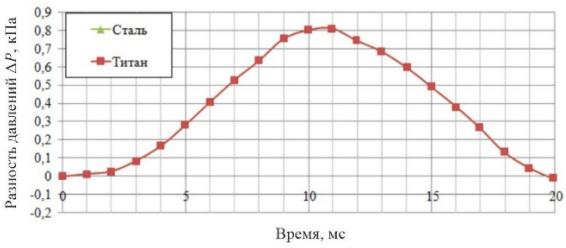


Рис. 3. Диаграммы зависимости разности давлений между воздухом и водородом от времени при различных материалах перегородки (сталь, титан) в контрольной точке 3

Fig. 3. Diagrams of the pressure difference between air and hydrogen versus time for different barrier materials (steel, titanium) at control point 3

В соответствии с результатами, проиллюстрированными на рис. 3, существенных различий в характере изменения параметров потока при использовании различных материалов перегородки не обнаружено. Разность давлений ΔP имеет гармонический характер изменения.

Проведен сравнительный анализ перемещений перегородок из стали, титана и полиэтилена при воздействии волны в воздухе и волны в водородной среде, проиллюстрированный на рис. 4. Результаты приведены (см. рис. 4) в виде разности перемещений ΔU_x,

$$\Delta U_x = U_{\text{H2}} - U_{\text{air}},$$

где U_{H2} – перемещение в перегородке в направлении оси X при воздействии водорода; U_{air} – перемещение в перегородке в направлении оси X при воздействии воздуха.

На рис. 4 на вспомогательной, правой, оси ординат приведены результаты для полиэтилена.

Выявлена корреляция между рабочей средой и поведением перегородки при заданном законе возмущения рабочего тела. Так, при воздействии волны водорода на перегородку из полиэтилена наблюдаются бóльшие значения перемещений, чем на воздухе, с учетом знака перемещений.

Минимальные амплитуды зависимости ΔU_x обнаружены для стальной перегородки, максимальные – для полиэтилена. Зависимости напоминают гармонические и соответствуют движению контрольной точки 7. При этом ΔU_x меняет знак при смене направления перемещения перегородки со смещением узловой точки вправо по временной оси. Полупериод перемещений по потоку больше полупериода перемещений против потока в 1,22 раза и слабо зависит от рассматриваемого материала.

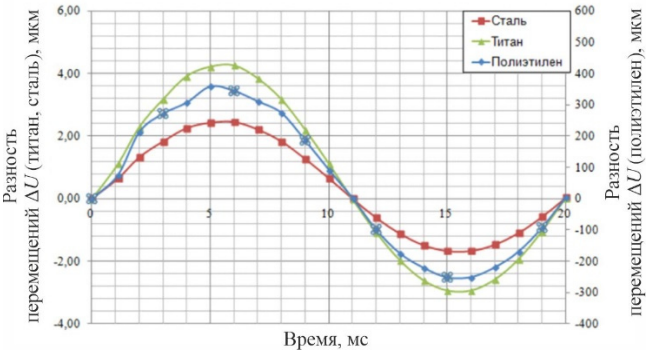


Рис. 4. Диаграммы зависимости разности перемещений перегородки при взаимодействии с воздухом или водородом от времени при различных материалах перегородки (сталь, титан, полиэтилен) в точке 7

Fig. 4. Diagrams of the difference in displacement of the barrier when interacting air or hydrogen versus time for different barrier materials (steel, titanium, polyethylene) at point 7

На рис. 5 приводятся одновременно изменения перемещений во времени для перегородки из полиэтилена в точке 7 (правая ось ординат на рис. 5) и изменения давления во времени в точке 3, расположенной слева вблизи точки 7 в газодинамической полости (левая ось ординат на рис. 5).

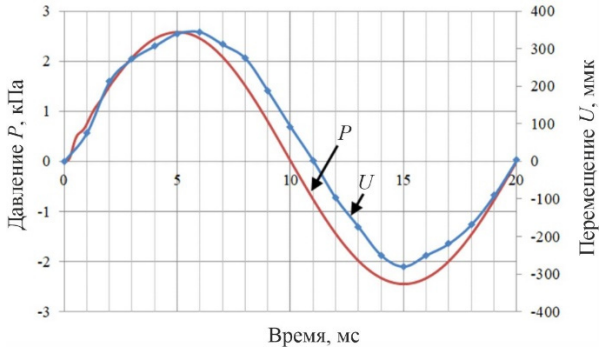


Рис. 5. Диаграммы зависимости давления и перемещений перегородки из полиэтилена в рабочей среде (воздух) от времени

Fig. 5. Diagrams of pressure and displacement of a polyethylene barrier in the air versus time

По результатам наблюдаются запаздывание перемещений перегородки примерно на π/20 относительно колебаний давления в воздухе. Особенно этот эффект выражен при прохождении перегородки положения равновесия.

