

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 31 мая 2017 г. (протокол № 6)

Защита диссертации **Яковенко Ивана Сергеевича**
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«**Режимы распространения пламени в химически активных газах и
газовзвесьях**»

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Москва – 2017

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
Протокол № 6 от 31 мая 2017 г.

Диссертационный совет Д 002.110.02 утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 21 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника и 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02
к.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
4	Васильев М.М.	К.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	Отсутствует
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
11	Ваулина О.С.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Отсутствует
12	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
13	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
14	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
15	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
16	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
17	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
18	Иванов М.Ф.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
22	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
23	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
24	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
25	Петров О.Ф.	Академик РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
26	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
27	Савватимский А.И.	Д.т.н.	01.04.14	Присутствует
28	Сон Э.Е.	Академик РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
31	Якубов И.Т.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 4.3.1 – «Математического моделирования» Научно-исследовательского центра электрофизики и тепловых процессов (НИЦ-4 ЭФТП) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Яковенко Ивана Сергеевича** на тему «Режимы распространения пламени в химически активных газовых смесях и газозвесах». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в лаборатории 4.3.1 – «Математического моделирования» НИЦ-4 ЭФТП ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Научный руководитель:

Иванов Михаил Федорович – д.ф.-м.н., заведующий отделом 4.3 – «Вычислительной физики» Научно-исследовательского центра электрофизики и тепловых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Головизнин Василий Михайлович - гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор, заведующий отделом «Перспективных исследований и математического моделирования» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН; Россия, 115191 г. Москва, ул. Большая Тульская, д. 52).

Медведев Сергей Павлович – гражданин РФ, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Гетерогенного горения» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН; Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4).

Ведущая организация:

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова») (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор, заведующий отделом Головизнин В.М. и д.ф.-м.н., заведующий лабораторией Медведев С.П., научный руководитель Яковенко И.С. д.ф.-м.н. Иванов М.Ф.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Добрый день, уважаемые члены совета сегодня у нас три пункта, пункт первый и основной это защита диссертации Яковенко Ивана Сергеевича. Михаил Михайлович наверное начнем с того что Вы ознакомите нас с материалами?

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель

Какие вопросы есть относительно соискателя? Ну, будем считать, что нет. Тогда переходим к вашему докладу. У Вас есть 20 минут, пожалуйста.

Яковенко И.С.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Яковенко И.С. прилагается).

Председатель

Спасибо Иван Сергеевич, пожалуйста, вопросы к соискателю. Кто хочет ?

Савватимский А.И.

Извините, я сидя буду спрашивать. Скажите, пожалуйста, вот в связи с появлением различных расчетных кодов, многие уверены, что используя эти коды можно получить практически все, не обращаясь к эксперименту. Вы в своем докладе показали вот эти возможности этих расчетных методик, вот например получение теневых фотографий расчетным методом для меня было совершенной новостью. Но ваша область знаний она очевидно позволяет получить экспериментальные профили этих же вещей. Вот у вас нет никаких сравнений с экспериментом. Вы могли бы сказать, где было проведено сравнение и каков результат.

Яковенко И.С.

Касательно сравнений с экспериментом, теневых фотографий. Снизу указаны какраз экспериментальные теневые фотографии и по сути они действительно воспроизводят друг друга, вычислительные и экспериментальные. Также, конечно же для валидации вычислительного кода проведено достаточно много тестовых расчетов по различным аспектам и различным задачам физики горения и детонации. Сейчас я покажу сводную таблицу различных характеристик по которым проводилась валидация данной расчетной методики. В частности мы достаточно хорошо воспроизводим параметры устойчивой детонационной волны, параметры дефлаграционных волн, параметры ударных волн. Есть еще другие сравнения по результатам горения бедных пламен. Вы видите неплохое соответствие между экспериментом и расчетом по координате верхней точки фронта пламени, также по структуре фронта пламени имеется хорошее соответствие с экспериментом. Вообще говоря данная методика которая была использована в работе отлажена на достаточно большом спектре различных проблем физики горения и детонации, в частности горение в двигателях, горение в дисперсных смесях, устойчивости детонации, то есть достаточно большой круг.

Савватимский А.И.

Спасибо.

Председатель

Ответ положительный, сравнение есть, не все вошло в доклад. А в диссертацию-то эти сравнения пошли?

Яковенко И.С.

Да, все эти данные есть в диссертации.

Председатель

Еще вопросы пожалуйста.

Вараксин А.Ю.

Та часть работы, где Вы рассматриваете инициацию детонации путем прохождения излучением слоя частиц толщины определенной. Единственным параметром у Вас выступает слой частиц. Естественно там физика достаточно сложная. Безусловно размер частиц оказывает определенное влияние...

Яковенко И.С.

Размер частиц коррелирует с длиной свободного пробега.

Вараксин А.Ю.

Можно я закончу? Во-первых, размер частиц, поясните, потому что ваши выводы для какого-то размера, что будет, если частицы другого размера, более мелкие, более крупные. Безусловно, концентрация частиц в этом слое, какое-то значение назовите, потому что в зависимости от концентрации частиц та или иная математическая модель выбирается. Ну и вторая часть этого вопроса, тоже поясните, Ваш расчетный метод, в автореферате попала фраза, что Вы закон Стокса как-то использовали для вычисления динамики частиц и нахождения взаимодействия межфазного. В то же время у Вас фигурирует динамическое проскальзывание, тепловое проскальзывание, то есть у Вас двухскоростная двухтемпературная среда как Вы считаете, поясните, там работает закон Стокса, проверяли Вы для Вашего размера частиц?

Яковенко И.С.

Касательно первого вопроса, характеристики данного эксперимента сейчас приведу на слайде. Средний размер частиц выбирался постоянным, равным 1 микрону. При этом при различных концентрациях частиц варьировалась длина свободного пробега в частицах. Объем соответственно был тоже постоянным.

Вараксин А.Ю.

Объемная доля там десять в минус пятой? Там минус есть или нет?

Яковенко И.С.

Да, десять в минус пятой.

Вараксин А.Ю.

Ну, вот размер один микрометр, то есть, а будет больше, выводы тогда Ваши как?

Яковенко И.С.

Мы находились только в пределах параметров, допустимых в континуальной модели, только в этих. Если частиц сильно меньше, чем возможно при расчете по континуальной модели, метод Стокса здесь не использовался, именно в этой задаче. Метод Стокса использовался для задач о напылении частиц в подложку, потому что там концентрация совсем не велика. Поэтому можно было данным методом пользоваться.

Вараксин А.Ю.

Спасибо.

Председатель

Еще вопросы, пожалуйста. Если нет, Иван Сергеевич, я хотел бы вот какой вопрос задать. Вы сравнивали результаты двухмерного и трехмерного счета, и на одной из картинок у Вас было показано, что основные характеристики воспроизводятся. У меня один вопрос, связанный с граничными условиями. На первый взгляд кажется, что, по крайней мере, влияние граничных условий в двухмерном и трехмерном случае должно качественно, может качественно менять картину. Это раз. И, во-вторых, Вы показали, как Вы сравнивали результаты Ваших трехмерных расчетов с экспериментом, а как Ваши расчеты отличаются по тем характеристикам, которые Вы перечислили от двухмерных?

Яковенко И.С.

Понимаю вопрос.

Председатель

Какие вообще граничные условия стояли?

Яковенко И.С.

Граничное условие здесь ставится прилипание потока, адиабатические стенки по теплу и прилипание потока, по сути условие непротекания.

Председатель

Но тогда у Вас на одно прилипание меньше?

Яковенко И.С.

