

О Т З Ы В официального оппонента
на диссертацию ТЕМЕРБЕКОВА Валентина Макаровича
«Моделирование процессов формирования и ослабления детонационных волн посредством введения в поток твердых объектов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
1.1.9. - Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Темербекова В.М. посвящена численному моделированию нестационарных процессов распространения многофронтной детонации в каналах с препятствиями. Несмотря на многолетние обширные исследования вопросов горения и детонации, проведенные во многих лабораториях различных стран, остаются малоисследованными многие аспекты распространения этих волн. Их достоверное моделирование особенно важно в связи с происходящими до сих пор катастрофами в различных странах при обращении с горючими газами, результатом которых являются большие материальные потери и человеческие жертвы. Актуальность выбранной Соискателем тематики подтверждается и тем, что проблемы газодинамических течений с химическими реакциями входят в Государственную Программу научных исследований РФ на 2021-2030 годы. Данная тематика имеет прямое и важное отношение к проблеме взрыво- и пожаробезопасности при работе с газообразными топливами, такими как метан (шахты, транспорт, энергетика,...), водород («зеленая энергетика», «водородная» безопасность АЭС, топливные элементы,...) и т.д. Основная задача взрывобезопасности – предотвращение аварийных ситуаций или их максимальное ослабление в случае возникновения. Одним из методов ослабления ДВ является создание на пути ДВ преграды из твердых тел различной формы или создание облака инертных частиц, которые забирают на свое ускорение и нагрев часть энергии химических реакций, что и приводит к занижению скорости распространения ДВ по сравнению с чисто газовой средой. Важным параметром является время взаимодействия ДВ с инертной фазой. Увеличение объемной доли частиц и длины облака способно привести к снижению скорости ДВ вплоть до гашения детонации. При этом влияние объемной концентрации гораздо значительнее, чем влияние диаметра частиц.

Цель исследования – анализ влияния стационарно закрепленных твердых тел различной формы на возбуждение, распространение и ослабление детонации в газовых средах.

Задачами квалификационной работы Соискателя являются:

1. Тестирование используемого кинетического алгоритма по экспериментальным данным об энергии инициирования детонации, необходимое для дальнейших расчетов задач о взаимодействии ДВ с различными объектами.
2. Численное моделирование взаимодействия многоячейстой ДВ с проницаемой преградой, состоящей из наборов жестко закрепленных твердых объектов различной формы, равномерно распределенных в расчетной области.

3. Получение и анализ зависимостей интенсивности ДВ от геометрических параметров различных преград с точки зрения эффективности ослабления ДВ.

На защиту выносятся:

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.

Научная новизна – выбор преград и расчетные результаты являются новыми.

Теоретическая и практическая ценность работы заключается в адаптации физико-математической модели на основе пакета ANSYS Fluent для задач инициирования, ослабления и реинициирования газовой детонации (на примере упрощенных кинетических механизмов химических реакций горения водорода в воздухе). Для практики важна оценка степени влияния различных геометрических параметров преграды на ослабление детонационной волны.

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием расчетных результатов известным экспериментальным данным и сходимостью результатов на различных расчетных сетках.

Апробация результатов исследования. Полученные в настоящей работе результаты опубликованы и представлялись на многочисленных конференциях.

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.

Во введении дан обзор и проведен анализ литературы, посвященной вопросам инициирования, распространения, ослабления и реинициирования газовой детонации при взаимодействии с препятствиями. Обоснована актуальность исследуемой темы, сформулирована цель работы и дано краткое изложение полученных результатов.

Первая глава посвящена описанию и тестированию математической модели и кинетической схемы химических реакций на примере экспериментальных данных о формировании режимов наклонной детонации быстролетящим телом. 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. Получено количественное согласование расчетных и экспериментальных данных по энергии инициирования детонации быстролетящим телом в водородно-кислородной и водородно-воздушной смесях.

Во **второй главе** представлены результаты численного моделирования взаимодействия ДВ, распространяющейся по водородно-воздушной смеси, с проницаемой преградой, представляющей собой набор сплошных пластин, разбивающий исходный канал на несколько малых соосных каналов. Проанализирована также схема препятствий в виде набора конечноразмерных пластин, регулярно установленных по длине и ширине канала. Выявлены особенности распространения детонации в ячеистом режиме при ширине малых каналов большей, чем поперечный размер детонационной ячейки ($\lambda = 12,5$ мм), а также режимы с изменением ячеистой структуры ДВ при ширине малых каналов меньшей, чем поперечный размер детонационной ячейки. Получены режимы распространения устойчивой детонации, режимы с расщеплением фронта детонационной волны, режим распространения, схожий с галопирующей детонацией, а также режим срыва детонации.

