

На правах рукописи

Темербеков Валентин Макарович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ОСЛАБЛЕНИЯ
ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ПОСРЕДСТВОМ ВВЕДЕНИЯ В ПОТОК
ТВЕРДЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН).

Научный руководитель:

Бедарев Игорь Александрович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией № 12 «Волновые процессы в ультрадисперсных средах» ИТПМ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Васильев Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Газовой детонации» Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН.

Киверин Алексей Дмитриевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией №15.2 «Вычислительной физики» Объединенного института высоких температур РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «08» декабря 2023 г. в 9⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.1.125.01 (Д003.035.02) в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

http://www.itam.nsc.ru/website/inst/upload/infoblock/file/0xo68-Temerbekov_textDiss.pdf

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



С.А. Гапонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время остро стоит вопрос об использовании высокоэффективных и экологичных источников энергии. В качестве таких топлив могут выступать различные газообразные вещества. Одним из таких газов является водород. Водород широко распространен в природе, это десятый по распространенности элемент в земных недрах. Высокая теплотворная способность и достаточно безопасные продукты окисления водорода делают это топливо одним из самых перспективных источников энергии в мире. По прогнозам к 2040 году 25 % автомобилей будут использовать водород в качестве топлива. Однако, вместе с этим, низкие пределы воспламенения и высокая диффузионная способность водорода обуславливают возрастание возможных взрывоопасных ситуаций при его эксплуатации. При этом у 86 % инцидентов, связанных с воспламенением водорода, не определены источники воспламенения. В связи с этим возрастает интерес к исследованиям, направленным на изучение вопросов взрыво- и пожаробезопасности при эксплуатации как водорода, так и других высокоэффективных газообразных топлив.

Одним из направлений исследований в этой области является поиск способов ослабления и подавления газовой детонации. Под ослаблением детонационной волны (ДВ) понимается снижение ее скорости. Подавление детонации предполагает срыв детонации и гашение волны горения. Срыв детонации – это разделение фронта ДВ на ударную волну и фронт горения. На сегодняшний день существуют различные пути решения данной задачи, например установка поглощающих покрытий на стенках канала или использование пористых стенок каналов. Результаты таких исследований показывают, что состав, толщина и размер пор поглощающего материала, а также площадь покрытия канала и его ширина влияют на ослабление детонации. Также установлено, что при ослаблении детонации до скорости, превышающей акустическую скорость Чепмена–Жуге, возможно повторное инициирование детонации.

Помимо поглощающих покрытий для ослабления детонации используются различные объекты, которые можно установить на пути распространения детонационной волны. Такими объектами могут служить, например, облака инертных частиц. На основе таких задач получено много факторов и параметров, влияющих на ослабление детонации, которые также применимы и к другим объектам, имитирующим некоторую преграду. В исследованиях было показано, что потери импульса и тепла при взаимодействии газовой фазы с частицами приводят к значительному дефициту скорости распространения детонации. Уменьшение диаметра частиц усиливает это влияние. Увеличение объемной доли и длины облака частиц приводит к монотонному уменьшению скорости детонационной волны вплоть до гашения детонации. При этом влияние объемной концентрации гораздо значительнее, чем влияние диаметра частиц. Для ослабления газовой детонации могут быть

использованы пробки инертного газа, для которых характерными параметрами, влияющими на распространение детонации, являются в основном длина пробки и тип инертного газа.

Наряду с инертными частицами в качестве гасителей детонации используются и химически активные вещества, например порох. Результаты таких работ показали, что для химически активных частиц с малой плотностью эффект подавления более заметен, чем для инертных частиц с большой плотностью. Существуют и комбинированные способы ослабления детонации, для которых показано, что добавление частиц в инертный газ приводит к более эффективному ослаблению детонации по сравнению с чистым инертным газом. Также выявлено, что помимо концентрации частиц, плотности их материала и их размера важным параметром в процессе подавления является время взаимодействия с инертной фазой.

Для ослабления детонации также может быть использована жесткая проницаемая преграда, стационарно установленная на пути распространения детонации. Для таких объектов характерны те же тенденции, что и для подавления с помощью инертных частиц, а именно влияние пропускной способности или пористости (аналог объемной концентрации), протяженности преграды, характерных размеров преграды. В случае жесткой преграды влияние также оказывают форма элементов преграды и их положение относительно фронта детонационной волны.

Помимо тел различной формы в качестве преграды могут выступать перфорированные пластины, перекрывающие канал. В таких исследованиях выявлено, что перфорированные пластины могут способствовать как срыву детонации, так и переходу от дефлаграции к детонации. На режим распространения детонации влияют толщина пластин, форма и размер отверстий, а также расстояния между отверстиями.

В срыве детонации при ее взаимодействии с различными препятствиями возможно повторное инициирование. Исследования подобного рода задач показали, что расположение препятствий в каналах и коэффициент блокировки оказывают существенное влияние на ускорение пламени и переход дефлаграции в детонацию (ПДД). Для препятствий, расположенных в шахматном порядке, столкновения волн пламени и волн давления с препятствиями приводят к максимально быстрому ускорению пламени и кратчайшему времени инициирования детонации. В случае линейного расположения препятствий пламя распространяется медленнее, однако сильная фокусировка ударных волн приводит в итоге к ПДД. Повышение коэффициента блокировки препятствует возникновению ПДД.

Как было показано выше, исследованиям, направленным на выявление способов и закономерностей ослабления детонации, посвящено множество работ. Такой интерес обуславливается актуальностью вопросов взрыво- и пожаробезопасности. Несмотря на большое количество исследований информация о степени влияния некоторых геометрических параметров преграды на дефицит скорости детонации недостаточно полна. Обобщение известных критериев ослабления детонационных волн также неполное и

нуждается в дополнительных исследованиях – аналитических, численных и особенно экспериментальных данных. Однако проведение экспериментов осложняется риском возникновения взрывоопасных ситуаций, а современные средства измерений не всегда позволяют исследователям в полной мере выявить некоторые характеристики изучаемых явлений.

Тем самым представляется **актуальным**:

- адаптировать физико-математическую модель, созданную на основе пакета ANSYS Fluent с использованием упрощенного кинетического механизма горения водорода в воздухе, на задачи инициирования, ослабления и ре-инициирования газовой детонации;
- получить зависимости характеристик детонационной волны, распространяющейся по открытым областям и в каналах, от геометрических параметров различных препятствий;
- оценить влияние геометрических параметров препятствий на степень ослабления детонации.

