

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 13 мая 2021 г.

Соискатель: **Стамов Любен Иванович.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Математическое моделирование неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ».

Специальность 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы.

Отрасль наук: физико-математические науки.

На заседании председательствует – Заместитель председателя диссертационного совета член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор В.Ф.ТИШКИН

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 24 членов диссертационного совета присутствовали 16 докторов по профилю рассматриваемой диссертации - 6.

1.	ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
2.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
3.	АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
4.	ГАСИЛОВ В.А.	д.ф.-м.н.	01.02.05
5.	ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.01.07
6.	ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
7.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
8.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
9.	КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
10.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
11.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
12.	ОРЛОВ Ю.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
13.	ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
14.	ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
15.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
16.	ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял решение: присудить Стамову Любену Ивановичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы».

Проголосовали:

за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заключение диссертационного совета приведено ниже:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 13.05.2021 № 2

О присуждении **Стамову Любену Ивановичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Математическое моделирование неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 03 марта 2021 года (протокол заседания №2/пз) диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Стамов Любен Иванович** 1988 года рождения, в 2010 году окончил Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко по специальности «Прикладная математика и информатика» с присвоением

ему квалификации математик, системный программист по специальности «Прикладная математика и информатика».

В 2013 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» (научные руководители в аспирантуре: Смирнов Н.Н. и Рыбакин Б.П.). В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника в отделе вычислительных систем Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук».

Диссертация выполнена в отделе вычислительных систем Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук».

Научный руководитель – Смирнов Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией волновых процессов механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», заместитель директора по стратегическим информационным технологиям Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук».

Научный консультант – Рыбакин Борис Петрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела вычислительных систем Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук».

Назначение научного консультанта обосновано необходимостью участия квалифицированного специалиста для оказания консультаций соискателю в ходе разработки специализированного комплекса программ для многоядерных вычислительных систем с графическими сопроцессорами. Консультант Рыбакин Б.П., широко известный своими работами в области численного моделирования, так же является признанным специалистом в области создания программного обеспечения для гетерогенных вычислительных систем. Во время обучения соискателя Рыбакин Б.П. был его вторым руководителем.

Официальные оппоненты:

Якуш Сергей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук;

Медведев Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории гетерогенного горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва, в своем **положительном** отзыве, составленным **Кивериным Алексеем Дмитриевичем**, кандидатом физико-математических наук, заведующим лабораторией №15.2 вычислительной физики ОИВТ РАН и утвержденным **Гавриковым Андреем Владимировичем**, доктором физико-математических наук, заместителем директора ОИВТ РАН по науке, указала, что диссертация Стамова Л.И. содержит новые результаты, имеющие практическую и научную значимость для решения широкого класса актуальных задач, таких как исследование нестационарного развития процессов горения и детонации газовых смесей в условиях динамического

воздействия на среду, в частности в условиях отражения и фокусировки ударных волн. С одной стороны полученные автором результаты актуальны для решения задач в области разработки новых энергетических устройств, основанных на процессах горения и детонации, и в том числе для решения задач инициирования детонации. С другой стороны понимание сценариев развития взрыва горючей газообразной смеси имеет первостепенное значение при решении задач взрывобезопасности, направленных на предотвращение негативных последствий развития взрыва на промышленных объектах, работа которых связана с рисками накопления горючих газообразных смесей и их последующего взрыва.