Конечно, да. В связи с этим процесс развивается более интенсивно, то есть по сути, если мы рассмотрим аналогичные двухмерные и трехмерные структуры фронта пламени. Вот на этом слайде я их изобразил, голубая поверхность это двухмерная структура в канале заданного сечения и трехмерная структура с прилипанием по оси Z. То есть мы видим, что торможение потока на верхней и нижней стенке в трехмерном случае к искажению структуры фронта пламени в направлении оси Z. То есть кроме того что поток искажается в направлении осей X Y, как в двухмерном случае, так и по оси Z. Размеры поверхности трехмерного фронта пламени, площадь поверхности всегда больше чем площадь поверхности двухмерного фронта. Экспоненциальная стадия развития процесса, которая имеет наиболее критическое отличие в двухмерном и трехмерном случаях, на слайде показаны аппроксимации двухмерного и трехмерного расчетов, она как раз определяется механизмом взаимной обратной связи, ростом поверхности фронта пламени и ускорением горения. То есть чем больше фронт, тем сильнее он растягивается и тем более интенсивен процесс ускорения. Взаимная обратная связь диктует экспоненциальную зависимость скорости от времени. В связи с этим для больших площадей поверхности в трехмерном случае наблюдается более интенсивное развитие процесса. В остальных параметрах, скажем после завершения экспоненциальной стадии, стадия менее интенсивного нарастания темпов скорости, она идентична по своей природе. В начальный момент времени, после поджигания смеси у закрытого торца формируется газодинамический поток перед фронтом, который за счет торможения на стенках канала. Вот здесь поверхностями зеленого цвета обозначены волны сжатия, они говорят о том каков профиль скорости в сечении канала. Вблизи стенок профиль резко падает, за счет граничного условия. Поток имеет практически постоянное значение в центре канала, постепенно спадает на границах.

Председатель

Иван Сергеевич, понятно, но так как Вы сказали, что кроме начальной стадии ни на что трехмерность не влияет. Тогда встает вопрос, действительно на больших временах вообще не нужно проводить трехмерные расчеты.

Яковенко И.С.

Дело в том что, параметры на конец начальной стадии, по сути определяют дальнейшее развитие процесса.

Председатель

Хорошо, тогда влияют на конечную стадию. Тогда до Вас все остальные расчеты плохо совпадали с экспериментом, а Вы показали прекрасное соответствие с экспериментами, по крайней мере тех тестовых расчетов.

Яковенко И.С.

Качественное, по крайней мере.

Председатель

То есть раньше было намного хуже, Ваше достижение, что совпали с экспериментом, возвращаясь к первому вопросу.

Яковенко И.С.

Трехмерных расчетов такого плана не проводилось раньше. То есть с детальной кинетикой, с реальными масштабами каналов, никто таких расчетов не проводил. Не было с чем сравнивать, впоследствии такие расчеты начали появляться.

Председатель

Спасибо. Еще вопросы есть? Тогда знаете, у меня один только вопрос, поскольку в автореферате и в вашем докладе много было иллюстраций каких-то параметров горения, и нигде не сказано каких. Что-то всплывает, фронт чего-то.

Яковенко И.С.

Фронт горения имеется в виду.

Председатель

Что это такое, у вас переменной горение нет, у Вас другие газодинамические переменные. Что-то вы нарисовали?

Яковенко И.С.

То есть, вы имеете в виду, какие параметры изображены на рисунках?

Председатель

В автореферате этого тоже нет.

Яковенко И.С.

В основном я рисовал везде температуру, то есть это температура продуктов горения, фронта пламени.

Председатель

Спасибо. Если больше вопросов нет, мы предоставим слово Михаилу Федоровичу. Извините, руководитель Михаил Федорович, отвлекитесь от беседы еще раз и сообщите нам Ваше мнение о соискателе.

Иванов М.Ф.

Наверное, соискатель может сесть. Иван пришел к нам, когда был еще студентом, и его отличительной чертой являлась потрясающая скромность, особенно в ранней молодости, которая мешала понять что за человек в своем интеллектуальном развитии. Было быть даже из-за этого несколько заниженное представление. Мы брали человека, который прекрасно умеет считать на компьютере и знает те программные средства, которые у нас не использовались. Потом начинает выясняться, что этот человек прекрасно знает английский, причем на столько, что с ним советуются ребята, которые кончили курсы синхронного перевода. Кроме того в наших работах, а они почти в основном все на английском, есть соавторы которые работают на западе, правда русские товарищи, но работают уже по двадцать лет, так это вообще было несравнимо. Их работы даже без участия Ивана, были времена, когда правил Иван. Потом вдруг выяснилось, что он прекрасно может быстро реализовать наши разработки, достаточно примитивно разработанные с точки зрения программного обеспечения, в современные программные коды, перенести все это на работу на суперкомпьютерах. То есть Иван считает у нас и в ВЦ Академии Наук, и на вот этом знаменитом Ломоносове. В конце концов постепенно выяснилось, что он перетягивает много того что мы сами не умеем делать, и без него делать наверное уже не сможем. Ну и наконец, когда пришло время не только получать результаты, но и их активно анализировать, выяснилось что его вклад в дискуссию, которая возникала, идет на равных с другими участниками. Поэтому моя оценка самая высокая, есть подозрение, что без него нам может даже будет очень трудно, потому что очень многое делает сейчас только он, потому что только он считает на суперкомпьютерах.

Председатель

А куда он уходит?

Иванов М.Ф.

Никуда не уходит, мы его и не отпустим, куда он уйдет? Так что я предлагаю ученому совету полностью его поддержать.

Председатель

Спасибо Михаил Федорович. По-моему характеристика исчерпывающе ясная дана. Михаил Михайлович, теперь, пожалуйста, Вы ознакомьте нас с отзывами, которые существуют.

Ученый секретарь

В качестве **ведущей организации** выбран ЦИАМ, **Центральный Институт Авиационного Моторостроения**. С вашего позволения я полностью отзыв зачитывать не буду, он на тринадцати листах. Остановлюсь только на его структуре и на замечаниях, которые были высказаны по работе. В отзыве обсуждается объем и структура работы, актуальность темы диссертации, научная новизна, апробация работы, достоверность результатов, научная значимость. Также в отзыве указаны замечания по работе:

первое замечание следующее: «При проведении трехмерных расчетов (см. главу 3) для стехиометрической водородно-кислородной смеси в канале предварительно моделировалось течение в канале меньшего поперечного сечения для трех разных случаев задания параметров в слое инициирования: воспламенение в слое без возмущения; регулярные малые возмущения поверхности нагретого слоя; случайные малые возмущения. Как следует из результатов, представленных на рисунке 3.1, топология поверхности фронта пламени различается существенно для трех рассмотренных случаев. Основной расчет для канала большего поперечного сечения проводился с заданием третьего типа условий (см. рисунок 3.3). В диссертации на стр.51 содержится

утверждение, что «динамика развития волны горения во всех трех случаях остается неизменной». Информации, иллюстрирующей это утверждение, к сожалению, в диссертации нет. Было бы полезно привести соответствующие данные, например, на рисунке 3.2 для динамики скорости и давления ведущей точки поверхности фронта пламени. Конечно, это связано с трудоемкими дополнительными расчетами. Но для канала меньшего поперечного сечения такие расчеты были выполнены, поэтому соответствующие результаты, иллюстрирующие вышеприведенное утверждение, могли бы быть представлены».

второе замечание: «Следует отметить, что для анализа роли волн сжатия в развитии горения в канале (раздел 3.1.2 диссертации), использовался «метод движущихся источников энерговыделения конечного размера». Этот метод используется также при интерпретации результатов и в разделе диссертации 3.2. Было бы целесообразно дать в диссертации краткое описание этого метода анализа результатов трехмерных расчетов»

третье замечание: «В диссертации в разделе 3.2 отмечается, что на завершающей стадии процесса ускорения пламени, предшествующего возникновению детонации, важную роль играет механизм, связанный с влиянием давления на время индукции водородно-кислородной смеси (см. обсуждение результатов на стр. 59, 60). В рассмотренном примере для анализируемых условий время индукции уменьшается с ростом давления. На рисунке 3.7 представлена соответствующая зависимость. В работе используются два реакционных механизма для окисления водорода. Возникает вопрос о влиянии кинетической модели на зависимость, представленную на рисунке 3.7. Этот вопрос важен и в связи с исследованиями, проведенными в разделе 3.2 диссертации».

Несмотря на замечания, в отзыве ведущей организации отмечено, что сделанные замечания и пожелания **не меняют общей положительной оценки выполненного исследования**. Отзыв подписан исполняющим обязанности начальника отделения 600 "Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и в элементах реактивных двигателей" **Копченовым Валерием Игоревичем** и утвержден научным руководителем - заместителем генерального директора **Ланшиным Александром Игоревичем**. Также на автореферат поступило **семь** отзывов, **все отзывы положительные**, имеются замечания.