Целью исследования является анализ влияния присутствия твердых тел на возбуждение, распространение и ослабление детонации в газовых средах.

Задачами настоящей работы являются:

1. Тестирование расчетного алгоритма по экспериментальным данным и по теоретическим критериям оценки энергии инициирования детонации, необходимое для дальнейших расчетов задач о взаимодействии детонационных волн с различными объектами.
2. Численное моделирование взаимодействия ячеистой детонационной волны с жесткой проницаемой преградой, состоящей из наборов жестко закрепленных твердых объектов, равномерно распределенных в расчетной области.
3. Получение зависимостей интенсивности детонационных волн при взаимодействии с различными преградами от их геометрических параметров.
4. Оценка степени влияния геометрических параметров преграды на эффективность ослабления детонации.

Научная новизна заключается в следующем.

1. Показано, что достаточно простой одностадийный механизм химических реакций, отлаженный на экспериментальных данных о времени задержки воспламенения, скорости детонационной волны и размере детонационной ячейки, позволяет достаточно точно воспроизводить режимы сложных детонационных течений, наблюдаемые в экспериментах, а также получить значение энергии инициирования детонации, хорошо коррелирующее с теоретической оценкой.
2. Показано, что несмотря на трехмерную природу детонационной ячейки двумерное моделирование позволяет адекватно воспроизводить особенности детонационных течений, о чем свидетельствует корреляция режимов наклонных детонационных волн, получаемых в расчетах, с теоретической моделью и экспериментальными данными.

3. Показано, что при прохождении детонационной волны по каналу потери тепла на изотермических и теплопроводных стенках близки, а максимальный тепловой поток наблюдается вблизи фронта детонационной волны. Поскольку время прохождения детонационной волны значительно меньше характерного времени нагрева стенок, температура стенок меняется слабо, и режимы течения, реализующиеся при указанных температурных условиях на стенке, близки. В случае адиабатических граничных условий на стенках скорость детонационной волны заметно выше из-за отсутствия теплопотерь.
4. Подтверждены и конкретизированы закономерности ослабления детонации, наблюдаемые экспериментально и полученные численно другими авторами.
5. Оценен вклад геометрических параметров преграды в виде зависимостей скорости распространения детонации по длине канала на степень ослабления детонации. Показано, что уменьшение вертикального расстояния между препятствиями оказывает более сильный эффект на ослабление детонации, чем уменьшение горизонтального расстояния. Количество рядов препятствий также оказывает более сильное влияние на ослабление детонации по сравнению с удельным объемом препятствий.
6. Показано, что горизонтальное расстояние между объектами преграды и их диаметр не являются самостоятельными параметрами, влияющими на интенсивность детонации. Их изменение при фиксированной длине преграды приводит к изменению удельного объема препятствий, изменению количества рядов препятствий и коэффициента блокировки канала, что уже в свою очередь оказывает влияние на ослабление детонации.

Теоретическая и практическая ценность работы заключается в адаптации физико-математической модели, разработанной на основе пакета ANSYS Fluent с использованием упрощенных кинетических механизмов химических реакций для горения водорода в воздухе, для задач инициирования, ослабления и ре-инициирования газовой детонации; дополнении, обобщении, конкретизации и оценке степени влияния различных геометрических параметров преграды на ослабление детонационной волны; а также в выявлении косвенных факторов, влияющих на интенсивность распространения детонации при ее взаимодействии с жесткой проницаемой преградой.

Достоверность полученных **результатов** подтверждается тестированием физико-математической модели и расчетного алгоритма по экспериментальным данным и теоретической модели, соответствием результатов известным экспериментальным данным и расчетным данным других авторов, сходимостью результатов на различных расчетных сетках.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты тестирования и отладки физико-математической модели и кинетического механизма химических реакций для описания процессов инициирования, распространения и ослабления газовой детонации в водородно-воздушной смеси.
2. Результаты расчетов распространения детонации в стехиометрической топливно-воздушной смеси в канале с жесткой проницаемой преградой:

картины течения, режимы распространения, зависимости скорости детонации от различных геометрических параметров преграды.

3. Результаты анализа степени влияния параметров на интенсивность распространения детонации, сравнение полученных результатов с известными численными и экспериментальными данными, выявление косвенных факторов, влияющих на интенсивность детонации.

Апробация результатов исследования. Результаты, полученные в рамках настоящей работы, представлялись и обсуждались на семинарах под руководством академика РАН Фомина В.М., профессора Федорова А.В. (ИТПМ СО РАН), а также на XV, XVI и XVII Всероссийских семинарах «Динамика многофазных сред» (Новосибирск, 2017, 2019 и 2021); XI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2017); XII, XIII, XIV, XVI и XVII Всероссийских конференциях молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск – Шерегеш, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023); VIII и X Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2019, 2020); XX и XXI Международной конференции по методам аэрофизических исследований, ICMAR (Новосибирск, 2020, 2022); X Международный симпозиум «Неравновесные процессы, плазма, горение и атмосферные явления» (NEPCAR-2022) (Сочи, 2022); Всероссийский научный симпозиум по проблемам аэромеханики и газовой динамики, посвященный 100-летию со дня рождения академика Горимира Горимировича Чёрного (Москва, 2023).

Личный вклад автора. Автор провел все расчеты и выполнил обработку полученных данных. Автор также принимал участие в постановке задач, обсуждении результатов, подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и других изданиях.

Публикации по теме диссертации. Общее число публикаций по материалам диссертации – 24, в том числе 3 статьи в журналах из списка ВАК, 3 статьи в рецензируемых научных журналах (Web of Science и Scopus), 3 статьи в сборниках трудов конференций (Web of Science, Scopus) и 15 публикаций в тезисах конференций различного уровня (РИНЦ). Большинство работ выполнено в соавторстве с научным руководителем и другими исследователями.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 91 наименование. Материал изложен на 119 страницах, включает 6 таблиц, 66 рисунков и схем.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан обзор литературы, посвященной вопросам инициирования, ре-инициирования, распространения и ослабления газовой детонации. На основе имеющихся литературных данных проведено обобщение различных параметров гасителей детонации и их влияния на интенсивность распространения ДВ. Обоснована актуальность темы диссертации,

сформулирована цель диссертации и дано краткое изложение полученных результатов.