На рис. 6 и 7 показаны зависимости изменения давления и перемещений перегородки из титана и стали в тех же контрольных точках, что и на рис. 5. Рабочее тело – воздух. Отставание перегородки примерно на π/20, что и для перегородки из полиэтилена.

Для титановой и стальной перегородок график изменения давления во времени имеет близкие (по модулю) амплитуды как при движении перегородки вправо, так и влево. Графики перемещений имеют существенные отличия от гармонических зависимостей. Амплитуда

перемещений перегородки вправо значительно больше (в направлении распространения волны в рабочей среде), а против движения волны – меньше. На титане и стали это отличие достигает 1,5 раза. На полиэтилене отличие составляет 1,25 раза.

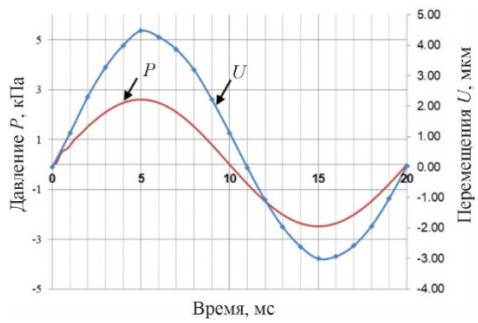


Рис. 6. Диаграммы зависимости давления и перемещений перегородки из титана в рабочей среде (воздух) от времени

Fig. 6. Diagrams of pressure and displacement of a titanium barrier in the air versus time

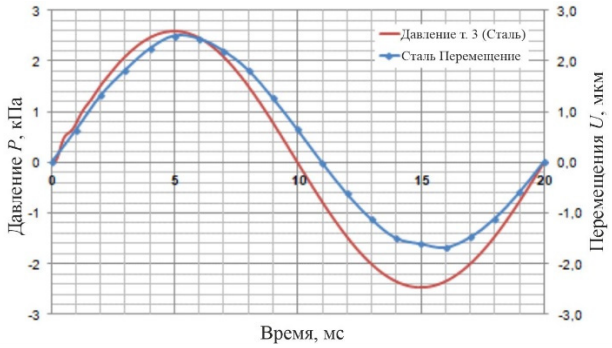


Рис. 7. Диаграмма зависимости давления (т. 3) и перемещений (т. 7) для перегородки из стали в рабочей среде (воздух) от времени

Fig. 7. Diagrams dependence of pressure and displacement of a steel barrier at the air versus time

3. Моделирование акустических процессов для модели канала с двумя перегородками

Представляет интерес анализ влияния второй перегородки, изготовленной из того же материала и установленной в канал на некотором расстоянии за первой.

На рис. 8 показана модельная труба с дополнительной перегородкой. Расстояние между перегородками составляет 20 мм. Газодинамические полости заполнены воздухом или водородом.

Концептуальная и математическая постановка доопределены условиями взаимовлияния между перегородкой 2 и газом аналогично модели с одной перегородкой. Начальные и граничные условия для исследуемого варианта конструкции соответствуют варианту с одной установленной перегородкой.

В качестве исследуемого материала перегородок рассматривался стеклопластик с модулем упругости $E = 22$ ГПа. По результатам вычислительного эксперимента с двумя перегородками получены зависимости изменения давления рабочего тела от времени в контрольных точках и зависимости перемещения геометрических центров перегородок от времени.

Были проведены вычислительные эксперименты для рассматриваемой конфигурации прямоугольного канала. Моделируемый отрезок времени соответствует 50 мс.

По результатам вычислительных экспериментов, проиллюстрированных на рис. 9, получены зависимости амплитуды перемещений перегородок из стеклопластика от времени в условиях водорода. Стоит отметить, что перемещения, полученные для второй перегородки, на диаграмме (см. рис. 9) обозначены U_2 и построены на правой вспомогательной оси ординат. Перемещения, полученные для первой перегородки, на диаграмме (см. рис. 9) обозначены U_1 и построены на левой основной оси ординат.