(Первый отзыв) Отзыв из **Института Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской Академии Наук** составлен и подписан старшим научным сотрудником, доктором физико-математических наук **Фурсенко Романом Викторовичем**. По автореферату имеются замечания:

- «Автор связывает формирование ансамбля отдельных очагов и многоочагового режима горения бедной водород-воздушной смеси в основном с влиянием естественной конвекции. В тоже время, известно, что влияние диффузионно-тепловой неустойчивости, проявляющейся при малых числах Льюиса, приводит к аналогичному поведению пламени и в условиях отсутствия гравитационных сил, дана ссылка на публикацию. В связи с этим представляет интерес сравнительный анализ результатов, полученных в рамках моделей учитывающих и не учитывающих влияние сил гравитации».

- «В главе VI указано, что условия численного эксперимента соответствуют данным экспериментальной работы, приведена ссылка на работу. В тоже время, результаты сопоставления численных и экспериментальных данных в автореферате не приводятся и не обсуждаются».

(Второй отзыв) Второй отзыв также поступил из **Института Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН**, составлен и подписан заведующим лабораторией «Волновых процессов в ультрадисперсных средах», доктором физико-математических наук, **Федоровым Александром Владимировичем** и старшим научным сотрудником кандидатом наук **Бедаревым Игорем Александровичем**. Отзыв положительный с замечаниями:

- «При моделировании скоростной релаксации микрочастиц учитывается Стоксов закон сопротивления, который справедлив для низких скоростей обтекания. Однако за

детонационными волнами скорости потока достигают значительных величин. Почему автор не использовал достаточно простые аппроксимации закона сопротивления от чисел Маха и Рейнольдса, имеющиеся в литературе?»

- «В работе утверждается, что при ускорении пламени поток сохраняет ламинарный характер вплоть до перехода к детонации. Не споря с этим утверждением, вызывает сомнения, что такой вывод можно сделать на основе данных расчетов. Прямое численное моделирование перехода к турбулентности требует шага расчетной сетки меньше масштаба самых мелких вихрей. Из автореферата неясно, достаточен ли шаг расчетной сетки для описания этого явления?»

- «Не пытался ли автор оценить уровень энергии инициирования в задаче о формировании детонации с помощью внешнего источника изучения и сравнить эти значения с экспериментальными данными об энергии инициирования, доступными в литературе?»

(Третий отзыв) Третий отзыв поступил из **Института Химической Физики имени Н.Н. Семенова РАН**, составлен и подписан заведующим лабораторией доктором физико-математических наук **Ассовским Игорем Георгиевичем**. Отзыв положительный с замечаниями.

- «К недостатку автореферата можно отнести отсутствие в нем информации о границах областей применимости предложенных в диссертации теоретических моделей физико-химических процессов, а также сравнения полученного численного решения задачи о детонационной имплантации микронных частиц с результатами аналогичного физического эксперимента, приводится ссылка на эксперимент цитируемого в диссертации».

(Четвертый отзыв) Четвертый отзыв также из **Института Химической Физики имени Н.Н. Семенова РАН**, составил и подписал старший научный сотрудник кандидат физико-математических наук **Тереза Анатолий Михайлович**, отзыв положительный с замечаниями.

- «Не проведен анализ полных кинетических механизмов воспламенения и горения водородно-воздушных смесей и обусловленность выбранного для численного моделирования кинетического механизма с учетом диапазонов температуры, давления и концентраций в исследуемых условиях».

- «Недостаточно полно проведено сравнение результатов тестов водородно-кислородной стехиометрической смеси приведенное в таблице 1 главы 2. Известно, что экспериментальные значения измеряемой задержки воспламенения водородно-воздушных и водородно-кислородных смесей для разных экспериментальных условий сильно отличаются, приводится ссылка на статью».

(Пятый отзыв) Пятый отзыв поступил из **Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана**, составлен и подписан заведующим лабораторией «Терагерцовой оптотехники» кандидатом физико-математических наук **Юрченко Станиславом Олеговичем**, отзыв положительный с замечаниями.

- «На мой взгляд, автору следовало бы больше внимания обратить на поиск общих физических механизмов, управляющих переходом между различными скоростными режимами горения. Результаты работы позволяют сделать ряд общих выводов об условиях возникновения пульсаций давления и неустойчивости фронта, ведущей к его ускорению».

- «Автореферат содержит ряд пунктуационных ошибок».

(Шестой отзыв) Шестой Отзыв, **Тель-Авивский Университет**, Государственный Институт, составил и подписал кандидат технических наук, научный сотрудник отдела «Точных наук», **Каган Леонид Семенович**. Отзыв положительный с замечаниями.

- «По результатам модельных расчетов автора метод КАБАРЕ даёт существенно лучшие результаты, чем ЭЛМ. Однако все физически значимые задачи выполнены с помощью ЭЛМ».

- «Использование относительно полного набора физических факторов предполагает

количественное сравнение результатов расчета и соответствующих экспериментов. Однако это сравнение отсутствует в работе».

(Седьмой отзыв) Седьмой отзыв. **Колледж Инженерии и Минеральных Ресурсов Западной Вирджинии**, составил и подписал кандидат физико-математических наук, младший профессор кафедры «Машиностроения и аэрокосмоса», **Аккерман Вячеслав Борисович**, отзыв положительный с замечаниями.

- «В четвертой главе автореферата (стр.12) упомянуты экспериментальные данные по воспламенению газозвеси при воздействии источника внешнего излучения, полученные в установке, аналогичной рассмотренной в диссертации. Однако в тексте автореферата не указано, было ли проведено сравнение результатов моделирования с данными экспериментов и каков полученный результат, если сравнение проводилось».

- «Аналогично на стр. 17 автореферата описана процедура адаптации численного метода КАБАРЕ для решения газодинамики реагирующих потоков и указано на проведение верификации данной методики на задаче о стационарном дозвуковом ламинарном распространении пламени. Однако, в тексте автореферата нет данных о сравнении результатов моделирования детонационных волн и сравнении получаемых результатов с параметрами Чепмена-Жуге».

Все, спасибо.

Председатель

Спасибо Михаил Михайлович. Иван Сергеевич, у вас время есть на ответы. Я вас попрошу вот что сделать, есть группа вопросов, которые можно сказать пожелания. Чего-то они не нашли в автореферате или в диссертации, я думаю с этим надо согласиться. То есть не надо их перечислять снова, мы их слышали. Ну и потом по возможности, другие замечания как-то сгруппировать, потому что, например, относительно сравнения с экспериментом, мы уже обсуждали.

Яковенко И.С.

Да, это достаточно распространенный вопрос, с Вашего позволения я с него и начну. Дело в том, что в автореферате приводятся слова о том, что задача об иницировании детонации в газозвеси со слоем взвешенных частиц проводилась в постановке, аналогичной постановке, рассмотренной экспериментально Берковицем. Дело в том, что работа на которую я ссылаюсь, в ней была использована смесь этилен-воздух, в качестве взвешенных частиц выступали одностенные углеродные нанотрубки и была использована ксеноновая лампа вспышка с температурой излучения 5800 К. Именно параметры источника были взяты оттуда. В этой работе была продемонстрирована возможность воспламенения этилен-воздушной смеси, в последующих работах с использованием той же ксеноновой лампы-вспышки была продемонстрирована возможность иницирования детонации смеси в канале. Из этих работ по сути были взяты параметры источника. Моделирование таких экспериментов достаточно затруднительно потому что одностенные углеродные нанотрубки обладают неизвестной нам кинетикой окисления. Думаю, это проясняет возникшие вопросы. Далее, наверное, я продолжу с вопросов от ведущей организации. Первый вопрос был связан с анализом различных возможных вариантов воспламенения смеси в полукрытом канале. Действительно, в диссертации сказано, что динамика процесса аналогична во всех случаях. Здесь я привожу динамические графики.

Председатель

Иван Сергеевич, или погромче, или Михаил Федорович потише.

Яковенко И.С.

Действительно, давление в ведущей точке фронта пламени и скорость ведущей точки практически аналогичны во всех трех случаях. При этом случай с нерегулярными

возмущениями был выбран, так как наиболее приближен к экспериментальным возможностям воспламенения смеси. Далее, вопрос о модели точечного источника энерговыделения. На самом деле это не совсем модель, это прием для интерпретации полученных результатов. Дело в том, что фронт может быть представлен как конечной ширины зона энерговыделения и пространственно протяженный фронт пламени состоит из точечных источников энерговыделения, которые при своем движении излучают волны сжатия, как в сторону свежей смеси, так и в сторону продуктов горения. Используя принцип Гюйгенса-Френеля, мы можем воспроизвести структуры фронтов сжатия с одной стороны, с другой стороны мы можем рассматривать влияние волн сжатия как уходящих вниз по потоку, так и восходящих вверх. Данная методика не является новой и использована в классических работах, в частности работах Оппенгейма, откуда взят этот рисунок. Волновая диаграмма процесса ускорения пламени, в аналогичных терминах источника энерговыделения анализируется процесс ускорения.