Первая глава посвящена описанию и тестированию математической модели и кинетической схемы химических реакций, используемых в работе.

В П. 1.1 дано описание системы уравнений законов сохранения, решаемых в рамках математической модели, а также уравнений химической кинетики и деталей численного алгоритма.

В П. 1.2 представлены результаты тестирования математической модели и численного алгоритма по экспериментальным данным о формировании режимов наклонной детонации быстролетящим телом (БЛТ). Представлена постановка задачи, приведены результаты тестирования расчетной сетки и сопоставления полученных в расчетах режимов наклонной детонации с экспериментальными данными¹ (рис. 1). Показано, что используемая математическая модель достаточно адекватно воспроизводит все режимы, наблюдаемые в эксперименте, а кинетическая схема химических реакций позволяет получить достаточно точное изменение размеров детонационной ячейки смеси в зависимости от начального давления.

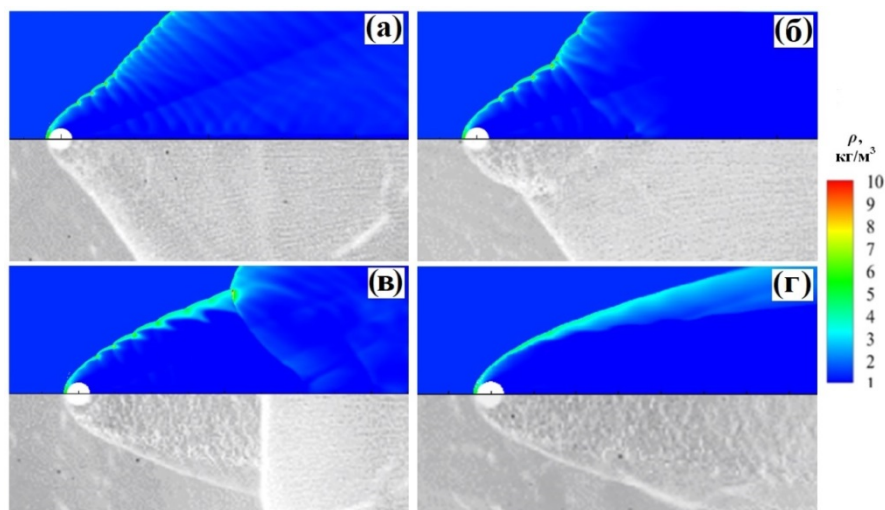


Рис. 1. Расчетные поля плотности (сверху). Экспериментальные теневые фотографии (снизу)

- (а) – наклонная детонационная волна (НДВ) при $P_{cm} = 141$ кПа
- (б) – тип «Соломенная шляпа» со стабилизированной НДВ при $P_{cm} = 136$ кПа
- (в) – тип «Соломенная шляпа» с отходящей НДВ при $P_{cm} = 131$ кПа
- (г) – ударно-инициированное горение при $P_{cm} = 121$ кПа

Показано, что исследуемую задачу даже для установившихся режимов наклонной детонации следует решать в нестационарной постановке. Представлены результаты собственных расчетов инициирования различных режимов детонации в зависимости от размеров БЛТ. Результаты расчетов нанесены на карту режимов и сопоставлены с экспериментальными данными (рис. 2). Получено хорошее количественное согласование расчетных и экспериментальных данных.

¹Maeda S., Sumiya S., Kasahara J., Matsuo A. Scale effect of spherical projectiles for stabilization of oblique detonation waves // Shock Waves. 2015. Vol. 25. P. 141–150.

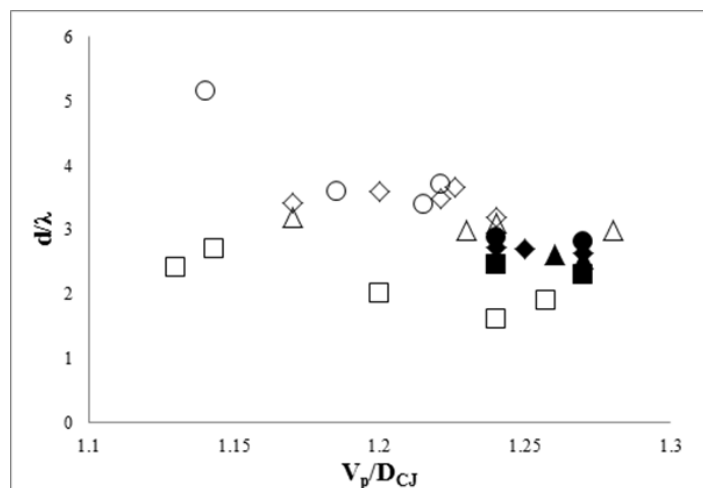


Рис. 2. Карта режимов наклонных детонационных волн
Темные символы – результаты расчетов, светлые символы – экспериментальные данные
(○●) – наклонная детонационная волна (НДВ)
(◇◆) – тип «Соломенная шляпа» со стабилизированной НДВ
(△▲) – тип «Соломенная шляпа» с отходящей НДВ
(□■) – ударно-инициированное горение

В П. 1.3 представлены результаты оценки энергии инициирования детонации быстролетающим телом в водород-кислородной смеси по методологии, предложенной А.А. Васильевым². Показано соответствие полученных в расчетах режимов с теоретически предсказанными (рис. 3).

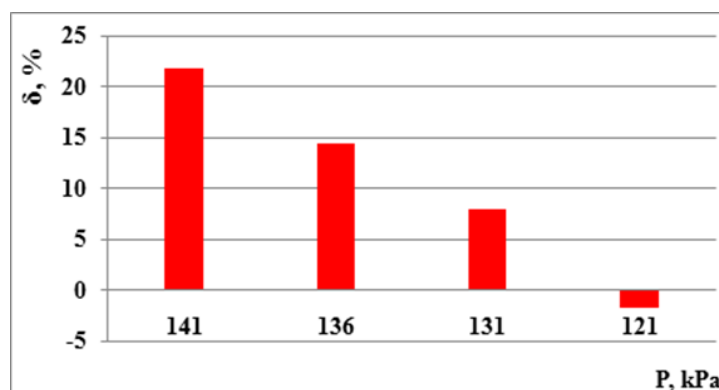


Рис. 3. Отклонение подводимой энергии от критической для $d = 3,18$ мм и $P_{cm} = 121$ –141 кПа

В П. 1.4 представлены результаты оценки энергии инициирования детонации быстролетающим телом в водородо-воздушной смеси (рис. 4). На основании проведенной оценки сделан вывод о необходимом начальном давлении и диаметре тела для инициирования того или иного режима горения и детонации. Представлены результаты расчетов, подтверждающие взаимосвязь между значениями подводимой энергии и режимами течения, полученными численно (рис. 5).

