

**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 17 апреля 2019 г. (протокол № 4)

**Защита диссертации Смыгалиной Анны Евгеньевны  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
«Влияние состава горючих смесей на основе водорода на режимы  
воспламенения и горения»**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика  
и теоретическая теплотехника

## 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 № 4 от 17 апреля 2019 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 22 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника и 11 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	Присутствует
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	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
12	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
13	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
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	Отсутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик, 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, 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, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
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	Присутствует
31	Якубов И.Т.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации младшего научного сотрудника лаборатории 15.2 – вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Смыгалиной Анны Евгеньевны** на тему «Влияние состава горючих смесей на основе водорода на режимы воспламенения и горения». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в лаборатории 15.2 – вычислительной физики ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Научный руководитель:**

**Киверин Алексей Дмитриевич** – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией 15.2 – вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

**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).

**Титова Наталия Сергеевна** – гражданка РФ, к.ф.-м.н., начальник отдела «Физика неравновесных процессов и физико-химическая кинетика» Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова» (ЦИАМ; Россия, 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2).

### **Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН;** Россия, 115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, д. 52).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н. Медведев С.П. и к.ф.-м.н. Титова Н.С., научный руководитель Смыгалиной А.Е. к.ф.-м.н. Киверин А.Д.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Михаил Михайлович, будьте любезны, ознакомьте нас с документами, которые мы должны знать до начала слушания.

### Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, добрый день. В наш Совет обратилась Смыгалина Анна Евгеньевна с просьбой принять к защите, к рассмотрению и защите ее работу на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук с следующим названием, которое вы видите на экране: Влияние состава горючих смесей на основе водорода на режимы воспламенения и горения. Работа выполнена в нашей организации. Прошла успешная предзащита, и была назначена комиссия в составе, значит, Виктора Владимировича Голуба, Вараксина Алексея Юрьевича и Еремина Александра.

### Председатель

Все в рядок сидят.

### Ученый секретарь

Эти эксперты провели работу и сделали вывод, что работа соответствует заявленной специальности и формальным требованиям ВАК и может быть заслушана в нашем Диссертационном совете. В деле имеются все документы, оформленные в соответствии со всеми требованиями ВАК, необходимые. С вашего позволения, я зачитывать все эти документы не буду. Если есть вопросы, я готов на них ответить.

### Председатель

Есть ли вопросы какие-нибудь до начала основной части? Если нет – давайте перейдем тогда. Татьяна Евгеньевна, пожалуйста, в пределах двадцати минут мы вас слушаем.

### Смыгалина А.Е.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Смыгалиной А.Е. прилагается).*

### Председатель

Спасибо, Анна Евгеньевна. Пожалуйста, время для вопросов. Кто хочет спросить что-нибудь? Так, пожалуйста.

### Еремин А.В.

Ань, вы практически не уделили внимания в докладе о кинетических схемах, которые вы использовали. Особенно интересно знать, какие схемы вы использовали для анализа результатов в смесях, содержащих метан, пары воды. Ведь, существует целый ряд кинетических схем, как известно. Скажите несколько слов об этом.

### Смыгалина А.Е.

В различных задачах диссертации использовались разные кинетические механизмы. Для смесей с метаном использовался механизм, разработанный в институте Galway, это механизм авторства Питерсена. Также у меня были задачи, где не использовался метан, только были чистые водородные смеси. В главе два использовался механизм Кушарина, а в главе три использовался механизм также Galway авторства О'Коннара.

**Еремин А.В.**

Какое характерное количество реакций, компонентов, особенно в смесях с метаном?

**Смыгалина А.Е.**

В смесях с метаном тридцать три компонента и около двухсот реакций.

**Еремин А.В.**

Спасибо.

**Председатель**

Еще вопросы? Да, пожалуйста.