Председатель

В принципе мне представляется, что общая картина нам ясна, поэтому я думаю, что и на основные вопросы вы ответили, поэтому я предлагаю предоставить слово оппонентам, и соответственно первый у нас официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор Василий Михайлович Головизнин.

Головизнин В.М.

Не совсем верно назначить меня первым оппонентом, поскольку именно задачами горения я занимался в достаточно не большой степени. Я больше вычислитель, поэтому и мое отношение к этой диссертации это отношение человека который занимается разработкой подходов к решению такого рода сложных задач.

Председатель

Это важнейшая часть диссертации, так что ничего тут предосудительного нет

Головизнин В.М.

Все-таки эта диссертация не по вычислительной математике, и не по математическому моделированию, а вот как тут написано по теплофизике и теоретической теплотехнике. Но тем не менее, раз уж так получилось, напомним что когда многие из нас начинали свой путь в науке быстродействие БЭСМ-6 составляло где-то десять в шестой операций в секунду, на сегодняшний день это десять в шестнадцатой операций в секунду на продвинутых кластерах, итого десять порядков. За несколько десятилетий наши вычислительные возможности выросли в такое, очень большое, астрономическое я бы сказал количество раз. И конечно же, возможности, которые появились у физиков, химиков, всех прикладников решать свои задачи тоже безусловно выросли. Особенно это касается задач химической кинетики, реагирующих потоков и вот эти задачи относятся к классу критической точности. Если точность вычислений меньше некоторого порога, пороговой точности, то качественно даже не получается результат. А вот если этот порог пройден, то там то и начинается уже реальное описание тех физических явлений которые происходят. Поэтому можно сказать, что вычислительная теория горения и детонации, она в наше время только начинает реально развиваться. И вот это одна первых и на мой взгляд очень ярких работ в этой области. Она комплексная, одно дело сделать какой-то один модуль описания какого-то процесса, а тут участвует и химический модуль и перенос излучения и сам по себе гидродинамический блок. И даже если взять полностью готовые эти блоки, то сама по себе задача сопряжения их, верификации, что они после этого начнут работать правильно, а уж тем более задача валидации, чтобы уточнить какие-то константы которые туда входят это безусловно сам по себе очень тяжелый и высококвалифицированный научный труд. Плюс к этому еще исследования нужно проводить каких-то задач, которые имели бы реальное... ну смысл что ли. Чтобы их

можно было использовать в практике. Но когда то лет 20 назад я помню на одном из юбилеев Белоцерковского Олега Михайловича, Владимир Евгеньевич, после доклада Олега Михайловича было его слово, он сказал: «Вот сейчас Вам Олег Михайлович рассказал вам, как нужно использовать законы сохранения, основные законы сохранения, в вычислениях. А все остальное буду рассказывать я». Действительно, в то время, кроме того, что надо писать разностные схемы, которые бы сохраняли импульс, массу и энергию, в общем-то, больше ничего фактически и не было. Но за последние годы, в этом произошли некоторые изменения и уже начали разбираться в более тонкой структуре, вот этих вычислительных алгоритмов. Стали пытаться управлять и диссипативными свойствами, дисперсионными свойствами. И на этом пути были достигнуты определенные результаты. Во-первых, это те алгоритмы высокой разрешающей способности, которые были разработаны в Соединенных Штатах главным образом, но и наш ответ на все это дело это разработка схемы Кабаре. Это новый класс численных алгоритмов, который совмещает преимущества как консервативных методов, сохраняются все законы сохранения, так и характеристических, что раньше никогда не удавалось сделать. Либо характеристические, либо консервативные, тут все в одном флаконе. Это дало очень серьезный позитивный эффект. Вот схема КАБАРЕ как выяснилось, обладает свойством временной обратимости, на течениях в которых характеристики одного семейства не пересекаются. Ну, например на акустике. Акустические возмущения эта схема совершенно не давит. Ну и очень интересное и важное свойство, это очень точное вычисление вихрей. Стационарные вихри двухмерные эта схема вообще не давит, то есть они могут вращаться, если устойчивость позволяет, бесконечно долго. И вот это соединение этих качеств в одной схеме оно позволяет даже в рамках того же второго порядка аппроксимации, как и у схемы Белоцерковского-Давыдова получать качественно другие эффекты. Когда я лет 10-15 тому назад впервые попробовал использовать схему КАБАРЕ для решения детонационных задач, то обнаружил, что та детонационная волна, которую я взял из солидной публикации, она у меня не идет, она распадается. Ударная волна убегает вперед. Искал ошибку, не мог найти. Потом ввел очень маленькую теплопроводность. Все заработало, как у других. Это поставило меня в тупик, действительно это так или это какие-то артефакты схемные. Вот в данной работе это явление получило некоторое качественное объяснение. Что инициация детонационной волны рассчитанная по разным схемам, она отличается по энергии в три раза по-моему. И тут видимо причина именно в том, что те диссипативные процессы, которые заложены в обычных схемах, они делают детонационную пару более устойчивой и поэтому не совсем верно отражают физику дело. Поэтому сейчас возникло предложение очень детально исследовать этот процесс, который видимо мы и дальше будем продолжать. Так относительно замечаний. Я отметил чисто формально несколько замечаний, и они мало содержательны, но тем не менее я должен их зачитать. Первое – диссертация хорошо структурирована и написана хорошим русским языком. На этом фоне бросается в глаза словечко «проумотировать», неоднократно используемое автором в процессе изложения. Следовало бы заменить его на эквивалентное по смыслу словосочетание русского языка. Дальше, на странице 102 диссертации, при описании этапов расчетного алгоритма для схемы КАБАРЕ написано: «Недостающие значения потоковых переменных на новом временном слое вычисляются из уравнения состояния». В опубликованных ранее материалах с описаниями схемы КАБАРЕ такого элемента в алгоритме не содержится. Может быть это какой-то новый элемент? Следовало бы более подробно описать эту новацию. Ну и далее, при описании этапов реализации схемы КАБАРЕ пропущен один из этапов. На этом все мои замечания заканчиваются. Работа конечно очень хорошая, я бы сказал неординарная работа, поэтому я призываю всех членов ученого совета поддержать.

Председатель

То есть Вы другими словами, будем считать произнесли, что безусловно диссертация соответствует всем требованиям положения о присуждении ученых степеней?

Головизнин В.М.

Да да, безусловно, это содержится в отзыве.

Председатель

Хорошо, спасибо Василий Михайлович. Вопросов нет? Можно я Вас спрошу, был вопрос в одном из отзывов, и Вы сейчас подчеркнули, что метод расчета КАБАРЕ, он имеет преимущества, о недостатках вообще не говорили. А почему-то все-таки большая часть работы выполнена с использованием другого кода. В чем тут все-таки дело?

Головизнин В.М.

Это исторически как я понимаю

Председатель

То есть поздно перешли.

Головизнин В.М.

Они много по другому коду работали, а теперь они в процессе перехода.

Председатель

А по поводу временных и ресурсных затрат. Как тут, можно сравнить КАБАРЕ с классическими [методами]?

Головизнин В.М.

Одно и то же практически.

Председатель

Одно и то же? Спасибо большое. Мы переходим к заслушиванию мнения другого оппонента, Медведева Сергея Павловича. Ой, извините пожалуйста, ответы должны следовать сразу, я просто думал также как со всеми.

Яковенко И.С.

Наверное, я начну отвечать на второй вопрос, первый это замечание и рекомендация, и я постараюсь ей следовать в дальнейшем. Касательно второго вопроса, здесь я описал на данных слайдах методику КАБАРЕ по сути в её классическом представлении. Отвечая сразу на третий вопрос о том, что я пропустил этап экстраполяции римановых инвариантов, я не отступал от классических работ Василия Михайловича Головизнина и поэтому не счел нужным описывать этот этап в своей работе, он идентичен предыдущим работам. Касательно нахождения недостающих потоковых величин, дело в том, что для того чтобы перейти на заключительный этап вычисления по консервативной схеме величин в центрах расчетных ячеек необходимо знать значение потоковой величины полной энергии, которую мы из римановых инвариантов найти не можем. И данная процедура до меня была описана в работах по адаптации метода КАБАРЕ для многокомпонентных смесей, так что здесь я также ничего нового не вносил.