²Vasil'ev A.A. Detonation combustion of gas mixtures using a hypervelocity projectile // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1997. Vol. 33. P. 583–597.

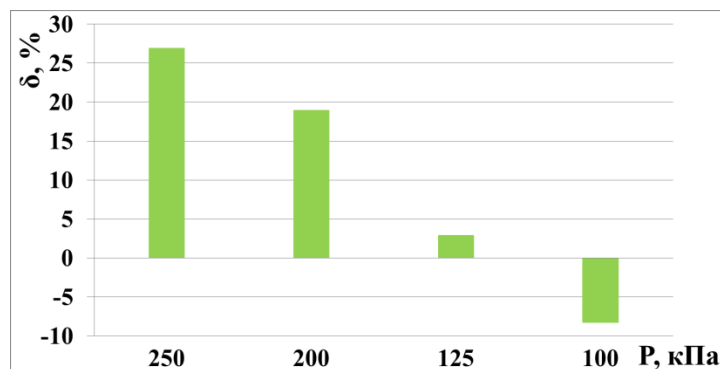


Рис. 4. Отклонение подводимой энергии от критической для водородо-воздушной смеси при $d = 25 \text{ мм}$ и $P_{cm} = 100 \div 250 \text{ кПа}$

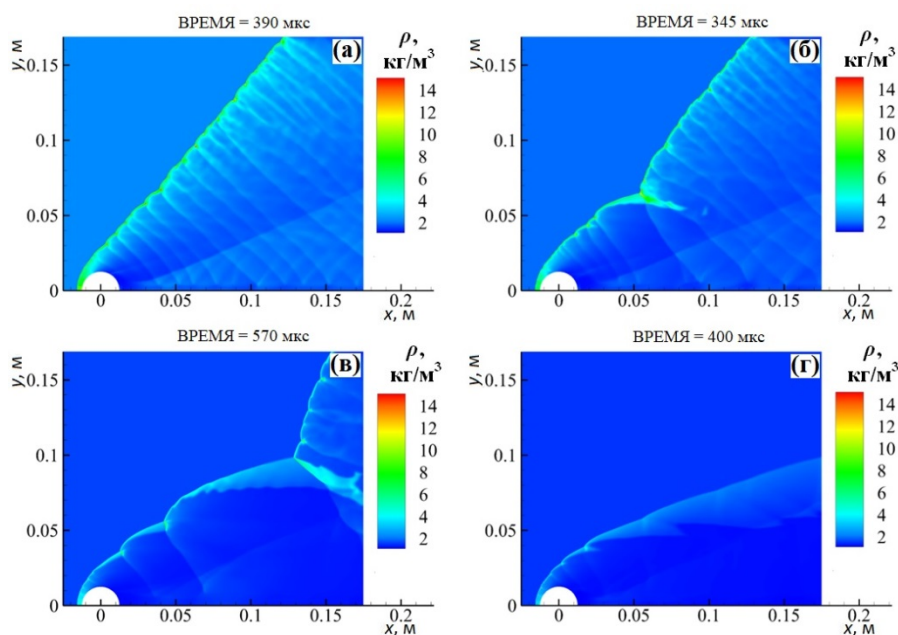


Рис. 5. Поля плотности для водородо-воздушной смеси
 (а) – НДВ при $P_{cm} = 250 \text{ кПа}$
 (б) – режим «соломенная шляпа» со стабилизированной НДВ при $P_{cm} = 200 \text{ кПа}$
 (в) – отходящая НДВ при $P_{cm} = 125 \text{ кПа}$
 (г) – ударно-инициированное горение при $P_{cm} = 100 \text{ кПа}$

Во **второй главе** представлены результаты численного моделирования взаимодействия детонационной волны, распространяющейся по водородо-воздушной смеси, с жесткой проницаемой преградой. Преграда представляет собой набор сплошных пластин, разбивающий исходный канал на несколько малых каналов, или набор конечноразмерных пластин, регулярно установленных по длине и ширине канала.

В П. 2.1 представлена постановка задачи, описаны начальные и граничные условия. Приведены результаты тестирования расчетной сетки, обоснован выбор размеров сеточного элемента и параметров динамической адаптации для дальнейших расчетов.

В П. 2.2 представлены результаты исследования влияния граничных условий на стенках канала на режим распространения детонации (рис. б).

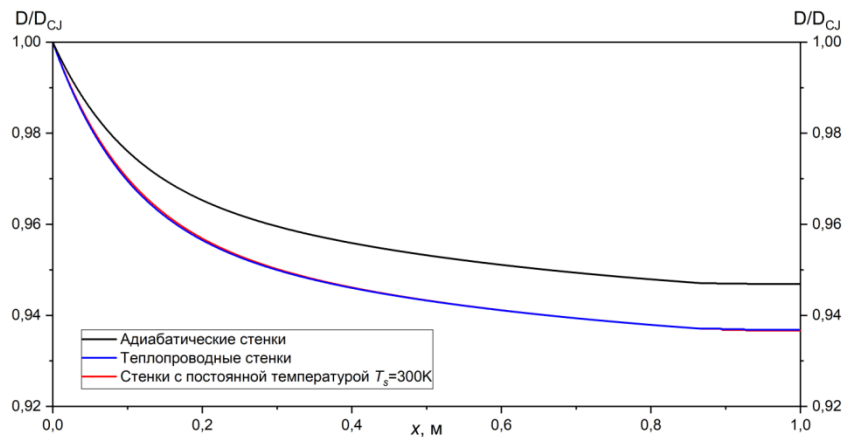


Рис. 6. Сравнение скоростей распространения ДВ для различных граничных условий на стенках каналов

Показано, что для условий постоянной температуры на стенках и теплопроводных стенок (для которых решалась сопряженная задача теплопроводности) скорость распространения детонации практически не отличаются. Использование стенок с отсутствием теплового потока (адиабатические стенки) приводит к завышенным значениям скорости распространения детонации. Дано объяснения сходства и различий в режимах течения. Обоснован выбор граничных условий на стенках для дальнейших расчетов.

