

В диссертационный совет Д 002.110.02
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединённого института высоких температур
Российской академии наук
по адресу: 125412, Москва,
ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

ОТЗЫВ

официального оппонента Медведева Сергея Павловича
на диссертацию Яковенко Ивана Сергеевича «Режимы распространения
пламени в химически активных газах и газовзвесьях», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Выявление закономерностей распространения и ускорения пламени в
заранее перемешанной горючей газовой смеси представляет **актуальную
задачу**, как для разработки новых эффективных энергетических установок,
так и для решения проблем взрывобезопасности. Среди нерешенных
фундаментальных задач особое место занимает явление перехода горения в
детонацию (ПГД). К настоящему моменту усилиями российских и
зарубежных исследователей по этой тематике накоплен весьма значительный
объем экспериментальных данных. Тем не менее, даже при использовании
высокоскоростной покадровой визуализации картины течения не удается
добиться существенного прогресса в понимании механизма ПГД, даже в
случае простейшей геометрической конфигурации, такой как канал с
гладкими стенками. Методы численного моделирования, реализованные в
диссертации, и проведенные с их помощью расчеты открывают возможность
выявления деталей механизма перехода горения в детонацию. Несомненную
практическую ценность имеют рассмотренные диссертантом задачи,
связанные с вовлечением в детонационное течение инертных микрочастиц.
Эта часть диссертационной работы способствует созданию научных основ
технологии детонационного напыления. Важным фактором,

способствующим целостности диссертации, является выбор в качестве общего для всех задач объекта исследования – смеси водорода с кислородом или воздухом. При этом следует учитывать, что, именно эти смеси, особенно при повышенном давлении, отличаются плохо предсказуемым поведением, особенно при самовоспламенении и переходе горения в детонацию. Углубленное изучение с помощью численного моделирования процессов горения и взрыва смесей водород – воздух важно как для научно обоснованного проектирования перспективных экологически чистых энергетических и двигательных установок, так и для решения вопросов водородной взрывобезопасности на атомных электростанциях.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Объем диссертации 135 страниц текста с 34 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 151 ссылку.

Во введении приведено обоснование актуальности исследований, сформулированы задачи работы, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приведен краткий литературный обзор исторических и современных работ по экспериментальному, теоретическому и математическому моделированию процессов горения и детонации газовых смесей и газовзвесей. Представлена физико-математическая модель газовой фазы, основанная на полной системе уравнений газовой динамики Навье-Стокса. Описаны используемые детальные кинетические механизмы окисления водорода. Приведены математические модели описания динамики газовзвесей и изложена методика расчета процессов переноса.

Во второй главе представлены использованные алгоритмы модифицированного эйлер-лагранжева метода «крупных частиц». Кратко описана параллельная объектно-ориентированная программная платформа, предназначенная для создания пакетов вычислительной газодинамики, в том числе с учетом химических реакций.

Третья глава представляет результаты численного моделирования горения водородсодержащих смесей в ограниченных объемах. В трехмерной

геометрии смоделированы процессы ускорения пламени и перехода горения в детонацию в смеси водород – кислород в прямоугольном канале. Констатировано качественное соответствие результатов с ранее проведенными двухмерными расчетами. Дана авторская интерпретация результатов теневой высокоскоростной видеосъемки процесса ускорения пламени.

Динамика волны горения в канале проанализирована с использованием модели, описывающей фронт пламени как совокупность движущихся источников энерговыделения. Обоснован механизм перехода горения в детонацию в условиях возрастающей с увеличением давления задержки самовоспламенения. В заключительной части главы выявлены особенности горения околопредельных бедных водородовоздушных смесей. Показано существенное влияние силы тяжести на развитие очага горения.

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования реагирующих течений при наличии взвешенных инертных микрочастиц. Интересным направлением исследований, которому ранее не уделялось столь пристальное внимание, является продемонстрированная возможность инициирования горения и детонации в газовой фазе путем теплообмена между газовой и конденсированной фазами, нагреваемыми с помощью оптического излучения. Результаты расчетов проинтерпретированы в рамках «градиентного» механизма инициирования детонации Я.Б. Зельдовича.