Председатель

Спасибо. Сергей Павлович, пожалуйста, теперь Вас слушаем.

Медведев С.П.

Добрый день уважаемые коллеги! Я представляю институт химической физики имени Семенова, где традиционно проводятся интенсивные экспериментально-теоретические исследования процессов горения в трубах, которые мы сегодня обсуждаем. Актуальность представленной нам диссертации, её темы не вызывает сомнения, хотя бы

уже потому что основной предмет исследования данной диссертации это водород. Водород отличается от известных горючих сред своей большой склонностью к детонации, нестандартной зависимостью задержки воспламенения от давления и температуры и рассматривается как перспективное топливо в двигателях будущего, а также при рассмотрении проблем взрывобезопасности на атомных станциях. Касательно самой диссертации она вполне логично построена на мой взгляд. Первые две главы задают теоретическую базу для исследований, приведены основные уравнения, приведены данные верификации. Последующие две главы - это примеры применения данных расчетных комплексов для конкретных процессов горения и взрыва, ну а заключительная глава, сравнение с методом КАБАРЕ, возвращает нас к теоретическим основам, но уже на другом уровне, и она очень важна я считаю для будущих исследований диссертанта. Я хотел бы остановиться на двух моментах – прикладном и фундаментальном. Первый момент связан со словом «взрывобезопасность», которое, в общем-то, сегодня вы слышали. Что такое взрывобезопасность с точки зрения ученых, которые проводят исследования. Последние годы, на мой взгляд, имеется разрыв, между теми проблемами, которые решают ученые в лабораториях, и насущными проблемами, которые необходимо решать для конкретных производств, для атомных станций, для обеспечения их взрывобезопасности. То есть, по-прежнему, предлагаются в качестве предмета исследования некие фундаментальные процессы горения и взрыва, выявление различных закономерностей, получение новых данных, которые к взрывобезопасности, с точки зрения чиновников, которые рассматривают эти данные и собираются их финансировать, имеют малое отношение. По своему опыту общения с представителями и чиновниками Росатома например, который заинтересован в решении проблемы водородной взрывобезопасности на АЭС, стандартным вопросом является в том, а какую прибыль принесут наши исследования для Росатома. Здесь конечно, оставляя в стороне саму абсурдность постановки этого вопроса, я хотел бы сказать, что при рассмотрении вопроса взрывобезопасности речь идет не о прибыли, а о том, как избежать убытков.

Председатель

Об ущербе.

Медведев С.П.

Поскольку любая ситуация, связанная с взрывом водорода, на атомной станции в частности, это абсолютное экологическое явление, которое приводит, как известно, к помимо неопределимым человеческим потерям и к большим экономическим потерям. Поэтому возникает вопрос, какое отношение имеют данные работы, на примере данной диссертации в частности, расчетные к практическим задачам? Что такое взрывобезопасность, как понять это слово? Взрывобезопасность можно сформулировать очень просто – это необходимость снижения взрывных нагрузок, которые возникают при реагировании, скажем, водородно-воздушных смесей, нагрузок на окружающие конструкции, на купол реакторного зала и так далее. В данной работе мы имеем фундаментальные закономерности, но они, тем не менее, имеют непосредственное отношение к взрывобезопасности. Например, в зависимости скорости пламени от расстояния, если вы обратили внимание, на другой координате отложены давления. Соответственно мы можем сопоставить скорость пламени и давление. Как в 2D так и в 3D расчетах получается так, что при достижении скорости пламени 400 метров в секунду давление при этом составляет порядка 6 атмосфер, происходит резкий скачок, переход в детонацию. Тест уже давление 12 – 20 бар. Интересно, что этот результат не отмечается самим диссертантом, но он абсолютно соответствует экспериментальным данным, которые имеются в литературе. В частности исследования Кузнецова по детонации в полуограниченных объемах, как раз в тех условиях, которые рассматриваются как сценарии аварии на атомных станциях. Поэтому здесь просто уже из этого графика возникает простой практический вывод, как обеспечить безопасность. Надо снижать

нагрузки. Уже само снижение нагрузки до скоростей пламени ниже 400 метров в секунду приведет к скачкообразному изменению с 12 – 20 атмосфер до давлений менее 6 бар. Дальше уже могут рассматриваться меньшие диапазоны давления. То есть задачей теоретика в данном случае является понять, какие нужно применить средства, способы, например разбавление смеси, введение инертных микрочастиц введение инертных газов, как они повлияют на взрывные нагрузки. И в этом работе данный программный комплекс, который создан Иваном Сергеевичем, он вполне уже готов к практическому применению, именно в этом плане. Остается только заполнить его идеями снижения взрывных нагрузок, поскольку сам комплекс работает правильно, отвечает экспериментальным данным, правильно описывает взрывные нагрузки, мы уже можем начинать с ними бороться. Другой способ это просто непосредственная защита каких-то объектов, от тех же взрывных нагрузок, которые наблюдаются. Это тот комплекс к этому тоже приспособлен, например какие-то покрытия, взрывозащитные экраны, тоже могут быть исследованы в рамках этого комплекса. Таким образом, практическая ценность данных исследований, я считаю, несомненна, но просто их нужно преподать в нужном виде. То есть обоснованно экспериментально, обосновать свои результаты экспериментом и предложить, как это может быть использовано для решения проблем взрывобезопасности. Второй момент, диссертация очень многогранна, поэтому я выделю только один момент, ту часть работы, которая посвящена инициированию детонации в системе газ-твердые частицы путем создания градиента температуры. Здесь интерпретация расчета проведена в рамках теории инициирования детонации по градиентному механизму Якова Борисовича Зельдовича, выдвинутого еще в семидесятом году, и что можно сказать. Эта теория известна, но вот например в обзоре Бартеньева и Гельфанда в двухтысячном году по спонтанному инициированию детонации отмечается что не существует прямых доказательств этой теории. Все эксперименты, все проводимые исследования, они дают косвенные доказательства. Теория хорошая, но прямых экспериментов доказательств нет. Их нет и до сих пор. Но в данном случае, чем ценна работа Ивана Сергеевича, фактически он предлагает экспериментаторам новый способ проверки этой теории, на основе создания градиента с помощью частиц. Я считаю, что это очень оригинальная идея, которая должна быть осмыслена именно экспериментаторами, поскольку аналогичных экспериментов, в общем-то, никогда не проводилось. В общем-то, остается мне сказать про замечания, которые высказаны у меня в отзыве, но все эти замечания уже фактически повторялись здесь неоднократно. Это почему в двухмерных расчетах есть отличие от двухмерных, на мой взгляд, я согласен с мнением председателя, что здесь важно упомянуть значение пограничных слоев в условиях трехмерных расчетов. Также возникают вопросы насчет вывода о том, что течении полностью ламинарно вплоть до перехода в детонацию. Как пример было бы целесообразно показать, что данный пакет, данный программный комплекс хорошо рассчитывает известные турбулентные течения, тогда уже можно переносить эти данные на ламинарность. Федоров из ИТПМ отмечал, что в принципе на тех сетках, что используются это достаточно большой размер. Ну про сравнения с экспериментом уже было сказано. Ну а на счет сетки, это большая тема для всех расчетчиков, то есть конечно мы не можем уменьшать сетку, есть какие-то пределы разумные машинного времени, но на самом деле, для решения практических задач, это и не нужно. То о чем я говорю, взрывные нагрузки, они могут быть спокойно посчитаны на тех сетках, которые использует Иван Сергеевич, в разумное время. Эти расчеты могут быть представлены в виде данных, в виде упрощенных программных комплексов, которые могли бы использовать инженеры. Потому что на настоящем этапе ситуация такая, что в общем-то и раньше и частично сейчас ученые думают, что их фундаментальные исследования, они делают чисто фундаментальные исследования, а потом уже какой-то проектный институт должен внедрять эти исследования в виде каких-то рекомендаций, способов и так далее. Реальная ситуация заключается в том, что к сожалению а может быть к счастью для того чтобы получить достаточное финансирование, сейчас ученые должны сразу думать над технологией, и в данном случае, такие расчетные комплексы,

как предлагает Иван Сергеевич, они позволяют фактически создать новые технологии взрывозащиты, в частности при взрывах водорода. В целом диссертация я считаю очень достойная и соответствует всем требованиям ВАК всем положениям о порядке защиты, а Иван Сергеевич Яковенко полностью заслуживает присуждения степени кандидата физ-мат наук.