Результаты исследования влияния граничных условий на стенках канала на режим распространения детонации показали, что для условий постоянной температуры на стенках базового канала и теплопроводных стенках препятствий (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.

В **третьей главе** представлены результаты численного моделирования взаимодействия детонационной волны, распространяющейся по водородно-воздушной смеси, с жесткой проницаемой преградой, представляющей собой набор круговых препятствий, регулярно установленных в расчетной области в шахматном порядке. Приведены данные о влиянии диаметра круговых препятствий и расстояния между ними в объектах преграды (отнесенного к размеру детонационной ячейки смеси (l/λ и h/λ)), на степень ослабления скорости распространения детонации..

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы, среди которых особо можно выделить следующие:
- Показано, что используемая математическая модель с приведенным механизмом химических реакций горения водорода позволяет достаточно точно воспроизводить сложные наблюдаемые в экспериментах детонационные режимы течений, (на примере быстролетящего тела и преград различных размеров и форм друг относительно друга).

- Показано, что двумерное моделирование позволяет адекватно воспроизводить основные особенности детонационных течений, несмотря на трехмерную природу детонационной ячейки.

- Показано, что потери тепла в потоке за детонационной волной в случае постоянной температуры стенок и в случае теплопроводных стенок сравнимы, что позволяет проводить более экономичный расчет с изотермическими стенками.

- Представлены конкретные данные о зависимости скорости распространения детонации для преград с различными геометрическими параметрами. Оценен количественно вклад рассматриваемых геометрических параметров преграды на степень ослабления детонации.

- Показано, что в случае круговых элементов препятствий, расположенных в шахматном порядке, наряду с заметным ослаблением детонационной волны возможно ее повторное усиление за счет столкновения волн пламени и волн давления, которые оказывают существенное влияние на ускорение пламени и переход дефлаграции в детонацию.

Автореферат правильно отражает основные положения диссертационной работы. Хочется особо отметить аккуратное обращение Соискателя к выбору расчетных сеток для каждого варианта расчетов и тщательный анализ динамики поведения ДВ в многоэлементных преградах.

Замечания к оформлению.

1. Соискатель под термином «срыв детонации» понимает разделение фронта ДВ на ударную волну и фронт горения. Использование этого критерия для «срыва детонации» нельзя признать удачным, поскольку под это определение попадают не только стационарные двухфронтные ДВ в идеализированных моделях детонации, но и все нестационарные ДВ с ненулевой зоной индукции в рамках плоской геометрии. Более того, характерным признаком ДВ во всех идеализированных моделях детонации является головная ударная волна (УВ), которая исчезнет только тогда, когда скорость ослабевающей ДВ опустится до акустической скорости. Ничего подобного в расчетах не наблюдается. В газодинамике есть более удачный термин для перехода от стационарного состояния к нестационарному – «распад».

2. В диссертации (стр.22) и автореферате есть неудачная фраза «В случае адиабатических граничных условий на стенках скорость детонационной волны заметно выше из-за отсутствия теплопотерь». По сравнению с какой скоростью?

3. На стр.37 диссертации в тексте и на рис.1.1 некорректно приведено значение скорости $V=1.24\pm 0.03D_{CJ}$ – без скобок, правильная запись $V=(1.24\pm 0.03)D_{CJ}$; на стр.52 диссертации говорится о стехиометрической смеси водорода с воздухом, но на поясняющих этот текст рис.2.1 и 2.2 указана обедненная смесь $H_2+O_2+3.8N_2$.

4. Неудачно представлены расчетные поля параметров в главе 2 и автореферате – слишком мелко, особенно при большом количестве элементов преграды.

5. В отечественной литературе размер детонационной ячейки обозначается буквой a , а буква λ используется в зарубежных статьях. Соискателю следовало учесть этот факт, защищаясь в России, и не использовать λ в своей работе.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Результаты исследований Соискателя опубликованы в различных журналах, в том числе из списков Web of Sciences, Scopus, РИНЦ и достаточно

полно отражают основные достигнутые результаты. Материалы диссертации были представлены на отечественных и международных научных конференциях.

Проведенные в диссертационной работе исследования были поддержаны двумя проектами РФФИ и двумя проектами РНФ.