Во второй части главы продемонстрированы возможности разработанных расчетных подходов для оптимизации процессов детонационного напыления покрытий.

Глава пять посвящена адаптации современного бездиссипативного метода КАБАРЕ для численного моделирования газодинамических течений с химическими реакциями. Особую ценность представляет, проведенное на разнообразных типовых задачах, систематическое тестирование перспективного метода и прямое сравнение с решениями, полученными по эйлер-лагранжеву методу. Выявлены преимущества метода КАБАРЕ,

которые могут быть использованы для уточнения механизмов распространения пламени и детонации и снижения ресурсоёмкости расчетов.

В заключении приведены основные результаты работы.

Таким образом, по логике изложения работа состоит из трех основных частей. Первая часть включает главы 1,2, создающие расчетно-теоретическую базу для проведения численного моделирования физико-химических процессов при практически важных параметрах. Вторая смысловая часть диссертационной работы (главы 3,4) посвящена результатам применения разработанных подходов для численного моделирования процессов распространения и ускорения пламени в водородсодержащих смесях в замкнутых объемах и задач вовлечения взвешенных твердых частиц в детонационное течение. Третья часть работы (глава 5) возвращает к теоретическим основам, изложенным в части 1, однако на новом уровне, который задается анализом преимуществ современного вычислительного метода КАБАРЕ при решении задач горения и взрыва газовых смесей. Эта часть методически важна для построения перспективы будущих исследований.

Результаты выполненных исследований изложены в диссертации в достаточно логичном и ясном порядке. **Достоверность** выводов подтверждается использованием апробированных вычислительных алгоритмов и анализом результатов расчетов с привлечением достаточно ясных физических предположений.

По работе имеются следующие критические замечания и рекомендации:

1. Показано, что в трехмерных расчетах пламя ускоряется в два раза быстрее, чем в двухмерных (стр.51). Причиной этого названо «наличие дополнительной степени свободы». Необходимо, однако, более подробное пояснение, основанное на отличиях параметров потока при различной геометрии. Вероятной причиной выявленной особенности может быть влияние на ускорение пламени

пограничного слоя, которому в диссертации не уделяется достаточного внимания.

2. На стр.52 сделан вывод, что на всех стадиях перехода горения в детонацию поток перед фронтом пламени является ламинарным, а не турбулентным, как принято считать, основываясь на интерпретации экспериментов. В то же время (стр.97) автор признает, что «эволюция акустических и вихревых полей и мелкомасштабная структура течений....проявляется в весьма сглаженном виде из-за схемной вязкости» используемого вычислительного метода. Таким образом, для подтверждения, того что эффект «ламинарности» не является особенностью этого метода, целесообразно продемонстрировать принципиальную возможность расчета заведомо турбулентного течения.
3. В части, описывающей горение газообразных смесей в закрытых объемах, представлены расчеты для стандартных условий проведения лабораторных экспериментов. Целесообразно провести прямое сравнение результатов имеющихся в литературе экспериментов и выполненных расчетов, т.е. пройти стадию валидации разработанного программного комплекса.

Отмеченные недостатки не влияют на основные результаты исследования, проведенного И.С. Яковенко. Работа выполнена на высоком научном уровне, результаты обладают научной новизной, практически значимы и известны специалистам. Список публикаций в журналах ВАК достаточно представительен, статьи отражают основное содержание диссертации. Результаты исследований апробированы на многочисленных российских и международных конференциях. Накопленный расчетно-теоретический материал может служить научной основой для разработки новых и модернизации существующих энергетических установок, использующих в качестве топлива водорода, а также для решения проблем водородной взрывобезопасности.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация Яковенко Ивана Сергеевича «Режимы распространения пламени в химически активных газах и газовзвесьях» является научно-квалификационной работой высокого уровня и соответствует требованиям п. 9-11 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией гетерогенного горения
ФГБУН Институт химической физики
им. Н.Н. Семенова РАН



С.П. Медведев

119991, Москва, ул. Косыгина, 4
ИХФ РАН, сайт www.chph.ras.ru
E-mail: s_p_medvedev@chph.ras.ru
Тел: 8-916-1612294



Собственноручную подпись
сотрудника Медведева С.П.
удостоверяю
Секретарь 