Председатель

Спасибо большое Сергей Павлович. Пожалуйста, вопросы оппоненту я так понимаю.

Савватимский А.И.

Хотел задать общий вопрос, он очень важен, поэтому я осмелился Вам его задать, пока специалист перед нами. При подземных выработках стоят датчики на метан, один из авторов, Дюгонский в Петербурге, писал, что в большинстве случаев взрывается водород, и приводит соответствующую цепочку формул. Вот как Вы считаете, есть основания к этой позиции, что надо обратить внимание на водород, а не на метан?

Мелведев С.П.

Да, есть основания, но не на столько. То есть водорода там выделяется не более 3-4 процентов, другое дело, что образуется смесь водорода и метана, и в ней совсем могут быть другие пределы воспламенения, они расширяются.

Савватимский А.И.

Спасибо

Председатель

Спасибо большое, спасибо Сергей Павлович. Пожалуйста, Иван Сергеевич.

Яковенко И.С.

Наверное, к вопросу о различии двухмерных и трехмерных расчетов я не буду возвращаться. Повторюсь опять же, что наличие пограничного слоя на верхней и нижней стенке канала приводит к большему нарастанию поверхности фронта пламени, что интенсифицирует процесс горения. Далее хотелось отметить возможности расчета турбулентных течений по данной методике. Ранее в работе Иванов, Иванов в 2010 в мат. моделировании были приведены следующие результаты расчетов по турбулентному течению на фазе сжатия внутри двигателя внутреннего сгорания и представлены эволюции аксиального интегрального масштаба корреляций турбулентных пульсаций скорости в камере сгорания вблизи мертвой зоны. Также на расчеты нанесены экспериментальные данные из экспериментальной работы Брайера 2005 года и как мы видим, они очень хорошо друг друга воспроизводят, что говорит о том, что эйлерово-лагранжев метод адекватно описывает турбулентные течения даже такой сложной природы.

Председатель

Спасибо. Мы сейчас должны дискуссию провести. Кто хочет высказаться? Какие-нибудь соображения.

Еремин А.В.

Должен сказать, что я достаточно неплохо знаком не только с работами Ивана Сергеевича, но и вообще со всем циклом работ, который ведется в команде Михаила Федоровича, Киверина и Яковенко. И эта команда, конечно, занимает лидирующие позиции в мире по численному моделированию газодинамики с горением и детонацией, особенно в трехмерном моделировании и это общеизвестно. Но вот есть одна сторона,

достоинство их работ, которое может быть недостаточно хорошо прозвучало сегодня в докладе и даже в диссертации как-то не достаточно акцентировано, а для меня оно представляет очень важное достоинство этой работы – то, что в большинстве газодинамических расчетов очень упрощенное отношение к кинетике. Какое-то время, с чем всем известный Вилен Вагаршович Азатян сражается, вообще всю кинетику сводили к одной реакции. Ну, это уже вообще совершенно отсталый подход, но обычно сложные газодинамические модели не дают возможности включить полные кинетические схемы. Скажем, для горения водорода обычно пишут девять реакций Зельдовича и этим ограничиваются. Насколько я знаю цикл работ, в котором важная заслуга принадлежит диссертанту, он создал возможность включить кинетику в полном масштабе. Непосредственно в эти модели, конечно, такой пакет впихнуть было бы не возможно, но они используют всю методику, чтобы кинетику считать достаточно полно и аккуратно. И это создает достаточно большие перспективы для той работы, которую они ведут. Я не понаслышке знаю, что эти работы продолжаются, идут в самых разных направлениях. Моделировать такие сложные процессы как горение, переход от медленного горения в детонацию, на современном уровне, нужно с аккуратным знанием кинетики, с аккуратным учетом кинетики, я знаю, что там уже могут быть сотни реакций, сотни компонент учитываться, в этих моделях. Это огромное достоинство этой работы. Поэтому хотелось бы, чтобы это тоже было как-то отмечено и в целом конечно работа замечательная, я призываю всех членов совета голосовать «за».

Председатель

Спасибо. Александр Викторович, а сколько у Ивана Сергеевича уравнений?

Еремин А.В.

А это зависит от задачи.

Яковенко И.С.

Используются схемы из 19 реакций, из 21 реакции. Это классические схемы, по параметрам они практически не отличаются.

Председатель

Спасибо, еще есть желающие высказаться? Как я понимаю, отсутствие желающих высказаться иллюстрирует полную ясность вопроса, поэтому давайте мы перейдем к счетной комиссии. А, нет, заключительное слово, что же мы сегодня ограничиваем Вас. Заключительное слово.

Яковенко И.С.

Я благодарю уважаемых членов диссертационного совета, за то что заслушали мою работу, прокомментировали, высказали свои положительные оценки и замечания, которые я обязательно учту в своей дальнейшей работе. Пожалуй, на этом все. Спасибо большое.

Председатель

Спасибо. Мы должны выбрать счетную комиссию, у меня предложение: Еремин, Савватимский, Воробьев. Кто против? Нет? Прошу проголосовать. *(Счетная комиссия выбирается единогласно)*. Тогда мы переходим к голосованию, а счетную комиссию прошу к работе. *(Проводится процедура тайного голосования)*.

Председатель

Уважаемые члены ученого совета и все присутствующие, прошу минутку внимания. Счетная комиссия в лице председателя Александра Викторовича Еремена готова огласить результаты. Пожалуйста.

Еремин А.В.

Уважаемые члены диссертационного совета, по результатам голосования вот что было обнаружено. Роздано бюллетеней **21**, осталось не роздано **10**, оказалось в урне **21** бюллетень. Из них **20** за, против нет, недействительных **1**.

Председатель

Спасибо Александр Виктрович. Мы должны утвердить. Кто за то чтобы утвердить результаты голосования (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*). И заодно поздравить диссертанта.

Обсуждение проекта заключения. Кто-нибудь посмотрел заключение? И кто-нибудь хочет сказать что-нибудь? Иван Сергеевич первое техническое замечание, написать фамилию одно из написавших отзыв на автореферат. Предлагаю в целом проголосовать за проект заключения, если в процессе окончательной доработки возникнут вопросы, Иван Сергеевич, я надеюсь, что Вы учтете. Кто за заключение с замечаниями, которые были указаны? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно. (*Проект заключения принят единогласно*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 31.05.2017 протокол № 6

О присуждении Яковенко Ивану Сергеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Режимы распространения пламени в химически активных газах и газовзвесьях» в виде рукописи по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника, принята к защите 20.03.2017г., протокол № 3, диссертационным советом Д 002.110.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, iht.ru, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Яковенко Иван Сергеевич 1989 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В 2017 году окончил очную аспирантуру МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, заведующий отделом №4.3 – вычислительной физики, Иванов Михаил Федорович, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, НИЦ-4.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, Головизнин Василий Михайлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, отдел перспективных исследований и математического моделирования, заведующий отделом;

доктор физико-математических наук, Медведев Сергей Павлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН), лаборатория гетерогенного горения, заведующий лабораторией.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (г. Москва), в своем положительном заключении, составленном и.о. начальника отделения 600 «Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и элементах реактивных двигателей», кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником Копченовым В.И. (утвержденном научным руководителем-заместителем генерального директора Федерального

государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» д.т.н. старшим научным сотрудником Ланшиным А.И.), отметила актуальность, научную новизну, достоверность результатов работы, научную и практическую значимость работы. По диссертации имеются следующие замечания:

1. При проведении трехмерных расчетов (см. главу 3) для стехиометрической водородно-кислородной смеси в канале предварительно моделировалось течение в канале меньшего поперечного сечения для трех разных случаев задания параметров в слое инициирования: воспламенение в слое без возмущения; регулярные малые возмущения поверхности нагретого слоя; случайные малые возмущения. Как следует из результатов, представленных на рисунке 3.1, топология поверхности фронта пламени различается существенно для трех рассмотренных случаев. Основной расчет для канала большего поперечного сечения проводился с заданием третьего типа условий (см. рисунок 3.3). В диссертации на стр.51 содержится утверждение, что «динамика развития волны горения во всех трех случаях остается неизменной». Информации, иллюстрирующей это утверждение, к сожалению, в диссертации нет. Было бы полезно привести соответствующие данные, например, на рисунке 3.2 для динамики скорости и давления ведущей точки поверхности фронта пламени. Конечно, это связано с трудоемкими дополнительными расчетами. Но для канала меньшего поперечного сечения такие расчеты были выполнены, поэтому соответствующие результаты, иллюстрирующие вышеприведенное утверждение, могли бы быть представлены.

