

УТВЕРЖДАЮ

Проректор – начальник Управления научной политики
и инновационного университета
имени М.В. Ломоносова
и.ф.м.н. профессор

_____ А.А. Федянин

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Темербекова Валентина Макаровича «Моделирование процессов формирования и ослабления детонационных волн посредством введения в поток твердых объектов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «механика жидкости, газа и плазмы»

В диссертации В.М. Темербекова на основе численного моделирования выполнено теоретическое исследование влияния проницаемых преград в канале в виде набора параллельных стенок канала пластин различной длины или нескольких слоев круговых цилиндров на распространение, ослабление, подавление, срыв и реиницирование детонации в водородо-воздушных смесях. Преграды устроены таким образом, что они целиком перегораживают сечение канала, при этом учитываются особенности теплообмена препятствий с окружающим газом. Используется общепринятая терминология: под ослаблением детонации понимается снижение скорости распространения детонационной волны, срыв детонации – это разделение фронта детонационной волны на ударную волну и фронт горения, подавление предполагает срыв и гашение волны горения.

Актуальность темы диссертации определяется перспективностью использования водородо-воздушных смесей в качестве высокоэффективных и экологичных источников энергии. Детонационные режимы горения могут быть использованы при создании компактных энергетических установок (за счет высокой скорости горения), а также при разработке двигателей для летательных аппаратов с непрерывной и пульсирующей детонацией. Однако, низкие пределы воспламенения и высокая диффузионная способность водорода обуславливают возрастание возможных взрывоопасных ситуаций при его эксплуатации. Данные обстоятельства определяют необходимость проведения исследований, направленных на поиск способов управления газовой детонацией в водородо-воздушных смесях для ее использования в технических устройствах различного назначения, а также ее срыва и полного подавления для обеспечения взрывобезопасности.

Критический анализ содержания диссертации удобно провести по разделам, отмечая попутно основные достоинства работы и некоторые недостатки.

1. Обзор литературы, выполненный во введении, хорошо структурирован: обсуждаются общие вопросы инициирования и распространения детонации в горючих газовых смесях [1 – 8]; инициирование наклонных детонационных волн телом,двигающимся в горючей газовой смеси с высокой скоростью [9 – 22]; способы срыва и подавления детонации [23 – 63]; переход горения в детонацию [64 – 78]; распространение ячеистой детонации в узких каналах [79 – 88]. Все работы в обзоре имеют прямое отношение к теме диссертации, обзор выполнен тщательно и читается с интересом. Каждому источнику, как правило, посвящен отдельный абзац текста, в котором подробно объясняется, что

именно сделано в работе. В целом, видно, что автор диссертации добросовестно разобрался в работах предшественников и хорошо представляет состояние проблемы. Именно поэтому бросается в глаза формальное отношение к исторически первым работам по инициированию горения и детонации в газовых смесях быстролетящим телом [9 – 15]. Работы Я.Б. Зельдовича, М.П. Самозванцева, Г.Г. Черного, В.А. Левина, В.В. Маркова. и других ученых Советской школы газовой динамики и физики 1960 – 1970-х годов заслуживают более внимательного отношения! Например, в статье «Черный Г.Г., Чернявский С.Ю. Движение затупленных тел с большой скоростью в смеси водорода с кислородом. ДАН. 1973. 212(2): 316 – 319» описан эксперимент по инициированию горения и детонации затупленной «пулей» в водород-кислородной смеси, выполненный в НИИ механики МГУ (в том числе были зафиксированы пульсационные режимы), что очень близко к постановке главы 1.