**Савватимский А.И.**

Будьте добры, судя по тому, что вы показали, очень трудно выделить экспериментальную часть, человеку, не знакомому с тематикой, и расчетную. Вы сами как считаете, у вас, вот вы апеллировали к эксперименту и не указывали, это ваш эксперимент или это взято из литературы. Какую долю эксперимент составлял в ваших расчетных в основном исследованиях?

**Смыгалина А.Е.**

Все расчеты проводились, все исследования в данной работе проводились именно вычислительным образом, методами вычислительной газовой динамики. С экспериментами проводилось только сравнение, и я в экспериментах не участвовала.

**Савватимский А.И.**

Спасибо.

**Председатель**

Еще вопросы, пожалуйста. Да, будьте любезны.

**Амиров Р.Х.**

Я хотел бы спросить, когда мы интересуемся двигателями внутреннего сгорания, помимо КПД нас интересует токсичность выбросов. Ясно, что применение водорода уменьшает выбросы типа СО, наверное, и так далее. А что происходит с окисями азота, NOx? То есть вы загоняете новые режимы, повышение температуры для того, чтобы образовались окислы азота. Что вы можете сказать по этому поводу?

**Смыгалина А.Е.**

Конечно, на практике при столь высоких температурах происходит образование окислов азота. Однако, в настоящей работе использовались кинетические механизмы без подмеханизма, описывающего образование окислов азота. Поэтому в работе мы такой анализ не проводили.

**Председатель**

Еще? Да, пожалуйста.

**Вараксин А.Ю.**

В продолжение этого вопроса, который предыдущий прозвучал. Если мы говорим про практику, что касается двигателей внутреннего сгорания. Безусловно, расчеты проведены

на хорошем научном уровне. Возникает вопрос, связанный с масштабным фактором. Если представить, что двигатель, допустим, геометрия, его объем камеры, будет на порядок или два ниже, меньше или наоборот, в другую сторону – больше, что, как поплывет в ваших результатах расчетов, можете сказать без проведения, просто чувствуя физику?

**Смыгалина А.Е.**

В расчетах использовалась геометрия камеры в точности совпадающая с геометрией камеры, используемой в экспериментах. А что касается уменьшения либо увеличения, мне кажется, здесь нужно проводить какие-то дополнительные оценочные расчеты. Я думаю, что, во-первых, качественно картина не изменится: влияние добавок на изменение режимов протекания горения, но количественно, я думаю, результаты будут близки.

**Председатель**

Спасибо. Еще вопросы есть? Анна Евгеньевна, а вот вы сказали, что в работе специально определяли параметры, близкие к оптимальным для КПД, а о каких КПД идет речь?

**Смыгалина А.Е.**

Нет, КПД я не определяла в работе.

**Председатель**

Но там у вас написано, что это параметры, близкие для оптимизации КПД или его повышения. КПД у вас использовался на каких-то картинках. Вот просто, о каких порядках величин КПД идет речь в этих двигателях?

**Смыгалина А.Е.**

На самом деле, КПД я не оценивала. Были проведены дополнительные расчеты по условиям самых последних экспериментов, и там КПД оказалось около 35 процентов. Но это выходит за рамки того, что я представила в диссертации. А в диссертации на самом деле анализ КПД не проводился. Возможно, я действительно произнесла.

**Председатель**

Но на картиночках были три буквы эти написаны.

**Смыгалина А.Е.**

Но в основном мы здесь анализировали параметры работы двигателя следующие: максимальное давление и угол поворота коленчатого вала при максимальном давлении. Эти два параметра.

**Председатель**

Спасибо. Еще вопросы есть? Если нет, тогда, Алексей Дмитриевич, вам слово, как руководителю не о работе, а о соискательнице.

**Киверин А.Д.**

Уважаемые коллеги, добрый день. В общем-то, Анна Евгеньевна, она в нашей команде уже достаточно давно, прошла в общем-то путь от студента бакалавриата, пришла к нам, мне кажется, в 2010 году, то есть уже достаточно давно. В этот мы момент мы как раз почувствовали некую силу в том плане, что мы можем ...