Из анализа результатов, приведенных на рис. 9, следует, что характер колебаний перегородки 2 по средним значениям совпадает с формой колебаний перегородки 1. Но при движении перегородки 2 в направлении волны возмущения в газе происходит модулирование колебаний с частотой, соответствующей собственной частоте перегородок. Этого не наблюдается на перегородке 1. При движении перегородки 2, как и перегородки 1, в направлении волны возмущения в газе колебания модулируются частотой, соответствующей собственной частоте больших газодинамических полостей. Затем эти процессы затухают. Колебания перегородки 2 на два порядка ниже, чем для перегородки 1.

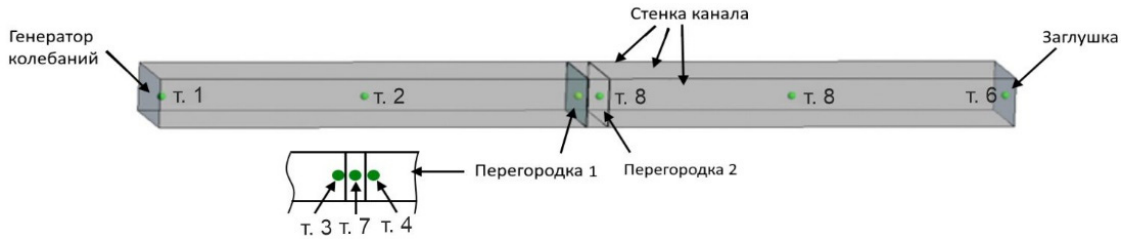


Рис. 8. Схема модельной геометрии канала с перегородками и расположением областей для задания граничных условий

Fig. 8. Scheme of the model channel geometry with two barriers and the location of areas for specifying boundary conditions



Рис. 9. Диаграмма зависимости перемещений первой и второй перегородки от времени на водороде

Fig. 9. Diagram of the displacements of the first and second barrier versus time on hydrogen

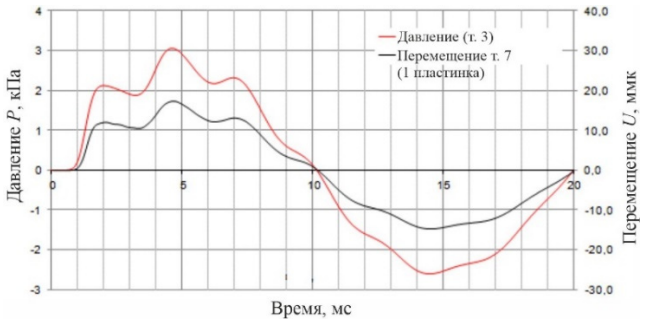


Рис. 10. Диаграмма зависимости изменения давления в водороде (точки 3) и перемещений первой перегородки (стеклопластик) от времени

Fig. 10. Diagram of the change in pressure in hydrogen (point 3) and the displacement of the first barrier (fiberglass) versus time

На рис. 10 проиллюстрированы результаты по изменению величины давления и перемещений первой перегородки в рассматриваемой конфигурации от времени.

Введение второй перегородки меняет характер колебаний как по перемещениям перегородки 1, так и по изменению давления вблизи нее, по сравнению с конструкцией, имеющей только одну перегородку в прямоугольном канале (см. рис. 5–7). В этом случае наблюдаются не только колебания на несущей частоте 50 Гц, но и их модуляция на собственной частоте газодинамической полости (L = 400 мм).

Асимметрия колебаний наблюдается как в газе, так и в конструкции. Если на одной перегородке снижение давления P на втором полупериоде не наблюдалось, то при наличии второй перегородки давление во втором полупериоде уменьшается.

Заключение

Обнаружен сдвиг по фазе колебаний перегородки и возмущающего давления. Колебания перегородки отстают от колебаний давления на $\pi/20$.

Сдвиг по фазе означает наличие потерь и возможность их моделирования в упругой постановке.

Отставание колебаний перегородки от колебаний возмущающего давления означает возможность моделирования автоколебательных процессов в рассмотренной системе и поиск условий их возникновения.

Наблюдается зависимость поведения механической системы от вида рабочего тела.

Предложенная модель может быть использована для уточнения акустических расчетов.

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

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

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

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

11. 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.

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. 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., Premo J.W., Hersh A.S. Advanced turbofan duct liner concepts. – 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., 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. – P. 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. – P. 961–971.

18. Peng F. Sound absorption of a porous material with a perforated facing at high sound pressure levels // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 425. – P. 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. – P. 158–161.

