

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу Стамова Любена Ивановича
на тему «Математическое моделирование неравновесных процессов
детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных
ЭВМ»

по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

В диссертационной работе Стамова Л.И. представлены результаты вычислительного моделирования процессов горения и детонации водородно-воздушной смеси при отражении и фокусировке ударных волн на различных вогнутых поверхностях. Расчеты проводились с помощью специально разработанного программного комплекса. **Актуальность диссертационной работы** обусловлена тем, что результаты проведенных исследований могут найти применение как для прогнозирования и предотвращения аварийных взрывных процессов, связанных с производством и хранением водорода, так и при разработке новых перспективных двигательных устройств, основанных на процессах горения и детонации. Указанные направления являются весьма актуальными в настоящее время, что подтверждается тем, что исследованиями в данных направлениях занимаются многие научные группы в различных странах.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списков сокращений и условных обозначений, литературы, рисунков и таблиц.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обоснована актуальность темы и достоверность результатов, изложена научная новизна, практическая значимость.

В первой главе дан краткий обзор литературы по теме исследования, горению и детонации газовых смесей, переходов между этими режимами, турбулентности, моделировании химических взаимодействий.

Во второй главе представлено описание используемых при проведении исследований математической и вычислительной моделей. Приведена основная система уравнений, используемая для описания процессов, протекающих в гомогенных химически реагирующих газовых смесях, и ее численная дискретизация. Приведено описание некоторых алгоритмов, используемых при решении системы жестких дифференциальных уравнений химической кинетики.

В третьей главе представлены результаты тестирования разработанного вычислительного комплекса на задаче Римана о распаде произвольного разрыва с различными волновыми конфигурациями и задаче распространения детонационной волны в трубе квадратного сечения при прямом инициировании. Приведено сравнение результатов моделирования с аналитическими решениями для нескольких используемых численных схем, определено влияние численной сетки на результаты моделирования. Кроме того, приведены данные по используемым технологиям распараллеливания и информация по скорости расчетов для различных сеток и систем.

В четвертой главе представлены результаты моделирования процессов, протекающих при фокусировке и отражении ударной волны от конической и клинообразной вставок в покоящейся стехиометрической водородно-воздушной смеси. Были получены следующие случаи, соответствующие различным значениям параметров падающей волны: возникновение детонации в клинообразной вставке, возникновение детонации в конусообразной вставке, отражение ударной волны от внутренней поверхности вставки в виде клина и переходу горения в детонацию при отражении от внутренней поверхности клина. Проведено сравнение результатов моделирования с данными физических экспериментов, полученных в ударной трубе, и с теоретической скоростью распространения

детонации для случая ее возникновения. На основании данного сравнения проведена корректировка используемого кинетического механизма.

В заключении указаны итоги исследования. Список литературы содержит 167 наименований.

Достоверность выводов подтверждается верификацией использованных вычислительных алгоритмов и подробным анализом результатов расчетов. Используемые при проведении исследований модели и методы решений являются общепринятыми в научной среде, основаны на фундаментальных законах. Достоинством работы является валидация численного моделирования путем сравнения с точными решениями типичных тестовых задач и экспериментальными данными. Основные результаты диссертации обсуждались на представительных российских и международных конференциях и семинарах, опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией и индексируемых в международных системах цитирования Web of Science и Scopus и известны специалистам в области механики жидкости и газа и горения и взрыва.

Научная новизна. В работе представлены материалы оригинального численного исследования процессов горения и детонации газовых смесей, возникающих при отражении и фокусировке ударных волн в химически реагирующей газовой смеси. Расчетным путем определены и подробно описаны различные сценарии происходящих 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, а при падающей волне промежуточной интенсивности за отраженной ударной волной возможно возникновение волны горения, которая при определенных условиях ускоряется и приводит к переходу горения в детонацию. В результате работы создан новый вычислительный инструмент, позволяющий

проводить исследования процессов горения и инициирования детонации в водородо-воздушных смесях.

Практическая ценность выполненной работы подтверждается оформлением результатов интеллектуальной деятельности в виде двух свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. Разработанные алгоритмы и программные комплексы могут использоваться для выявления закономерностей газодинамических процессов, протекающих в сложной геометрии двигательных установок и газовых турбин. Результаты работы полезны для оценки критических условий возникновения разрушительных взрывных процессов, которые важны для решения проблем взрывобезопасности на объектах атомной и водородной энергетики.

В целом диссертационная работа Стамова Л.И. выполнена на высоком научном уровне. Методические вопросы и анализ результатов выполненных исследований представлены в диссертации достаточно полно и логически обоснованно.

По работе имеются следующие критические **замечания и рекомендации**:

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 закономерностей 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 то же 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.

Диссертация, несмотря на отдельные опечатки, хорошо оформлена и иллюстрирована. Приведенные замечания не влияют на достоверность полученных в диссертации результатов и на общую положительную оценку работы.

Соответствие содержания диссертации специальности. Данная диссертационная работа является завершенным научным исследованием, в котором получены новые результаты, соответствующие паспорту научной специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Структура и оформление диссертации и автореферата соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, следует квалифицировать ее как решение актуальной задачи математического моделирования инициирования детонации в газовых смесях, имеющей практическое значения для разработки и создания энергетических установок нового поколения.

Считаю, что диссертация «Математическое моделирование неравновесных процессов детонации и горения, а также переходных режимов на многопроцессорных ЭВМ» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Стамов Любен Иванович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,
д.ф.-м.н.
«22» апреля 2021 г.

С.П. Медведев

Сведения об оппоненте:

Медведев Сергей Павлович – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории гетерогенного горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН).

Раб.тел.: +7(495)939-73-02.

Адрес электронной почты: podwal_ac@yahoo.com.

Почтовый адрес организации: 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4.

Web-сайт организации: <https://www.chph.ras.ru/>.

Подпись главного научного сотрудника лаборатории гетерогенного горения
ФИЦ ХФ РАН д.ф.-м.н. С.П. Медведева ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ФИЦ ХФ РАН
к.ф.-м.н.



Ларичев М.Н.

119991, г. Москва, Косыгина ул. 4, тел.(495) 939-72-09. mlarichev@chph.ras.ru