В П. 2.3 приведены результаты расчета задачи о взаимодействии ячеистой детонации с жесткой проницаемой преградой, представляющей собой набор сплошных пластин, разбивающий исходный канал на несколько малых каналов. Исследования проведены для ширины малых каналов в диапазоне от 3,75 мм до 25 мм. Построены траектории движения тройных точек, выявлены режимы распространения детонации в ячеистом режиме при ширине малых каналов большей, чем поперечный размер детонационной ячейки ($\lambda = 12,5$ мм) и с изменением ячеистой структуры детонационной волны при ширине малых каналов меньшей, чем поперечный размер детонационной ячейки (рис. 7), что коррелирует с известными экспериментальными данными.

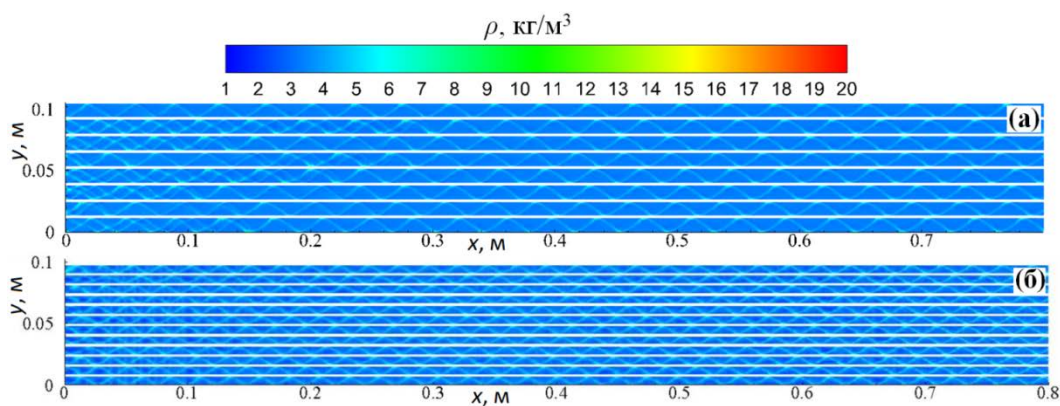


Рис. 7. Поля максимумов плотности для сплошных пластин (а) — $l_l = 0,9\lambda$, (б) — $l_l = 0,5\lambda$

Построены зависимости скорости распространения детонации по длине канала для различной ширины малых каналов (рис. 8). Показано, что изменение ширины малых каналов в рассматриваемом диапазоне приводит к реализации режимов распространения детонации с постоянной скоростью, меньшей, чем скорость распространения детонации Чепмена–Жуге. Уменьшение ширины малых каналов слабо влияет на результирующую скорость.

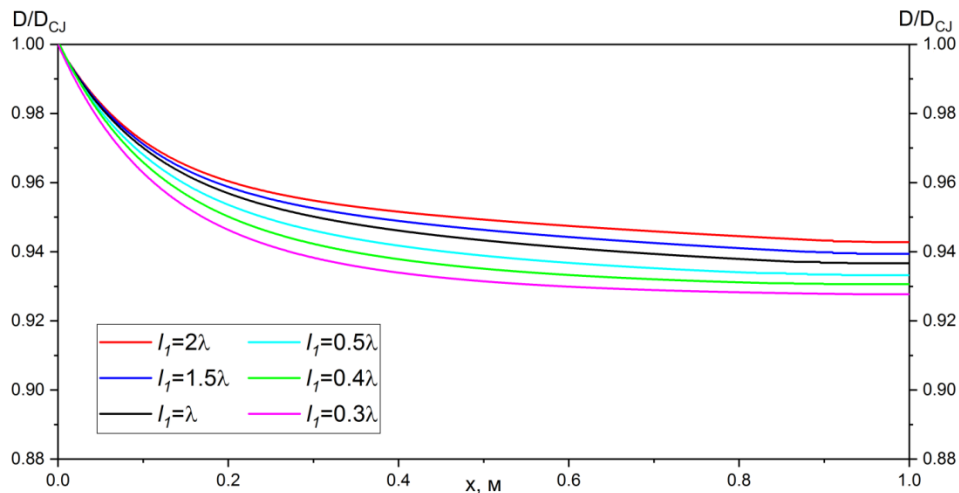


Рис. 8. Сравнение скоростей распространения ДВ для различной ширины малых каналов

В П. 2.4 представлены результаты численного моделирования взаимодействия детонационной волны с жесткой проницаемой преградой, представляющей собой набор конечноразмерных пластин, регулярно установленных по длине и ширине канала. Расчеты проводились для пластин фиксированной толщины. Изменялся зазор между пластинами по вертикали, горизонтальное расстояние между пластинами и их длина. Показано, что такая постановка задачи приводит к вырождению детонационной ячейки смеси. Уменьшение расстояния между пластинами в совокупности с уменьшением их длины приводит к более раннему вырождению детонационной ячейки. Построены зависимости скорости распространения детонации для различных геометрических параметров пластин (рис. 9, 10). Показано, что увеличение удельного объема пластин и увеличение количества рядов пластин приводит к уменьшению скорости распространения детонации. Уменьшение зазора между пластинами до размера меньше детонационной ячейки смеси усиливает этот эффект. Получены режимы распространения устойчивой детонации, режимы с расщеплением фронта детонационной волны и режим распространения, схожий с галопирующей детонацией, а также режим срыва детонации. Оценено влияние удельного объема пластин и их количества в канале на дефицит скорости распространения детонации.