Представленные автором результаты указывают на высокую производительность предложенных и реализованных им методик и рекомендуются к использованию при проведении научных поисковых и специализированных расчетов, направленных на расчетно-теоретическое сопровождение опытно конструкторских работ. Полученные результаты по динамике волн горения и детонации, формируемых в результате воспламенения газообразной смеси в области фокусировки ударной волны, являются принципиальными для проектирования перспективных энергетических устройств, включая детонационные двигатели, и для разработки систем предотвращения последствий взрывов газа на промышленных объектах, работа которых связана с рисками выброса горючих газовых компонент в воздух и последующим взрывом. Все указанные задачи являются первостепенными в соответствующих технологических отраслях двигателе- и моторостроения, пожаро- и взрывобезопасности. Отдельно следует отметить, что разработанные автором методики расчета и полученные результаты относятся к горению водородно-воздушных смесей, представляющих особый интерес согласно плану мероприятий по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года, утвержденному 12.10.2020 г. Распоряжением Правительства РФ № 2634. Предложенные и реализованные автором методики расчета

многомерных задач горения и взрыва, а так же ряд новых физических результатов могут быть использованы для решения широкого круга задач, связанных с горением и детонацией газа и исследуемых в таких научных центрах как ОИВТ РАН, ЦИАМ ЦАГИ, ИБРАЭ РАН, ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, ИПХФ РАН, ИТПМ СО РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, НИЦ Курчатовский институт, а также в опытно-конструкторских организациях в составе ОДК.

Ведущая организация указала, что диссертация Стамова Л.И. является законченным научно-квалификационным исследованием, отвечающим паспорту научной специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», в котором содержится решение задачи математического моделирования неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ, имеющей значение для развития физики горения и взрыва и представляющей новые научно-обоснованные технические решения в области численного моделирования с использованием многопроцессорных вычислительных систем. Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, согласно пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор, Стамов Любен Иванович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискатель имеет 40 опубликованных работ по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК опубликовано 4 работы, в изданиях, индексируемых в международных базах данных WoS и Scopus – 8 работ. Имеются 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Наиболее существенные работы соискателя:

1. Стамов Л. И., Тюренкова В. В. Математическое моделирование отражения и фокусировки ударных волн в конической полости в химически

реагирующем газе // Математическое моделирование. — 2018. — Т. 30, № 3. — С. 3—18. **(Перечень ВАК)**

2. Стамов Л. И. Вычислительное моделирование отражения и фокусировки ударных волн в клинообразной полости в химически реагирующем газе // Вестник кибернетики. — Сургут, 2018. — Т. 32, № 4. — С. 85—94. **(Перечень ВАК)**

3. Рыбакин Б. П., Егорова Е. В., Стамов Л. И. Применение графических процессоров для решения задач газовой динамики с учетом уравнений химической кинетики // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. — 2013. — Т. 14. — С. 31—37. **(Перечень ВАК)**

4. Smirnov N. N., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L., Nikitin V. F., Stamov L. I., Tyurenkova V. V. Onset of detonation in hydrogen-air mixtures due to shock wave reflection inside a combustion chamber // Acta Astronautica. — 2018. — Vol. 149. — P. 77—92. **(WoS Q1, Scopus Q1)**

5. Smirnov N. N., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L., Nikitin V. F., Stamov L. I., Tyurenkova V. V. Nonequilibrium processes in meta-stable media // The European Physical Journal E. — 2018. — Vol. 41:66. **(WoS Q3, Scopus Q2)**

6. Tyurenkova V. V., Stamov L. I. Flame propagation in weightlessness above the burning surface of material // Acta Astronautica. — 2019. — Vol. 159. — P. 342—348. **(WoS Q1, Scopus Q1)**

7. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Stamov L. I., Altoukhov D. I. Supercomputing simulations of detonation of hydrogen-air mixtures // International Journal of Hydrogen Energy. — 2015. — Vol. 40, no. 34. — P. 11059—11074. **(WoS Q2, Scopus Q1)**

8. Rybakin B. P., Stamov L. I., Egorova E. V. Accelerated Solution of Problems of Combustion Gas Dynamics on GPUs // Computers and Fluids. — 2014. — Vol. 90. — P. 164—171. **(WoS Q2, Scopus Q1)**

Общий объем публикаций соискателя в изданиях из перечня ВАК и индексируемых в международных базах данных WoS и Scopus – 196 печ. л.,

авторский вклад соискателя 76.3 печ. л. Одна статья написана соискателем полностью самостоятельно.