### **Председатель**

Анна Евгеньевна, вы присаживайтесь. А то дальше еще следующие пункты, процедуры пойдут.

### **Киверин А.Д.**

На достаточно хорошем уровне расчеты процессов горения и детонации, и в этом плане конечно нам понадобилось к тому же провести некоторую ревизию наших моделей, технических средств, которые мы используем. И в этом плане конечно Анна Евгеньевна она себя в этом плане очень хорошо, квалифицированно проявила практически сразу же. К сожалению, конечно все вот эти технические детали они просто-напросто не могли войти в диссертацию. В диссертацию вошли только те задачи, которые были уже решены на вот этом построенном с непосредственным участием Анны Евгеньевны базисе. Ну и собственно сами работы, они явились, те которые вошли в диссертацию, в конечном итоге они явились достаточно важным базисом для нашей последующей работы. Наша ревизия понятия предела, концентрационного предела воспламенения, значит, это несколько нас натолкнуло и открыло даже несколько направлений, по которым мы в последние годы работаем, они более того актуальны в связи с недавними авариями на Фукусиме и новым ренессансом задач водородной взрывобезопасности атомных электростанций. Также, конечно, вот этот опыт огромный по интерпретации экспериментов, которые делались в лаборатории Голуба Виктора Владимировича. И более того, то, на что, собственно, вот очень хороший результат в последней главе сделан, то, на что наша работа должна быть в том числе направлена – это проектирование постановок экспериментов. То есть, те расчеты, которые были проведены были положены в основу экспериментов, которые были сделаны в лаборатории Виктора Михайловича Зайченко, и в общем-то на самом деле, Анна Евгеньевна говорит, она не участвовала в эксперименте, но она участвовала в его постановке, что упростило и удешевило процесс экспериментального уже исследования. И разумеется, из личных качеств, Анна Евгеньевна очень старательный человек, если можно так сказать, въедливый, все эти задачи она очень хорошо разобрала, очень детально разобрала, иногда даже может быть чересчур. Только позитивная у меня оценка.

### **Председатель**

А перспектива какая?

### **Киверин А.Д.**

А перспектива, в общем-то сейчас весь этот опыт накопленный, он используется, работы идут по направлению нашей лаборатории, по горению и детонации.

### **Председатель**

Спасибо, Алексей Дмитриевич. Михаил Михайлович, ваш выход. Вы должны ознакомить нас со всеми письмами, что у нас есть.

### **Ученый секретарь**

Уважаемые коллеги, я должен ознакомить вас с отзывом ведущей организации и отзывами, которые поступили на автореферат Анны Евгеньевны. Начну с отзыва **ведущей организации**, с вашего позволения не буду зачитывать отзыв целиком. Отзыв содержит актуальность темы, описание актуальности темы, содержание и структуру диссертации. В отзыве сформулирована научная новизна, обоснованность и достоверность результатов, ее апробация, а также личный вклад автора. Присутствуют и замечания, которые я зачитаю. В разделе о концентрационных пределах имеется непоследовательность и путаница в