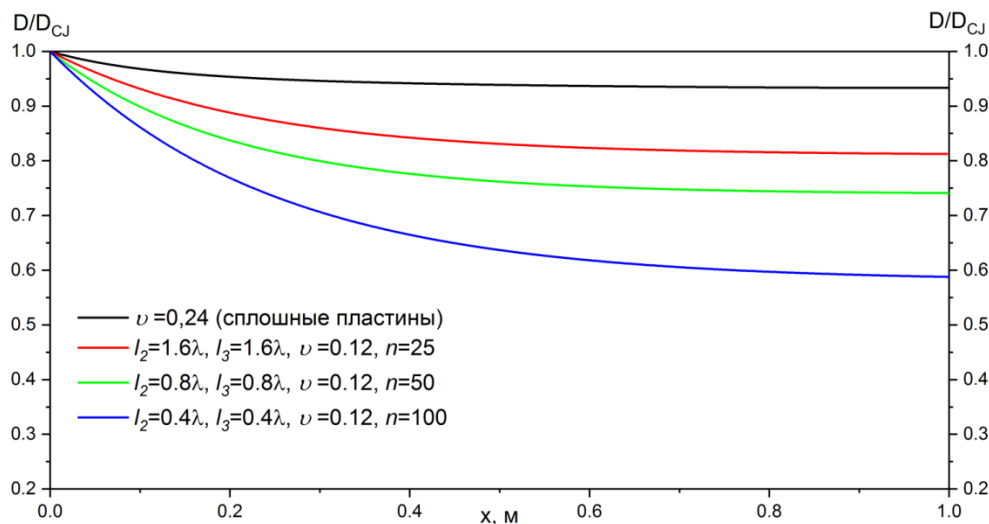


Рис. 9. Сравнение скоростей распространения ДВ для различных конфигураций при $l_1 = 0,5\lambda$

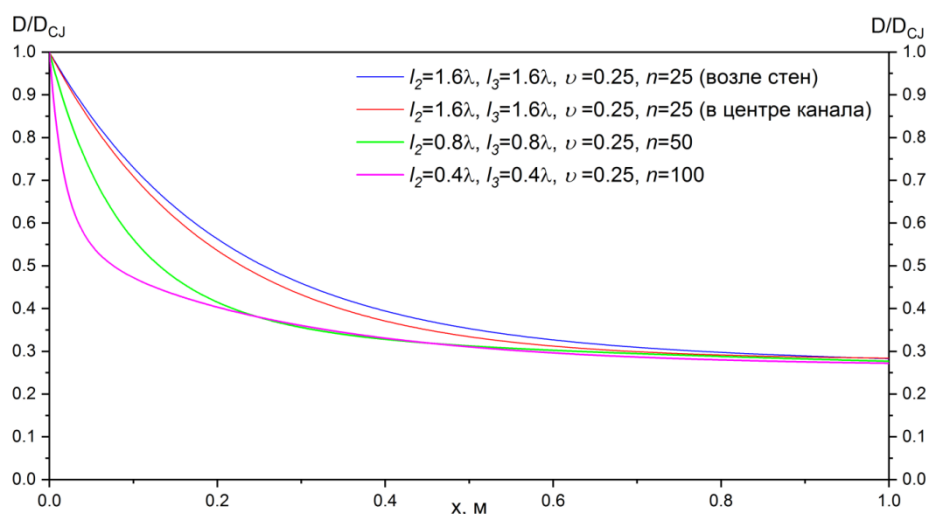


Рис. 10. Сравнение скоростей распространения ДВ для различных конфигураций при $l_1 = 0,15\lambda$

В **третьей главе** представлены результаты численного моделирования взаимодействия детонационной волны, распространяющейся по водород-воздушной смеси, с жесткой проницаемой преградой, представляющей собой набор круговых препятствий, регулярно установленных в расчетной области в шахматном порядке.

В П. 3.1 представлена постановка задачи, описаны начальные и граничные условия. Приведены результаты исследования сходимости решения по расчетной сетке, обоснован выбор размеров сеточного элемента и параметров динамической адаптации для дальнейших расчетов.

В П. 3.2 приведены результаты исследования влияния количества рядов препятствий при фиксированных геометрических параметрах. Обоснован критерий остановки расчета. Показано, что для реализации режима срыва детонации без дальнейшего ре-инициирования достаточно 15 рядов круговых препятствий диаметром $0,8\lambda$ и расстоянием между препятствиями $0,8\lambda$ (рис. 11, а). Размер детонационной ячейки $\lambda = 12,5$ мм. Показано, что математическая модель и кинетическая схема адекватно воспроизводят

изменение кинетики горения водорода в воздухе вблизи третьего предела самовоспламенения (рис. 11, б).

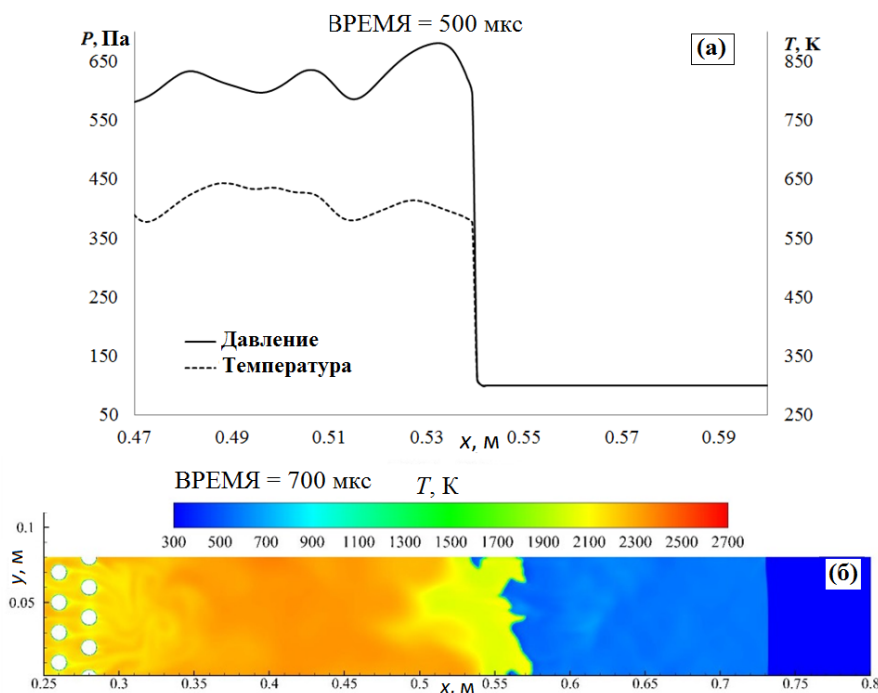


Рис. 11. Результаты расчета для $L = 23,2\lambda$ (15 рядов), $d = h = l = 0,8\lambda$
 (а) – давление и температура за фронтом ударной волны, (б) - поле температуры при выходе ударной волны из зоны препятствий

В П. 3.3 представлены результаты исследования влияния масштабных эффектов на ослабление детонации. Показано, что пропорциональное увеличение расчетной области и геометрических параметров преграды в два раза приводит к реализации режима распространения детонации без срыва.