Диссертационная работа ТЕМЕРБЕКОВА Валентина Макаровича «Моделирование процессов формирования и ослабления детонационных волн посредством введения в поток твердых объектов» является квалификационной научной работой, соответствует требованиям действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней. Автор работы ТЕМЕРБЕКОВ Валентин Макарович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. - Механика жидкости, газа и плазмы.

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 15) доктор физико-математических наук (старый шифр 01.04.17 – «Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва»; новая классификация – 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»), профессор (gasdet@hydro.nsc.ru, 8 383 333 2027, +7 913 936 7572)

Васильев Анатолий Александрович

« 15 » _ноября_2023 г.

Я, Васильев Анатолий Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации ТЕМЕРБЕКОВА Валентина Макаровича, и их дальнейшую обработку.

Подпись А.А. Васильева заверяю

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук кандидат физико-математических наук

ПОДПИСЬ,

ХЕ Александр Канчерович

15.11.2023 г.

Председателю
диссертационного совета
24.1.125.01 (Д 003035.02)
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, **Васильев Анатолий Александрович**, даю свое согласие выступить в качестве оппонента по диссертации Темербекова Валентина Макаровича на тему: Моделирование процессов формирования и ослабления детонационных волн посредством введения в поток твердых объектов на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	Д.ф.-м.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.04.17 - Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества
Ученое звание	профессор
Академическое звание	
Тел:	8-913-936-'
E-mail:	gasdet@hydro.nsc.ru
Должность	Главный научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатория газовой детонации
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, Новосибирская область, пр. Лаврентьева, 15
Web-сайт организации.	http://www.hydro.nsc.ru
Телефон организации.	8(383)333-16-12
E-mail организации.	igil@hydro.nsc.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею свыше 200 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Васильев А.А.	Резонанс колебаний в продуктах реакции и в исходной смеси как

		причина перехода горения в детонацию // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 3. С. 71-79.
2	Моисеева К.М., Пинаев А.В., Васильев А.А., Крайнов А.Ю., Пинаев П.А.	Исследование горения углеметановоздушной взвеси в длинном закрытом канале // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 5. С. 54-63.
3	Васильев А.А., Васильев В.А.	Многотопливные системы: метан-водород-водяной пар // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 1. С. 17-26.
4	Прууэл Э.Р., Васильев А.А.	Уравнение состояния продуктов газовой детонации. Учет формирования конденсированной фазы углерода // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 5. С. 74-85.
5	Васильев А.А., Васильев В.А.	Многотопливные горючие смеси: синтез-газ (CO-H ₂) // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94. № 3. С. 786-795.
6	Vasil'ev A.A.	About initiation and chemical energy release in waves of multifront detonation // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2021. Vol. 9. No 2. p. 15-28.
7	Utkin P.S., Lopato A.I., Vasil'ev A.A.	Mechanisms of detonation initiation in multi-focusing systems // Shock Waves. 2020. Vol. 30. p.741-753.
8	Васильев А.А.	Оценка условий гашения волн горения и детонации // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 5. С. 39-44.
9	Васильев А.А., Васильев В.А.	Углеводородные топлива: газодинамические и энергетические параметры детонации // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 6. С. 40-55.
10	Васильев А.А.	Можно ли из теории детонации определить параметры нормального горения? // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 4. С. 3-14.
11	Гоффарт Т.В., Васильев А.А.	Практические задачи обеспечения безопасности в угольных шахтах // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 4. С. 138-145.
12	Батраев И.С., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А., Рыбин Д.К.	Исследование газовой детонации переобогащенных смесей углеводородов с кислородом // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 2. С. 89-97.
13	Шайтанов А.Г., Суровикин Ю.В., Резанов И.В., Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Васильев А.А., Лихолобов В.А.	Получение и исследование нанодисперсного углерода при сжигании ацетилена в проточной детонационной трубе // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91. № 12. С. 1751-1759.
14	Пинаев А.В., Пинаев П.А., Васильев А.А., Прууэл Э.Р., Еременко А.А., Шапошник Ю.Н.	Исследование взрывчатости аэровзвесей сульфидных руд при динамическом нагреве // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 2. С. 45-51.
15	Васильев А.А., Титов В.М.	Крупномасштабные эксперименты по инициированию горючих систем быстролетящим телом // Боеприпасы. 2018. № 2. С. 171-176.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело Соискателя и их дальнейшую обработку.

Дата 05.07.2023

Подпись

Подпись А.А. Васильева заверено.

Учёмный секретарь ИГиЛ СО РАН

А.К.Хе

05.07.2023 г.