понятиях. Автор формулирует ГОСТовские определения предела, которые связывают его с возможностью распространения реакции в пространстве на любое расстояние от источника, а следом дает нульмерный расчет, который к распространению отношения не имеет. Непонятно также, какое отношение к распространению горения в однородной смеси – ГОСТ – имеет распространение в смеси с градиентом концентрации. Второе, к сожалению, из описания расчета воспламенения водородной струи не ясно, насколько полученные результаты применимы к практически интересному случаю, когда истечение водорода из сосуда высокого давления происходит не в канал, как в расчетах автора, а в неограниченное пространство атмосферного воздуха. Третье, в тексте не сказано также, каким образом в этой задаче описывалось турбулентное перемешивание. Ну и в конце делается утверждение, что отмеченные недостатки не снижают общую положительную оценку работы, а работа соответствует всем требованиям пункта 9 присуждения ученых степеней Постановления 842, а автор заслуживает присуждения искомой степени. Отзыв подписан заведующим отделом перспективных исследований и математического моделирования ИБРАЭ доктором физ.-мат. наук **Головизниным В.М.**, заведующим отделением отдела безопасности ядерных энергетических установок ИБРАЭ **Киселевым А.Е.**, заместителем заведующего отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок ИБРАЭ доктором физ.-мат. наук **Семеновым В.Н.** Также на автореферат, разосланный, поступило 6 отзывов. Все отзывы положительные, имеются замечания. **Первый отзыв** поступил из **Института теоретической и прикладной механики Христиановича Сибирского отделения Академии наук**. В отзыве отмечен следующий недостаток. Недостатком автореферата является отсутствие графиков, демонстрирующих декларируемые результаты такого сопоставления, по всей видимости, с результатами эксперимента. Отзыв подписан **Фурсенко Романом Викторовичем**, доктором физ.-мат. наук, заведующим лабораторией физико-математического моделирования процессов горения. Следующий отзыв поступил также из **Института теоретической и прикладной механики Христиановича**, подписан заведующим лабораторией волновых процессов в ультрадисперсных средах **Бедаревым И.А.**, кандидатом физ.-мат. наук. Отзыв имеет следующие замечания. Первое. Исследования в работе выполнены с помощью численного моделирования, а в автореферате подробности алгоритмов указаны весьма скудно. Во всех ли задачах использовались одинаковые схемы химической кинетики. Второе. Вопрос по исследованиям, выполненным в третьей главе. Судя по автореферату, расчеты проведены для фиксированной геометрии каналов высокого и низкого давлений при различной динамике раскрытия диафрагмы. Не исследовался ли вопрос о том, как изменяются условия самовоспламенения при уменьшении или увеличении объема камеры высокого давления. И наконец, третье. Почему в расчетах в главе 4, которые выполнялись в условиях экспериментов использованы только стехиометрические смеси. Представляется, что использование смесей с коэффициентом избытка воздуха, взятым из эксперимента, позволило бы провести не только качественное, но и количественное согласование расчетных и экспериментальных данных. Ну а в целом делается вывод, что работа производит хорошее впечатление, соответствует требованиям ВАК, а автор заслуживает присуждения искомой степени. Следующий отзыв поступил из **ЗАО НПО «Специальных материалов»**. Отзыв положительный. Отзыв составил и подписал старший научный сотрудник, кандидат технических наук **Гук Игорь Владимирович**. В отзыве имеются следующие замечания. В тексте автореферата замечено несколько неточностей и недостатков. В тексте автореферата не сказано, какой конкретно лагранжево-эйлеров метод использовался для решения системы дифференциальных уравнений: явный или неявный, сеточный или безсеточный (страница 8); не указаны точные границы исследуемого диапазона времен