2. Следует отметить, что для анализа роли волн сжатия в развитии горения в канале (раздел 3.1.2 диссертации), использовался «метод движущихся источников энерговыделения конечного размера». Этот метод используется также при интерпретации результатов и в разделе диссертации 3.2. Было бы целесообразно дать в диссертации краткое описание этого метода анализа результатов трехмерных расчетов.

3. В диссертации в разделе 3.2 отмечается, что на завершающей стадии процесса ускорения пламени, предшествующего возникновению детонации, важную роль играет механизм, связанный с влиянием давления на время индукции водородно-кислородной смеси (см. обсуждение результатов на стр. 59, 60). В рассмотренном примере для анализируемых условий время индукции уменьшается с ростом давления. На рисунке 3.7 представлена соответствующая зависимость. В работе используются два реакционных механизма для окисления водорода. Возникает вопрос о влиянии кинетической модели на зависимость, представленную на рисунке 3.7. Этот вопрос важен и в связи с исследованиями, проведенными в разделе 3.2 диссертации.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном Институте Высоких температур РАН, в Институте физической химии им. Н.Н. Семенова РАН, в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов, в Центральном институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова и во многих других научных и промышленных учреждениях.

Соискатель имеет 10 статей в реферируемых журналах (10 из них в журналах из списка ВАК), более 20 тезисов в сборниках трудов конференций:

Основные работы:

1. Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Liberman M.A. Hydrogen-oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. Vol. 38, no. 36. – Pp. 16427-16440

2. Голуб В.В., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. О детонационно-индуцированной имплантации микрочастиц в подложку // Письма ЖТФ. – 2014. – Т. 40, №20. – С. 88-95.

3. Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. The role of compression waves in flame acceleration and transition to detonation inside confined volumes // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653 – P. 012062.
4. Efremov V.P., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Direct initiation of gaseous detonation via radiative heating of microparticles volumetrically suspended in the gas // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – P. 012061.
5. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Modes of choked flame instability defined by the peculiarities of combustion kinetics at rising pressure // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – P. 012061
6. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Влияние газодинамических процессов на развитие горения вблизи концентрационных пределов воспламенения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – Т. 6. – С. 85-98.
7. Ефремов В.П., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц // Письма ЖТФ. – 2016. – Т. 42, №4. – С. 52-59.
8. V.P. Efremov, M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, I.S. Yakovenko Mechanisms of direct detonation initiation via thermal explosion of radiatively heated gas-particles layer // Results in Physics. – 2015. – Vol. 5. – Pp. 290 – 296.
9. M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, S.G. Pinevich, I.S. Yakovenko Application of dissipation-free numerical method CABARET for solving gas-dynamics of combustion and detonation // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 754. – P. 102003.
10. I.S. Yakovenko, A.D. Kiverin, S.G. Pinevich, M.F. Ivanov Role of numerical scheme choice on the results of mathematical modeling of combustion and detonation // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 774. – P. 012093

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., Фурсенко Роман Викторович) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Автор связывает формирование ансамбля отдельных очагов и многоочагового режима горения бедной водород-воздушной смеси в основном с влиянием естественной конвекции. В тоже время, известно, что влияние диффузионно-тепловой неустойчивости, проявляющейся при малых числах Льюиса, приводит к аналогичному поведению пламени и в условиях отсутствия гравитационных сил (W. Gerlinger et. Al. // Comb. Flame 2003). В связи с этим представляет интерес сравнительный анализ результатов, полученных в рамках моделей учитывающих и не учитывающих влияние сил гравитации.

- В главе VI указано, что условия численного эксперимента соответствуют данным экспериментальной работы (Berkowitz A.M. et. Al. // Proc. Comb. Inst., 2011). В тоже время, результаты сопоставления численных и экспериментальных данных в автореферате не приводятся и не обсуждаются.

2. ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (заведующий лабораторией “Волновых процессов в ультрадисперсных средах”, д.ф.-м.н. Федоров Александр Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Бедарев Игорь Александрович) – отзыв положительный, с замечаниями:

- При моделировании скоростной релаксации микрочастиц учитывается Стоксов закон сопротивления, который справедлив для низких скоростей обтекания. Однако за детонационными волнами скорости потока достигают значительных величин. Почему автор не использовал достаточно простые аппроксимации закона сопротивления от чисел Маха и Рейнольдса, имеющиеся в литературе?

- В работе утверждается, что при ускорении пламени поток сохраняет ламинарный характер вплоть до перехода к детонации. Не споря с этим утверждением, вызывает сомнения, что такой вывод можно сделать на основе данных расчетов. Прямое численное

моделирование перехода к турбулентности требует шага расчетной сетки меньше масштаба самых мелких вихрей. Из автореферата неясно, достаточен ли шаг расчетной сетки для описания этого явления?

- Не пытался ли автор оценить уровень энергии инициирования в задаче о формировании детонации с помощью внешнего источника изучения и сравнить эти значения с экспериментальными данными об энергии инициирования, доступными в литературе?

3. ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., Ассовский Игорь Георгиевич) - отзыв положительный, с замечаниями:

- К недостатку автореферата можно отнести отсутствие в нем информации о границах областей применимости предложенных в диссертации теоретических моделей физико-химических процессов, а также сравнения полученного численного решения задачи о детонационной имплантации микронных частиц с результатами аналогичного физического эксперимента (Berkowitz A.M. et. al. // Proc. Comb. Inst., 2011) цитируемого в диссертации.

4. ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Тереза Анатолий Михайлович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Не проведен анализ полных кинетических механизмов воспламенения и горения водородно-воздушных смесей и обусловленность выбранного для численного моделирования кинетического механизма с учетом диапазонов температуры, давления и концентраций в исследуемых условиях.

- Недостаточно полно проведено сравнение результатов тестов водородно-кислородной стехиометрической смеси приведенное в таблице 1 главы 2. Известно, что экспериментальные значения измеряемой задержки воспламенения водородно-воздушных и водородно-кислородных смесей для разных экспериментальных условий сильно отличаются [Schonborn A, Sayad P., Konnov A.A. and Klingmann J 2014 Int. J. Hydrogen Energy 39 12166].

5. ФГБОУ ВО “Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)” (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (Заведующий лабораторией “Терагерцовая оптотехника”, к.ф.-м.н. Юрченко Станислав Олегович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- На мой взгляд, автору следовало бы больше внимания обратить на поиск общих физических механизмов, управляющих переходом между различными скоростными режимами горения. Результаты работы позволяют сделать ряд общих выводов об условиях возникновения пульсаций давления и неустойчивости фронта, ведущей к его ускорению.

- Автореферат содержит ряд пунктуационных ошибок.

6. Тель-Авивский Университет (государственный институт) (к.т.н., PhD, научный сотрудник отдела точных наук, Каган Леонид Семенович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- По результатам модельных расчетов автора метод КАБАРЕ даёт существенно лучшие результаты, чем ЭЛМ. Однако все физически значимые задачи выполнены с помощью ЭЛМ.

- Использование относительно полного набора физических факторов предполагает количественное сравнение результатов расчета и соответствующих экспериментов. Однако это сравнение отсутствует в работе.

7. Колледж инженерии и минеральных ресурсов Университета Западной Вирджинии (к.ф.-м.н., PhD, младший профессор кафедры машиностроения и аэрокосмоса, Аккерман Вячеслав Борисович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В четвертой главе автореферата (стр.12) упомянуты экспериментальные данные по воспламенению газозвеси при воздействии источника внешнего излучения, полученные в установке, аналогичной рассмотренной в диссертации. Однако, в тексте автореферата не

указано, было ли проведено сравнение результатов моделирования с данным экспериментом и каков полученный результат, если сравнение проводилось.