2. Расчеты выполнены в плоской двумерной нестационарной постановке на основе пакета ANSYS Fluent, в рамках модели вязкого многокомпонентного газа с учетом теплопроводности и диффузии (использовались осредненные уравнения Навье-Стокса, дополненные SST модификацией $k - \omega$ модели турбулентности). Химические превращения описывались одной брутто-реакцией для водородо-воздушной смеси (компоненты – молекулы водорода, кислорода, азота, воды). Теплообмен с препятствиями учитывался по одной из трех моделей: адиабатической стенки, изотермической стенки, теплопроводной стенки. Несмотря на относительную простоту, кинетическая схема с одной брутто-реакцией улавливает формирование детонационных ячеек. Подбор констант в модели осуществлен по результатам экспериментов, что позволило достичь соответствия по скорости распространения детонации, задержке воспламенения и размерам ячейки.

3. Задача о расчете наклонной детонационной волны (НДВ) быстролетящим телом в водород-кислородной смеси, разбавленной аргоном, позиционируется автором лишь как тестовая для проверки (валидации) выбранной постановки задачи, модели химической кинетики и метода расчета. Понравились яркие качественные результаты, описанные в работе. В зависимости от давления в смеси, которое определяет размер детонационной ячейки, получены различные режимы инициирования горения и детонации: собственно НДВ; конфигурации типа «соломенная шляпа» со стабилизированной и пульсирующей НДВ; ударно-инициированное горение. Особый интерес представляет новый режим «соломенная шляпа» с пульсирующей НДВ, промежуточный между стабилизированной НДВ и ударно-инициированным горением. Для каждого из режимов приведены поля плотности и соответствующие теневые фотографии, полученные в экспериментах, которые наглядно демонстрируют корректность расчетов. Понравилась простая аналитическая оценка энергии инициирования НДВ при обтекании сферы в зависимости от начального давления, хорошо схватывающая физическую суть явления и дающая очень хорошее приближение. Результаты, полученные для водород-кислородной смеси, разбавленных аргоном, обобщены на случай водородо-воздушных смесей.

4. Выполнено численное моделирование распространения и ослабления детонации в водородо-воздушных смесях в плоском канале, разделенном на тонкие каналы набором регулярно расположенных пластин (полубесконечных или конечной длины в продольном направлении) и конечной толщины (в поперечном направлении). Задача ставилась так, что сформировавшаяся в свободном канале ячеистая детонация входит в область, занятую пластинами. Ширина канала в поперечном направлении составляла 8λ ($\lambda = 12.5$ мм поперечный размер детонационной ячейки для выбранных параметров среды), а расстояние между пластинами варьировалось от 0.15λ до 2λ (то есть рассматривались узкие каналы), толщина пластин – 2 мм. Визуализация ячеистой структуры

осуществляется обычным способом (по полям максимумов давления либо плотности за все время расчета). В качестве важного результата следует отметить возможность управления скоростью распространения фронта детонационной волны (в целом, как структуры). А именно, из-за наличия дефицита скорости (по сравнению с режимом Чепмена-Жуге) возмущения догоняют волну детонации. Поэтому для пластин полубесконечной длины за счет потерь, связанных с потерей тепла (для условий постоянной температуры или с учетом теплопроводности стенок), скорость распространения детонационной структуры уменьшается при уменьшении зазора между стенками. Для пластин конечного размера к эффекту теплопроводности добавляется взаимодействие ударных волн с торцами пластин. Проведено подробное параметрическое исследование для различных зазоров, размеров пластин и шага их расположения. В отдельных случаях (для узких каналов) удалось получить замедление детонационного фронта до $0.3D_J$. Также следует обратить внимание, что ни в одном из режимов не было отмечено срыва детонации. Эффект замедления скорости распространения фронта может быть использован для управления в широких пределах детонационным горением в технических устройствах.