раскрытия диафрагмы (страница 11); не указано, на какую величину снижается значение КПД двигателя при увеличении угла поворота коленчатого вала (страница 14). Указанные неточности и недостатки не снижают научной и практической значимости работы, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени. Отзыв следующий поступил из **Института автоматизации проектирования Российской академии наук**. Отзыв составлен старшим научным сотрудником отдела вычислительных методов и турбулентности кандидатом физ.-мат. наук **Уткиным Павлом Сергеевичем**. Отзыв положительный, имеются замечания. Автор пишет, что исследования выполнены методами вычислительной газовой динамики. Некоторые недостатки изложения результатов работы в автореферате касаются недостаточно подробного освещения важных особенностей вычислительных экспериментов. А именно, в тексте нет ни одного упоминания о характерном размере ячеек расчетных сеток в рассмотренных задачах, хотя есть фраза о том, что сеточная сходимость исследовалась. Без этого трудно оценить степень разрешения зон протекания химических реакций. Автор пишет, что использует уравнения Навье – Стокса, однако не пишет о том, используется ли какая-либо модель турбулентности. Данные вопросы особенно важны в задаче об истечении водорода под давлением, где требуется моделировать процесс смешения топлива и окислителя. Также написано, что анализировались различные модели кинетики химических реакций, и для каждой из рассмотренных задач выбиралась наиболее подходящая модель. Было бы любопытно увидеть рекомендации автора, основанные на опыте подобной деятельности, по поводу выбора той или иной кинетической схемы. В конце делается заключение, что все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей оценки работы, а соискатель заслуживает присуждения искомой степени. Следующий отзыв поступил из **Института тепло- и массообмена имени Лыкова НАН Белоруссии**. Отзыв положительный, составлен и подписан старшим научным сотрудником лаборатории физико-химической гидродинамики, кандидатом физ.-мат. наук **Лешевичем Владимиром Владимировичем** и заведующим лабораторией физико-химической гидродинамики **Кривошеевым Павлом Николаевичем**. Отзыв положительный, имеются замечания. Следует обратить внимание на отсутствие в автореферате сравнительного анализа результатов расчетов с экспериментальными данными, на основании которого выбирались соответствующие модели и механизмы химической кинетики для диссертационного исследования. Это крайне важный момент, так как от данного выбора зависит достоверность воспроизводимых в работе процессов и как следствие ее результаты и выводы. Второе замечание касается некоторой ограниченности практического применения полученных в диссертации результатов. Например, оценка нижнего предела воспламенения водорода проводилась только для атмосферного давления, и автор не указывает возможности применения предложенного метода для других условий. Особенности самовоспламенения водорода при истечении в канал, заполненный воздухом, выявлены для конкретной геометрии канала, а рассмотренная концепция подавления детонационных режимов горения в ДВС за счет использования малых добавок низкоактивных компонент к водороду не проверена для различных режимов работы двигателя, например, связанных с изменением нагрузки, т.е. с увеличением объемного наполнения цилиндров горючей смесью. В конце делается вывод, что замечания носят рекомендательный характер, не снижают общей высокой оценки работы и соискатель заслуживает присуждения степени. Наконец, поступил отзыв на автореферат из **Института химической физики имени Семенова Российской академии наук**. Отзыв составлен старшим научным сотрудником лаборатории гетерогенного горения, кандидатом физ.-мат. наук **Терезой Анатолием Михайловичем** и заведующим отделом химической кинетики и катализа, доктором физ.-мат. наук **Гришиным**

**Максимом Вячеславовичем.** Отзыв положительный, отмечен ряд замечаний. Первое. Не представлены критерии выбора моделей детальных кинетических механизмов, определяющих химию самовоспламенения изучаемых горючих смесей в индукционном периоде и начальных стадиях горения изучаемых горючих смесей, применительно к условиям больших диапазонов температуры и давления изучаемых процессов. Второе. Не отражены проблемы, связанные со сложностью численного решения уравнений газодинамики Навье – Стокса для многокомпонентного сжимаемого газа с учетом процессов переноса: вязкости, теплопроводности, диффузии и химических превращений в рамках выбираемого ДКМ, когда разброс собственных значений Якобиана составляет десятков и более порядков, что требует значительных вычислительных затрат. Из автореферата не ясно, проводилось ли диссертантом редуцирование ДКМ с целью понижения ранга матрицы Якоби и, если проводилось, то на основании каких критериев. В то же время сам факт использования ДКМ с участием метана значительно повышает ценность представленной к защите диссертации и полученных в ней результатов, и указанные недостатки никаким образом не снижают ценности результатов представленной к защите работы, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени.

### **Председатель**

Спасибо, Михаил Михайлович. Анна Евгеньевна, ряд вопросов мы уже обсуждали, в частности, насчет выбора кинетической схемы. Поэтому, если можно, вы отвечайте на те вопросы, которые мы еще не затрагивали в обсуждении.