В П. 3.4 исследовано влияние расстояния между объектами преграды, отнесенного к размеру детонационной ячейки смеси (l/λ и h/λ), на степень ослабления детонации. Построены зависимости скорости распространения детонации. Показано, что уменьшение горизонтального расстояния между препятствиями (l/λ), приводит к увеличению удельного объема препятствий и увеличения количества рядов препятствий на единицу длины, что влияет на сокращение критической величины длины преграды и способствует ослаблению детонации. Выявлено, что уменьшение вертикального расстояния между препятствиями (h/λ) приводит к более интенсивному ослаблению детонации. Исследовано влияние диаметра круговых препятствий, отнесенного к размеру детонационной ячейки смеси (d/λ), на ослабление детонации. Построены карты режимов срыва и распространения детонации (рис. 12, 13). Представлен анализ полученных результатов.

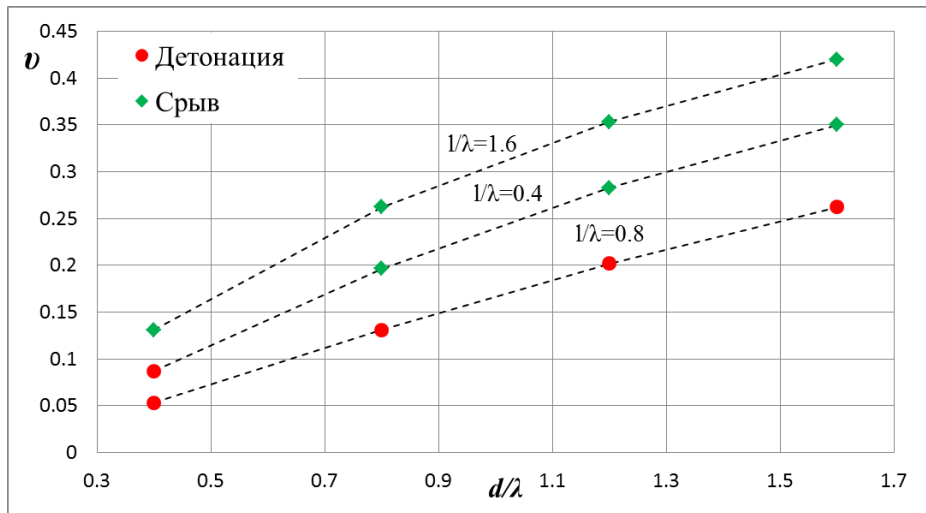


Рис. 12. Влияние удельного объема препятствий в зависимости от диаметра цилиндров d/λ на срыв детонации для различных l/λ

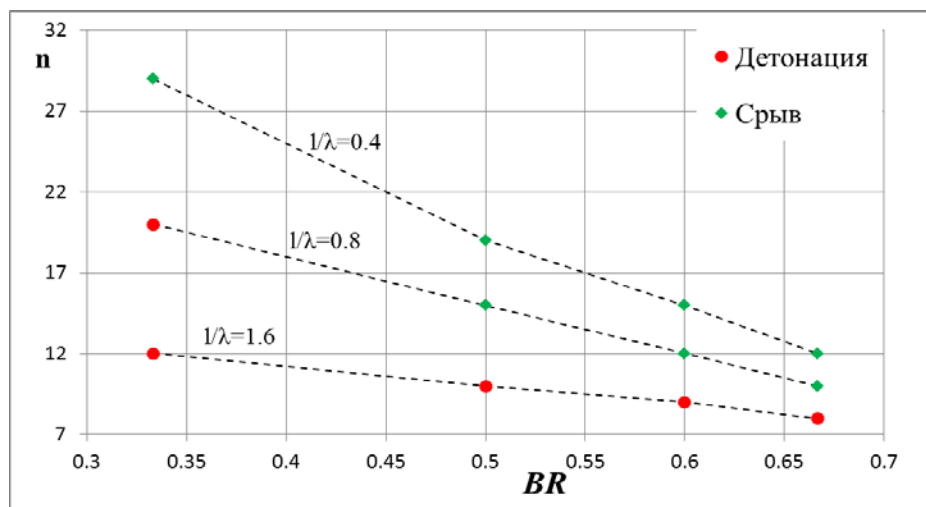


Рис. 13. Влияние площади суммарной поверхности отражения на срыв детонации для различных l/λ

В **заклучении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

1. Показано, что используемая математическая модель с приведенным механизмом химических реакций горения водорода позволяет достаточно точно воспроизводить сложные детонационные режимы течений, наблюдаемые в экспериментах, и адекватно воспроизводит изменение химической кинетики горения водорода вблизи третьего предела самовоспламенения.
2. Получена корреляция расчетных данных с теоретической моделью по оценке энергии инициирования детонации. Показано, что, несмотря на трехмерную природу детонационной ячейки, двумерное моделирование позволяет адекватно воспроизводить особенности детонационных течений, о чем свидетельствует корреляция режимов наклонных детонационных волн, получаемых в расчетах, с теоретической моделью и экспериментальными данными.

3. Показано, что потери тепла в потоке за детонационной волной при постоянной температуре стенок и для теплопроводных стенок сравнимы, а максимальный тепловой поток наблюдается вблизи фронта детонационной волны. Характерное время взаимодействия детонационной волны с препятствиями значительно меньше времени нагрева стенок, что позволяет проводить более экономичный расчет с изотермическими стенками, а использование адиабатического условия на стенках приводит к завышению скорости ДВ.
4. Получены зависимости скорости распространения детонации для преград с различными геометрическими параметрами. Подтверждены и конкретизированы закономерности, наблюдаемые в экспериментальных и численных исследованиях из известных литературных данных. Оценен вклад рассматриваемых геометрических параметров преграды на степень ослабления детонации:
 - уменьшение вертикального расстояния между препятствиями оказывает более эффективное действие на ослабление детонации, чем уменьшение горизонтального расстояния;
 - количество рядов препятствий оказывает более эффективное влияние на ослабление детонации по сравнению с удельным объемом препятствий из-за увеличения потерь энергии ДВ при переотражениях;
 - горизонтальное расстояние между объектами преграды и их диаметр не являются самостоятельными параметрами, влияющими на интенсивность распространения детонации. Их изменение при фиксированной длине преграды приводит к изменению удельного объема препятствий, изменению количества рядов преграды и коэффициента блокировки канала, что уже в свою очередь оказывает влияние на ослабление детонации.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК при МОиН РФ:

1. Бедарев И.А., **Темербеков В.М.**, Федоров А.В. Моделирование режимов наклонных детонационных волн, возникающих при инициировании детонации снарядом малого диаметра // ТиА. 2019. Т. 26. № 1. С. 63–73.
2. Бедарев И.А., **Темербеков В.М.** Двумерное моделирование ослабления детонационной волны при ее прохождении через область с круговыми препятствиями // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 14. С. 8–10.
3. Бедарев И.А., Сыроватень А.А., **Темербеков В.М.** Численное моделирование формирования наклонной детонации быстролетящим телом в водород-воздушной смеси // ФГВ. DOI: 10.15372/FGV2022.9237
4. Bedarev I., **Temerbekov V.** Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high-velocity projectile // Thermal Science. 2021. Vol. 25. No. 5. P. 3889–3897.
5. Tropin D.A., **Temerbekov V.M.** Numerical simulation of detonation wave propagation through a rigid permeable barrier // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. No. 87. P. 37106–37124.

6. Bedarev I. A., **Temerbekov V. M.** Modeling of attenuation and suppression of cellular detonation in the hydrogen-air mixture by circular obstacles // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. No. 90. P. 38455–38467.

Статьи в сборниках конференций индексируемых в Scopus и WoS:

7. Bedarev I.A., **Temerbekov V.M.**, Fedorov A.V. Calculation of detonation initiation in a hydrogen/oxygen/argon mixture in by a small-diameter spherical projectile // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1939. P. 020003.
8. **Temerbekov V.M.** Calculation of the shock waves interaction with various diameter spheres in hydrogen-air mixture // IOP Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1214. P. 012022.
9. Bedarev I.A., **Temerbekov V.M.** Estimation of the initiation energy of detonation excited by a fast moving body // IOP Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1404. P. 012054.

Тезисы конференций в РИНЦ:

10. Бедарев И.А., **Темербеков В.М.**, Федоров А.В. Расчет инициирования детонации в водородо-воздушной смеси сферическим снарядом малого диаметра. // Динамика многофазных сред: Тез. XV Всеросс. сем. с участием иностр. ученых / Под ред. А.В. Федорова, В.М. Фомина. Новосибирск, 2017. С. 11–12.
11. **Темербеков В.М.** Моделирование инициирования детонации в смеси водород/кислород/аргон сферическим снарядом // Наука. Технологии. Инновации: в 10 ч. Новосибирск, 2017. Ч. 10. С. 30–32.
12. **Темербеков В.М.** Расчет инициирования детонации сферическим снарядом в водород-кислородной смеси на основе пакета ANSYS fluent // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тез. докл. XII Всеросс. конф. молодых ученых / Под ред. В.В. Козлова. Новосибирск, 2018. С. 138–139.
13. **Темербеков В.М.** Моделирование воспламенения водородо-воздушной смеси через взаимодействие ударной волны со сферами // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тез. докл. XIII Всеросс. конф. молодых ученых / Под ред. В.В. Козлова. Новосибирск, 2019. С. 154–155.
14. Бедарев И.А., **Темербеков В.М.** Оценка энергии инициирования детонации, возбуждаемой быстролетящим телом // Динамика многофазных сред: Тез. XVI Всеросс. сем. с участием иностр. ученых. Новосибирск, 2019. С. 8–9.
15. **Темербеков В.М.** Расчет взаимодействия ударных волн со сферами различного диаметра в водородо-воздушной смеси // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2018: Материалы VIII Всеросс. молодеж. науч. конф. / Под ред. М.Ю. Орлова. Томск, 2019. С. 109–111.
16. **Темербеков В.М.** Расчет энергии инициирования газовой детонации возбуждаемой сверхзвуковым снарядом // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тез. докл. XIV Всеросс. школы-конф. молодых ученых. Новосибирск: Параллель, 2020. С. 180–181.

17. Bedarev I.A., **Temerbekov V.M.** Calculation of a detonation wave interaction with a rigid permeable barrier in a hydrogen-air mixture // XX International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2020). Abstracts. Novosibirsk, 2020. С. 23.
18. **Темербеков В.М.** Численное моделирование прохождения детонационной волны через цилиндрическую решётку в водородо-воздушной смеси // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тез. докл. XV Всеросс. школы-конф. молодых ученых / Под ред. А.Н. Шиплюка. Новосибирск, 2021. С. 218–219.
19. **Темербеков В.М.** Расчет подавления газовой детонации многорядной цилиндрической решеткой в водородо-воздушной смеси // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020: Материалы X Всеросс науч. конф. с междунар. участием / Под ред. М.Ю. Орлова. Томск, 2021. С. 37–40.
20. Бедарев И.А., **Темербеков В.М.** Численное исследование взаимодействия детонационной волны с многорядной решеткой в водородо-воздушной смеси // Динамика многофазных сред: Тез. XVII Всеросс. сем. с междунар. участием. Новосибирск, 2021. С. 71.
21. **Темербеков В.М.** Численное исследование ослабления детонационной волны в канале с круговыми препятствиями в водородо-воздушной смеси // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тез. докл. XVI Всеросс. школы-конф. молодых ученых. Новосибирск, 2022. С. 130–131.
22. **Temerbekov V.M.**, Tropin D.A. Numerical study of the attenuation of gas detonation in a channel separated by walls // XXI International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2022). Abstracts. Novosibirsk, 2022. С. 188–189.
23. Bedarev I.A., **Temerbekov V.M.** Numerical study of oblique detonation formation by a fast-moving body in a hydrogen-air mixture // XXI International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2022). Abstracts. Novosibirsk, 2022. С. 21.
24. **Темербеков В.М.**, Тропин Д.А. Численное моделирование взаимодействия газовой детонации с твердой проницаемой преградой // Неравновесные процессы: плазма, горение, атмосфера. М., 2022. С. 148–150.

Ответственный за выпуск В.М. Темербеков

Подписано в печать 20.09.2023
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1,1.
Тираж 100 экз. Заказ № 195

Издательско-полиграфический центр НГУ
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.