В работах [1; 2; 4; 5; 7;] представлена реализованная автором вычислительная модель и результаты проведенных автором исследований по изучению процессов фокусировки ударных волн в клиновидной [2; 4; 5;] и конусообразной [1] вставках в химически реагирующей газовой смеси в трехмерной постановке. В работах [7; 8] представлены результаты тестирований используемых в данной работе численных схем, проведенные автором. В работах [3; 6; 8] описаны результаты работы созданного автором программного комплекса на многоядерных системах и графических процессорах при проведении расчетов задач с физико-химическими превращениями.

В совместных работах научному руководителю д.ф.-м.н. Н. Н. Смирнову принадлежит выбор темы исследований, первоначальная постановка задач и интерпретация полученных результатов [1; 4; 5; 6; 7]; научному консультанту д.ф.-м.н. Б. П. Рыбакину принадлежит постановка, метод решения и результаты моделирования по задаче о взаимодействии сильной ударной волны со сферой газа пониженной плотности, он также участвовал в обсуждении результатов [3; 8].

Другие соавторы отвечали за выполнение физических экспериментов; участвовали в обсуждении постановки задач и результатов; реализации схемы PPM; разработке математической модели испарения горючего и выводе аналитического решения для данной модели; разработке математической модели и алгоритмов с использованием схемы MUSCL; проведении расчетов с использованием пакета ЛОГОС. При этом все выносимые на защиту результаты принадлежат соискателю лично.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационного исследования. Недостоверных сведений в тексте диссертации об опубликованных соискателем работах нет.

На автореферат и диссертацию поступили отзывы ведущей организации, отзывы оппонентов, также поступил 1 отзыв на автореферат. Отзывы содержат ряд замечаний:

В отзыве ведущей организации ОИВТ РАН:

1. При обсуждении известных результатов по переходу горения в детонацию в рамках обзора литературы допущен ряд некорректных формулировок. В частности, когда автор противопоставляет механизму «взрыва во взрыве» А. Оппенгейма «другую точку зрения на природу перехода в детонацию» он говорит о механизме градиентного ускорения пламени Я.Б. Зельдовича, однако это не вполне верно. Так называемый градиентный механизм Я.Б. Зельдовича определяет нестационарное развитие процесса теплового взрыва на фоне неравномерно нагретой среды (внутри очага воспламенения, «горячего пятна») и процесса ускорения пламени этот механизм не касается. По-видимому, автор хотел сказать о так называемом SWACER механизме, предложенном J.H.S. Lee для описания переходного процесса с формированием детонации при реализации околокритического режима инициирования детонации локализованным источником энергии. Далее автор говорит также о возникновении неустойчивости «на микроуровне» и о развитии детонации «на микроуровне», но эффекты, о которых говорит автор все же проявляются на макроуровне. Далее при обсуждении результатов работ [61,62] говорится о «формировании областей высокого давления..., стимулирующих ускорение пламени за счет гидродинамической неустойчивости». Это некорректно, так как речь идет уже о финальной стадии развития процесса, когда роль гидродинамической неустойчивости уже не значительна. Фактор гидродинамической неустойчивости вносит значительный вклад только на начальных стадиях развития пламени задолго до перехода в детонацию. В ключе конкретной постановки задачи, решенной в рамках настоящей диссертации, в первую очередь для развития этого

направления уместно рекомендовать автору познакомиться с недавними работами, подготовленными сотрудниками ОИВТ РАН: [10.1016/j.combustflame.2019.03.012, 10.1016/j.combustflame.2020.08.013].