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

22. Hynninen A., Åbom M. Determination of in-duct sound power beyond the plane wave range using wall-mounted microphones // 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., 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. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // 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., Зиновьева Т.В. Модальный анализ трубы, поврежденной водородом, как неоднородной по толщине оболочки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 170–182.

29. Численное моделирование ступени центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата в 2FSI-постановке / В.Я. Модорский, И.Е. Черепанов, С.Л. Калюлин, А.О. Микрюков, А.В. Бабушкина, Д.С. Максимов, Д.Н. Хроликова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2019. – № 56. – С. 83–91.

30. 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.

31. Мормуль Р.В., Голдобин А.С., Павлов Д.А. Концепция применения композиционных материалов для оптимального проектирования осевого вентилятора системы охлаждения газотурбинной установки в составе газоперекачивающего агрегата «Урал» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 60. – С. 15–25.

32. Микрюков А.О., Модорский В.Я., Черепанов И.Е. Разработка математической модели для исследования динамических процессов в лабиринтном уплотнении ступени центробежного компрессора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 66. – С. 115–124.

33. Кирюшкин А.Е., Миньков Л.Л. Параллельная реализация решения сопряженной задачи определения внутрибаллистических характеристик двигателей на твердом топливе // Компьютерные исследования и моделирование. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 47–65.

34. Кулешов Ф.С., Головастов С.В., Бивол Г.Ю. Влияние пористой полиуретановой перегородки на гидравлические характеристики потока и на распространение фронта пламени в открытом канале // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2022. – № 3 (102). – С. 110–123.

35. Лукин В.В., Марчевский И.К. Учебно-экспериментальный вычислительный кластер. Ч. 1. Инструментарий и возможности // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки». – 2011. – № 4. – С. 28–43.

36. Численное моделирование процессов взаимовлияния волны газа и деформированной преграды в модельном канале авиационного двигателя / М.А. Серегина [и др.] // 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. T. 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. T. 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. T. 48. №. 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. Issue 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. T. 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. T. 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. T. 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. T. 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. Issue 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. №. *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. T. 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. T. 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. T. 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. T. 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. 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.

30. 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.

31. Mormul R.V., Goldobin A.S., Pavlov D.A. Kontseptsiia primeneniia kompozitsionnykh materialov dlia optimal′nogo proektirovaniia osevogo ventiliatora sistemy okhlazhdeniia gazoturbinnoi ustanovki v sostave gazoperekachivaiushchego agregata "Ural" [The concept of using composite materials for the optimal design of an axial fan of the cooling system of a gas turbine unit as part of the Ural gas pumping unit] // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. 2020. No. 60. pp. 15-25.

32. Mikryukov A. O., Modorsky V. Ya., Cherepanov I. E. Razrabotka matematicheskoi modeli dlia issledovaniia dinamicheskikh protsessov v labirintnom uplotnenii stupeni tsentrobezhnogo kompressora [Development of a mathematical model for studying dynamic processes in the labyrinth seal of a centrifugal compressor stage] // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. 2021. No. 66. pp. 115-124.

33. Kiryushkin A. E., Minkov L. L. Parallel′naia realizatsiia resheniia sopriazhennoĭ zadachi opredeleniia vnutriballisticheskikh

kharakteristik dvigatelei na tverdom toplive [Parallel implementation of the solution to the conjugate problem of determining the intra-ballistic characteristics of solid fuel engines] // *Computer Research and Modeling*. 2021. T. 13. No. 1. pp. 47-65.

34. Kuleshov F. S., Golovastov S. V., Bivol G. Yu. Influence of a porous polyurethane partition on the hydraulic characteristics of the flow and on the propagation of the flame front in an open channel // *Bulletin of Moscow State Technical University. NE Bauman. Series "Natural Sciences"*. 2022. No. 3 (102). pp. 110-123.

35. Lukin V.V., Marchevsky I.K. Educational and experimental computing cluster. Part 1. Tools and capabilities // *Bulletin of the Moscow State Technical University. NE Bauman. Series "Natural Sciences"*. 2011. No. 4. pp. 28-43.

36. 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 финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FSNM-2023-0004 «Водородная энергетика. Материалы и технология хранения, транспортировки и применения водорода и водородсодержащих смесей».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funded. The work was carried out with financial support from the Russian Ministry of Education and Science, project FSNM-2023-0004 “Hydrogen energy. Materials and technology for storage, transportation and use of hydrogen and hydrogen-containing mixtures.”

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

The contribution of the authors is equivalent.