5. Выполнено численное моделирование распространения, ослабления, подавления, срыва и реиницирования детонации в водородо-воздушных смесях в плоском канале с регулярной многорядной решеткой круглых цилиндров, расположенных в шахматном порядке. Диаметры цилиндров, расстояния между ними были порядка поперечного размера детонационной ячейки (0.8λ , 1.6λ). В зависимости от количества рядов и размеров препятствий получены различные режимы прохождения детонации сквозь препятствие: ослабления, полного подавления, срыва с последующим восстановлением. В качестве важного результата следует отметить возможность как восстановления, так и полного подавления детонации после ее срыва. Такое нетривиальное двойное поведение отражает физическую природу явления и борьбу двух противоположных эффектов воздействия регулярных препятствий в виде цилиндров на распространение детонации. С одной стороны, лидирующая ударная волна многократно отражается от препятствий, что способствует ее разделению с фронтом горения. С другой стороны, наличие препятствий, подобно «спирали Щелкина», способствует развитию турбулентности в потоке за ударной волной и ускорению фронта пламени, что может привести к реиницированию детонации. Расчеты отражают оба режима воздействия препятствий на распространение детонации, что еще раз свидетельствует о правильности выбранной модели и программной реализации.

Полученные автором результаты имеют высокую значимость в самых различных областях современной науки и техники.

1. Используемая методика численного моделирования, несмотря на относительную простоту описания химической кинетики одной брутто-реакцией, позволяет верно рассчитывать распространение ячеистой детонации в водородо-воздушной смеси, ее ослабление за счет потерь на диссипацию за фронтом, а также – такие сложные физические явления, как восстановление детонации за счет ускорения фронта пламени. Можно рекомендовать методику для использования в организациях фундаментальной и прикладной науки при моделировании детонации.

2. Полученные результаты по замедлению скорости распространения детонации в водородо-воздушных смесях в плоском канале, разделенном на тонкие каналы набором регулярно расположенных пластин (полубесконечных или конечной длины в продольном направлении) и конечной толщины (в поперечном направлении), могут быть использованы при разработке способов управления в широких пределах детонационным горением в технических устройствах.

3. Полученные результаты по срыву детонации в водородо-воздушных смесях и ее последующему восстановлению либо полному подавлению при взаимодействии с регулярной многорядной решеткой круглых цилиндров, расположенных в шахматном порядке, могут быть использованы при разработке способов ослабления и подавления детонации для обеспечения взрывобезопасности.

Подводя итоги, можно заключить, что в диссертации решена важная для развития механики жидкости, газа и плазмы задача – на основе численного моделирования определено влияние проницаемых преград в канале в виде набора параллельных стенок канала пластин различной длины или нескольких слоев круговых цилиндров на распространение, ослабление, подавление, срыв и реиницирование детонации в водородо-воздушных смесях.

Диссертация В.М. Темербекова соответствует критериям, установленным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016 г., 29 мая, 28 августа 2017 г., 1 октября 2018 г., 20 марта 2021 г., 11 сентября 2021 г., 26 сентября 2022 г., 26 января, 18 марта, 26 октября 2023 г.) для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Темербеков Валентин Макарович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв ведущей организации обсужден и одобрен на заседании подсекции НТС НИИ механики МГУ по физико-химической газовой динамике (протокол №6 от 17.11.2023)

И.о. директора НИИ механики МГУ
проф. РАН, д.ф.-м.н.

Георгиевский

Зав. лаб. НИИ механики МГУ
академик, д.ф.-м.н.

В.А. Левин

В.н.с. НИИ механики МГУ,
к.ф.-м.н.

Георгиевский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, МГУ им. М.В. Ломоносова, Московский университет, МГУ)

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; <https://www.msu.ru/>

Научно-исследовательский институт механики МГУ (НИИ механики МГУ)

119192, Москва, Мичуринский проспект, д.1,

<https://www.imec.msu.ru/>, common@imec.msu.ru, 7-495-9391708

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертации 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».

Полное наименование организации в соответствии с уставом:

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

Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, МГУ им. М.В. Ломоносова, Московский университет, МГУ

Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв: Научно-исследовательский институт механики МГУ (НИИ механики МГУ)

Почтовый индекс, адрес организации:

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ),
119192, Москва, Мичуринский проспект, д.1 (НИИ механики МГУ)

Веб-сайт:

<https://www.msu.ru/> (МГУ),

<https://www.imec.msu.ru/> (НИИ механики МГУ)

Телефон:

+7 (495) 939-1000 (МГУ),

+7 (495) 939-1708 (НИИ механики МГУ)

e-mail:

info@rector.msu.ru (МГУ),

common@imec.msu.ru (НИИ механики МГУ)

Список основных публикаций сотрудников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации.