2. В разделе 2.1.4 диссертации автор предлагает новый кинетический механизм окисления водорода. Однако, в тексте диссертации не приводятся в явном виде конкретные критерии, которыми автор руководствовался при оценке существующих кинетических механизмов и на основе которых был сделан вывод о необходимости конструирования нового кинетического механизма.
3. В разделе 3.2 автор исследует, в том числе, решение на сходимость, но при этом ограничивается рассмотрением расчетной сетки с минимальным размером ячейки 0.25 мм. Как правило, при решении задачи о распространении детонации используются существенно более подробные расчетные сетки, позволяющие разрешать характерные пространственные масштабы, на которых реализуется экзотермическая реакция горения. В том числе, предположительно, та-кие более подробные расчеты позволяют воспроизвести более точно структуру детонационной волны по сравнению с представленными в диссертации расчетами, где имеет место недооценка пикового давления в точке Неймана.
4. В разделе 4.2 при обсуждении особенностей инициирования детонации в результате фокусировки ударной волны в конусе автор делает замечание о том, что учет модели турбулентности при моделировании оказывает влияние на развитие детонации, обеспечивая лучшее согласие с экспериментом. При этом, крайне важно было бы определить конкретный физический механизм, определяющий этот эффект, успевает ли развиться турбулентность на масштабах развития детонационного процесса или подсеточные эффекты, моделируемые в рамках традиционных моделей турбулентности, связаны с иными физическими факторами.

5. На полях пространственного распределения параметров среды, широко представленных в третьей главе, можно видеть, что расчеты воспроизводят бифуркацию фронта отраженной ударной волны вблизи боковой стенки ударной трубы. Целесообразно в дополнении к проведенным верификационным исследованиям проверить, имеет ли место совпадение расчетов с экспериментальными данными.
6. В тексте диссертации встречаются опечатки, грамматические ошибки, неудачные построения фраз и повторы, но, тем не менее, в целом текст составлен понятным языком.

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Якуша С.Е.:

1. В названии диссертационной работы термин «неравновесные процессы детонации и горения» не слишком удачен: процессы физической неравновесности (например, по колебательным и поступательным степеням свободы) не рассматривались, тогда как химическая неравновесность (в смысле отсутствие равновесия между прямыми и обратными реакциями) при горении и детонации всегда имеет место.
2. Детальные кинетические механизмы, публикуемые в литературе, как правило отличаются составом учитываемых элементарных реакций и значениями их кинетических констант. При этом валидация кинетического механизма осуществляется на некотором наборе экспериментов, что подтверждает возможность использования данного набора констант совместно. Применяемый автором подход (см. Таблицу 3, стр. 41), состоящий в замене констант некоторых реакций, а также добавлении новых реакций (например, реакции 20), возможен, однако должен рассматриваться только как первый шаг, за которым должна следовать валидация полученного механизма в соответствующих кинетических расчетах. Такие расчеты в диссертации отсутствуют.

3. Модель турбулентности используется автором только для расчета эффективной вязкости и теплопроводности, однако для расчета скорости реакций используется квазиламинарный подход (т.е. скорости реакций вычисляются при осредненной по Рейнольдсу температуре, что не учитывает влияния пульсаций). Следовало привести аргументы в пользу справедливости такого подхода, в особенности в задаче о переходе турбулентного горения в детонацию.
4. Расчеты проводились в трехмерной постановке, однако все представленные результаты по сути являются двумерными (близкими к плоской или осесимметричной геометрии). Было бы интересно проанализировать возникновение и характеристики истинно трехмерных решений, наличие поперечных волн и т.п.

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Медведева С.П.:

1. Не проведена валидация сконструированного диссертантом кинетического механизма путем сравнения с другими кинетическими механизмами и с экспериментальными данными по кинетике выхода основных компонентов и наиболее важных продуктов горючей смеси.
2. В предложенном кинетическом механизме нет зависимости скорости реакций диссоциации от давления, которые важны при переходе горения в детонацию.
3. Сравнение результатов численного моделирования с данными, полученными в экспериментах по фокусировке ударных волн, проведено только по записям давления. В то же время, например, в работах [91], [95] из списка литературы приведены теневые картины течения при различных режимах горения и детонации в условиях фокусировки ударных волн. Прямое сравнение расчетного поля течения с экспериментом представляет важность, как для валидации результатов моделирования, так и для выявления закономерности исследуемых процессов.