- Аналогично на стр. 17 автореферата описана процедура адаптации численного метода КАБАРЕ для решения газодинамики реагирующих потоков и указано на проведение верификации данной методики на задаче о стационарном дозвуковом ламинарном распространении пламени. Однако, в тексте автореферата нет данных о сравнении результатов моделирования детонационных волн и сравнении получаемых результатов с параметрами Чепмена-Жуге.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Головизнин В.М. является ведущим ученым в области разработки алгоритмов вычислительной гидродинамики и математического моделирования сложных гидродинамических течений. Является автором более 200 статей по этой тематике. Основные публикации, связанные с тематикой диссертационной работы Яковенко И.С.:

1. D.G. Asfandiyarov, S.A. Finogenov, V.M. Goloviznin Parameter-free method for computing the turbulent flow in a plane channel in a wide range of Reynolds numbers // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2015. – Vol. 55, №9 – Pp. 1515-1526;

2. V.M. Goloviznin, S.A. Karabasov, V.G. Kondakov Generalization of the cabaret scheme to two-dimensional orthogonal computational grids // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2014. – Vol. 6, №1 – Pp. 56-79;

3. В.Ю. Глотов, В.М. Головизнин Схема кабаре для двухмерной несжимаемой жидкости в переменных «скорость-давление» // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2013. – Т.25, №7. – С. 103-136.

- д.ф.-м.н. Медведев С.П. является признанным специалистом в области экспериментальных и теоретических исследований процессов инициирования и нестационарного распространения волн горения в реагирующих газовых смесях. Основные публикации оппонента, связанные с тематикой диссертации.

1. С.В. Хомик, С.П. Медведев, А.А. Борисов, В.Н. Михалкин, О.Г. Максимова, В.А. Петухов, А.Ю. Долгобородов Распространение детонации по топливовоздушным смесям в плоских каналах // *Химическая физика*. – 2016. – Т. 35. № 4. – С. 48-56.

2. С.П. Медведев, С.В. Хомик, О.Г. Максимова, В.Н. Михалкин, В.А. Петухов, А.Ю. Долгобородов Воспламенение водорода высокого давления при его истечении в объём с препятствиями // *Технологии техносферной безопасности*. – 2015. – № 6 (64). – С. 38-45.

3. S.V. Khomik, V. Veysiere, V. Montassier, S.P. Medvedev, G.L. Agafonov, M.V. Silnikov On some conditions for detonation initiation downstream of a perforated plate // *Shock Waves*. – 2013. – Vol. 23. № 3. – Pp. 207-211.

Выбор государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ЦИАМ) в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ЦИАМ является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в области горения химически активных газовых смесей и их использования в качестве топлив для различных типов двигателей. В отделении «Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и элементах реактивных двигателей» ведутся интенсивные теоретические исследования химической кинетики процессов воспламенения активных газовых смесей, механизмов и режимов распространения волн дефлаграционного горения и детонации, что близко к тематике диссертационного исследования соискателя. Среди основных публикаций сотрудников ЦИАМ, можно выделить следующие публикации, связанные с тематикой диссертации:

1. Д.А. Любимов, И.В. Потехина Исследование нестационарных режимов работы сверхзвукового воздухозаборника RANS/ILES-методом // *Теплофизика высоких температур*. – 2016. – Т. 54, №5. – С. 784-791

2. Starik A.M., Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Loukhovitski B.I., Sharipov A.S., Titova N.S. Numerical study of the enhancement of combustion performance in a scramjet combustor due to injection of electric-dischargeactivated oxygen molecules // Plasma Sources Science and Technology. – 2013. – Vol. 22. №6. – Pp. 065007.

3. Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Sharipov A.S., Titova N.S., Starik A.M. Evaluation of prediction ability of detailed reaction mechanisms in the combustion performance in hydrogen/air supersonic flows // Combustion Science and Technology. – 2013. – Vol. 185. №1. – Pp. 62-94.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

- путем компьютерного моделирования процессов ускорения пламени и перехода к детонации в трехмерных полуоткрытых каналах подтверждена справедливость теории ускорения пламени и перехода к детонации, предложенной ранее на основе результатов двухмерных расчётов.

- получено детальное описание сценария развития горения в бедных водород-воздушных смесях близких по составу к концентрационному пределу воспламенения, содержащихся в замкнутом объеме.

- методами численного моделирования обнаружен механизм локализованного инициирования детонации газообразной горючей смеси путем лучистого нагрева слоя взвешенных в газе нейтральных микрочастиц.

- получены оптимальные характеристики потока частиц и пространственного положения твердотельной подложки в процессе детонационной имплантации.

- проведена адаптация современного вычислительного метода КАБАРЕ для решения многомерных задач газовой динамики горения и детонации.

- разработан объектно-ориентированный программный комплекс для решения многомерных задач газодинамики реагирующих потоков на суперкомпьютерных вычислительных системах.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- впервые анализ процесса ускорения пламени и перехода к детонации методами численного моделирования был выполнен в трехмерной постановке с учетом детальных механизмов химической кинетики, что позволило уточнить детали механизма перехода к детонации;

- получена более полная, по сравнению с приводимой ранее в литературе, детализация процесса эволюции очага пламени вблизи нижнего концентрационного предела горения;

- показана принципиальная возможность инициирования направленной детонационной волны в газовой смеси путем лучистого нагрева взвешенных химически нейтральных микрочастиц.

- впервые методами математического моделирования воспроизведен процесс имплантации частиц на подложку в импульсе детонационной волны и получены оптимальные соотношения между характеристиками потока частиц и расположением подложки

- бездиссипативный балансно-характеристический метод КАБАРЕ был впервые адаптирован для решения задач распространения волн горения в химически активных газовых смесях

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

- проведен анализ особенностей горения бедных водородно-воздушных смесей, который позволил выделить и детализировать конвективный механизм переноса очагов возгорания, что дает дополнительный материал, необходимый для оценки возникновений и развития пожара в реакторном зале при тяжелых авариях на АЭС.

- получены результаты и модели горения газозвесей, которые позволяют оценить качественное и количественное влияние микрочастиц на развитие процессов горения горючей смеси и определить вклад теплового излучения в физические механизмы

возгорания и инициирования детонации в газовзвесах, что может быть использовано в прикладных задачах для контролируемого инициирования детонации с помощью излучения.

- получены оптимальные характеристики потока и пространственной ориентации подложки для обеспечения наибольшей эффективности процесса детонационной имплантации частиц, что может быть использовано для создания технических систем абразивной обработки и создания новейших композитных материалов.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном Институте Высоких температур РАН, в Институте физической химии им. Н.Н. Семенова РАН, в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов, в Центральном институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова и во многих других научных и промышленных учреждениях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- достоверность выводов подтверждается использованием апробированных вычислительных алгоритмов и анализом результатов расчетов с привлечением достаточно ясных физических предположений.

- представлены результаты по всестороннему тестированию использованного эйлерово-лагранжева расчетного метода, которые показывают хорошее соответствие расчетных данных с результатами теоретических оценок и лабораторных экспериментов для самоподдерживающейся детонационной волны и ламинарного пламени;

- при решении задачи об ускорении фронта пламени и перехода к детонации в канале в трехмерной геометрии при построении расчетной сетки в полной мере учитывается опыт решения соответствующей двумерной задачи и тестирование численного метода с тем, чтобы разрешить структуру фронта пламени и зоны реакций;

- используемые численные методы для решения уравнений газовой динамики показали хорошее совпадение в области сходимости на тестовых задачах распространения волн горения и детонации с результатами, полученными с использованием более современного бездиссипативного метода КАБАРЕ;

- при моделировании получено качественное совпадение динамики ускорения пламени в канале и характерных стадий процесса ускорения пламени и перехода к детонации с получаемой в лабораторном эксперименте.

Личный вклад соискателя состоит в разработке автором подходов к программной реализации многомерного численного моделирования процессов распространения волн горения и детонации в газовых смесях и газовзвесах на кластерных многопроцессорных и многоядерных системах, проведении большей части вычислительных экспериментов. Он принимал непосредственное участие в тестировании использованных компьютерных кодов, проводил модернизацию и усовершенствование вычислительного комплекса в соответствии с современными подходами разработки программного обеспечения, внедрял новые физические модели и математические алгоритмы. Принимал активное участие в анализе и интерпретации полученных результатов расчетов, а также в формулировке и обосновании моделей и выводов, вошедших в диссертацию.

Апробация результатов исследования проводилась на более чем 20 российских и международных конференциях и симпозиумах, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены автором в соавторстве.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.


На заседании от 31.05.2017г. диссертационный совет принял решение присудить Яковенко И.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н., профессор

 Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02
к.ф.-м.н.

 Васильев М.М.



31.05.2017г.