1. Levin V. A., Zhuravskaya T. A. The methods of control of stabilized detonation location in a supersonic gas flow in a plane channel // Combustion Science and Technology. 2023, 195 (7): 1-13.
<https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1557641>

2. Георгиевский П. Ю., Левин В. А., Сутырин О. Г. Инициирование детонации при взаимодействии ударной волны с горючим газовым пузырем различной плотности // Физика горения и взрыва. 2022, 58(5): 72-78, <https://elibrary.ru/item.asp?id=49450532>
3. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Формирование многоголовой вращающейся детонации // Физика горения и взрыва, 2022, 58(5), 79-86, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49450533>
4. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Многоголовая вращающаяся детонация в кольцевом зазоре // Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки, 2022, 502(1): 45-49, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48050912>
5. Георгиевский П.Ю., Сутырин О. Г. Инициирование детонации при взаимодействии ударной волны с горючим газовым пузырем // Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки, 2022, 503(1): 35-41, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48457832>
6. Левин В.А., Афонина Н.Е., Громов В.Г., Хмелевский А.Н. Численное исследование течения в кольцевом сопле на основе турбулентной модели // Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки, 2022, 503(1): 47-51, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48457834>
7. Tunik Y.V., Mayorov V.O. Energy efficiency of detonation combustion in supersonic ramjet engines // Acta Astronautica. 2022. 194: 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.09.038>
8. Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г. Детонация горючей газовой смеси при взаимодействии ударной волны с эллиптической областью тяжелого инертного газа // Письма в ЖТФ, 2021, 47(9): 21-24, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46318370>
9. Георгиевский П.Ю., Максимов А.Н., Фокеев В.П. Отрицательное маховское отражение с множественными тройными конфигурациями при дифракции ударной волны на клине // Письма в ЖТФ, 2021, 47(20): 11-15, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46549362>
10. Левин В. А., Журавская Т. А. Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси посредством внесения аргона и озона // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2021. 501(1): 48-53, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47371400>
11. Levin V.A., Manuylovich I.S., Markov V.V. Rotating detonation waves in annular gap with variable stagnation pressure // Shock Waves, 2021, 31: 651-663, <https://doi.org/10.1007/s00193-020-00988-3>
12. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационной волной в канале с препятствиями посредством предварительной подготовки

газовой смеси // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2020, (4): 59-68, <https://elibrary.ru/item.asp?id=42964194>

13. Туник Ю.В. Об энергетической эффективности незамкнутого термодинамического процесса с детонационным горением // Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки, 2020, 493(1): 66-69, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43795329>
14. Туник Ю.В. Актуальные схемы сверхзвуковых ПВРД с нестационарным детонационным горением // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2020. 21(1): 1-12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44539794>
15. Levin V.A., Afonina N.E., Gromov V.G., Manuylovich I.S., Khmelevsky A.N., Markov V.V. Spectra signals of gas pressure pulsations in annular and linear dual slotted nozzles // Combustion Science and Technology, 2019, 191(2): 339-352, <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1467405>
16. Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г. Фокусировка ударной волны при взаимодействии с локальной областью повышенной плотности // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2018, (6): 116-122, <https://elibrary.ru/item.asp?id=36529652>
17. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением в высокоскоростном потоке газовой смеси / Труды математического института им. В.А. Стеклова РАН. 2018. 300: 123-134. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32659280>
18. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Вращающаяся волна детонации в кольцевом зазоре // Труды математического института им. В.А. Стеклова РАН. 2018. 300: 135-145. <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.1134/S0371968518010107>

Проректор – начальник управления
научной политики Московского
государственного университета
имени М.В. Ломоносова

А. Федянин