4. Полученное соответствие расчетного и измеренного времени прихода волн давления подтверждает достоверность моделирования. Однако, расчетное максимальное давление в вершине отражателя оказалось значительно выше экспериментально измеренного, что требует пояснений.
5. В результатах численного моделирования отсутствует режим «мягкого воспламенения» (mild ignition), описанный в [95], при котором происходит воспламенение, но детонация не инициируется.
6. Выводы 3 и 4 могут быть объединены. В тоже время, полученный диссертантом результат (стр. 136) о необходимости для воспламенения включения турбулентности и вязких сил имеет критическую важность для выявления механизма инициирования детонации и достоин оформления в виде отдельного вывода.

В отзыве также отмечается наличие отдельных опечаток, хорошего оформления и иллюстраций.

*В положительном отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Стрижака П.А.,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет:*

1. Формулировки первых двух защищаемых положений целесообразно конкретизировать для научной общественности в плане принципиальных отличий предложенных моделей и методов от известных и границ их применимости по диапазонам варьирования ключевых входных параметров.
2. Формулировки четвертого и пятого защищаемых положений отражают проделанную работу, которую после прочтения автореферата сложно идентифицировать и оценить. Целесообразно были их раскрыть в тексте автореферата для понимания масштабности полученных результатов.
3. В разделе с описанием методологии и методов исследований целесообразно было привести обоснование выбора моделей, подходов, сеток и др. В текущем виде информация приведена, но не хватает

понимания причин, по которым автор считает выбранные методики и подходы наиболее удачными или даже оптимальными, При анализе результатов исследований также целесообразно было отразить эти аспекты и сравнить свой выбор с выбором коллег.

При этом в отзывах отмечается, что приведенные замечания не снижают высокой научной и практической значимости работы. В своем выступлении соискатель дал исчерпывающие ответы на замечания, которые будут отражены в расшифровке стенограммы.

В целом в присланных отзывах отмечается, что диссертационная работа выполнена в соответствии требованиями «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широко известной компетенцией оппонентов и сотрудников ведущей организации в вопросах физики горения и детонации, в том числе и вычислительного моделирования такого рода процессов, что подтверждается их многочисленными научными публикациями в данных областях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- 1) **Создана** вычислительная модель нестационарного горения многокомпонентной газовой смеси в трехмерной постановке, учитывающая возможность возникновения дефлаграции и детонации, а также переходных режимов и ее параллельная реализация, проведена её настройка для анализа горения водородно-воздушных смесей путем проведения различных вычислительных и физических экспериментов.
- 2) **Созданы** верификационный и валидационный базисы для решения задач горения и детонации, а именно: представлен ряд точных решений задач распада разрыва, а также результаты физических экспериментов по

отражению ударных волн от клина и конуса в химически реагирующей смеси газов, включая начальные и краевые условия, что позволяет провести модельные расчеты с использованием вычислительного кода и сравнить результаты с эталонными значениями.

- 3) **Проведено** численное исследование процессов отражения и фокусировки ударных волн в клиновидной и конусообразной вставках в химически реагирующей газовой смеси в трехмерной постановке.
- 4) В численных экспериментах **получены** следующие режимы развития процессов: при слабой падающей волне отражение и фокусировка не приводят к зажиганию горючей смеси; при сильной падающей волне ее отражение и фокусировка приводят к возникновению детонационной волны в вершине; при обладании падающей волной промежуточной интенсивности в результате воспламенения смеси в вершине возникает волна горения, которая отстает от отраженной волны; в некоторых случаях в результате турбулизации волна горения ускоряется, что приводит к возникновению детонации.
- 5) Установлено, что в диапазоне параметров переходных режимов результаты численного моделирования, полученные на основе модели, учитывающей турбулентность, качественно отличаются от результатов модели без ее учета и дают правильную картину при сравнении с данными экспериментов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- созданная вычислительная модель нестационарного горения многокомпонентной газовой смеси в трехмерной постановке, с учетом возможности возникновения дефлаграции и детонации, а также переходных режимов, была отлажена для работы с водородно-воздушными смесями, что позволяет проводить исследование процессов в смесях такого типа.

- показано наличие четырех различных сценариев, возникающих при отражении ударной волны в химически реагирующем газе от внутренней поверхности клина или конуса. При слабой интенсивности падающей волны

отражение и фокусировка не приводят к зажиганию горючей смеси, при сильной падающей волне ее отражение и фокусировка приводят к возникновению детонации в вершине вставки, а при падающей волне промежуточной интенсивности возможно воспламенение газа после отражения ударной волны и распространение волны горения вслед за отраженной волной из вершины клина или конуса. Дальнейшее развитие процесса может следовать по одному из двух сценариев: волна горения может распространяться с дозвуковой скоростью, постепенно отставая от отраженной ударной волны, альтернативно, возможно возникновение перехода горения в детонацию в результате возникновения вторичного взрыва в зоне сильно турбулизованного пламени.

Сама разработанная модель может быть достаточно быстро адаптирована к работе с другими горючими смесями путем использования соответствующих кинетических механизмов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Исследование процессов горения и детонации газовых смесей, возникающих в результате отражения и фокусировки ударных волн в химически реагирующей газовой смеси, имеет различное применение во многих отраслях деятельности. Результаты исследований могут существенно упростить и ускорить некоторые стадии разработки новых устройств, основанных на горении и детонации. Это относится как к существующим двигателям и их оптимизации, так и к разработке перспективных детонационных двигательных систем. С другой стороны, данные исследования могут также спрогнозировать и предотвратить некоторые негативные последствия горения и детонации, связанные с безопасностью жизнедеятельности и возникающие при работе с различными видами горючих веществ. Наличие программного пакета, позволяющего достаточно точно и быстро проводить моделирование такого рода процессов, позволяет

проводить решение многих задач, связанных с горением и детонацией газовых смесей, в том числе и в перечисленных выше областях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

Основу используемых при построении программного комплекса физических моделей и математических алгоритмов составляют общепринятые в научной среде фундаментальные законы. Созданные программные реализации были протестированы на ряде специализированных тестовых задач. Используемые численные методы показали хорошую сходимость к аналитическим решениям. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными данными по горению и детонации водородно-воздушных смесей газов.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

- все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности;
- основные результаты диссертации получены впервые и лично соискателем;
- соискателем разработана вычислительная модель нестационарного горения многокомпонентной газовой смеси в трехмерной постановке, которая учитывает возможность возникновения дефлаграции и детонации, а также переходных режимов;
- проведено тестирование созданной модели и ее отладка для водородно-воздушных смесей,
- проведено исследование процессов, протекающих при фокусировке ударных волн в клиновидной и конусообразной вставках в водородно-воздушной газовой смеси в трехмерной постановке,
- проведен анализ полученных результатов и их сравнение с экспериментальными данными;
- в программных пакетах для расчетов задач с физико-химическими превращениями на многоядерных системах и графических процессорах, на которые получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, автором написан весь код на языке Фортран, реализованы

численные схемы JT, KT, KL и все сопутствующие алгоритмы, в том числе расчет химической кинетики и параллельные блоки, использующие технологии OpenMP и CUDA.

В целом диссертация соискателя Стамова Любена Ивановича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной задачи математического моделирования неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ, имеющей большое значение для развития физики горения и взрыва и представляющей практический интерес при разработке и создании различных энергетических установок нового поколения и решении задач пожаро- и взрывобезопасности.

На заседании 13 мая 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Стамову Любене Ивановичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них - 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета Д 002.024.03

В.Ф. Тишкин

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.024.03

М.А. Корнилина

13 мая 2021 года