### **Смыгалина А.Е.**

*(Отзыв ведущей организации).* В начале хотела бы ответить на замечания ведущей организации. В работе, действительно, есть некоторая непоследовательность: в начале формулируется определение ГОСТ о нижнем пределе концентрации для распространения пламени. Однако, в работе полагается, что первичным по отношению к распространению пламени является процесс воспламенения, поэтому и проводится в начале его анализ в нульмерной, а затем уже одномерной постановке. Одномерная постановка с градиентом концентрации служит специфическим способом определения предела воспламенения, устойчивого по отношению к газодинамическим возмущениям от зоны инициирования горения. Анализ нижнего концентрационного предела в терминологии ГОСТ проводится. Эта задача приведена в последней части главы 2 и проводится в двух постановках: при однородном задании концентрации и неоднородном задании, где задавалась область с концентрацией ниже 10 процентов и область с нарастанием концентрации до 15 процентов. И этот результат. Результат показал, что в этом случае также происходит формирование устойчивого распространения пламени, этот результат является практически важным, поскольку на практике при выбросе горючего его концентрация распределена неравномерно. Что касается второго замечания от ведущей организации, оно касается главы 3, решения задачи о самовоспламенении водорода при его истечении в канал. Существуют ранние работы, которые показали, что при истечении водорода из баллона высокого давления в атмосферу имеет место самовоспламенение. И далее, также есть ряд работ, который показывает, что при истечении в канал, который подразумевался, как, наоборот, средство для предотвращения самовоспламенения, однако, эти работы и настоящая работа показали, что и при истечении в канал самовоспламенение имеет место. И последнее замечание ведущей организации. В работе не использовалась какая-либо модель турбулентности, так как происходило решение системы уравнений Навье – Стокса. Такой метод также называется прямым численным моделированием. Что касается замечаний из отзывов на автореферат.

(Отзывы на автореферат). Сопоставление с экспериментальными данными в автореферате не было проиллюстрировано. И я хотела бы отметить, каким образом проходило сопоставление с экспериментальными данными в работе. В главе 2 сопоставление происходило непосредственно рассчитанных значений нижнего предела со значениями 4 и 10 процентов, известными из литературы. В главе 3 сопоставление с результатами экспериментов проводилось для эволюции давления, а также для типов очагов самовоспламенения: затухающий, незатухающий, местах образования самовоспламенения – у стенки канала – и временах возникновения самовоспламенения. В главе 4 сопоставлялись индикаторные диаграммы для смесей водород-воздух с коэффициентом избытка воздуха 1,5. Также в нескольких отзывах прозвучал вопрос об алгоритме сопоставления различных кинетических механизмов, их анализу и выбору для решения конкретной задачи. Так, здесь представлены температурные зависимости времен индукции и соответствующие экспериментальные данные для разных давлений и составов. Определялась ошибка расчета времени индукции для различных кинетических механизмов и разных давлений и составов. Причем в главе 2, в разных главах использовались различные кинетические механизмы, о них я уже говорила. Также был вопрос о величине ячейки расчетной сетки. В главе 2 расчетная сетка составляла 20 и 100 микрометров, в главе 3 – 12 микрометров, в главе 4 – 100 и 400 микрометров. Редуцирование кинетических механизмов в работе не проводилось. Также было отмечено о некотором практическом ограничении полученных результатов, но представляется перспективным рассмотрение разработанных методик для более широких диапазонов условий.

**Председатель**

Раз уж вы говорили о численных методах, там про сходимость спрашивали.

**Смыгалина А.Е.**

Сходимость была исследована в разных, вот особенно в задачах из главы 3 и главы 4, и в результате данных тестов была определена необходимая расчетная сетка, размер ячейки. Могу я воспользоваться своими выписанными вопросами?

**Председатель**

Ну конечно, если вам нужно.

**Смыгалина А.Е.**

Просто их довольно много.

**Председатель**

Анна Евгеньевна, попробуйте все-таки не на каждый отдельно отвечать, а на совокупность вопросов, которые касаются какого-то определенного направления.

**Смыгалина А.Е.**

Хорошо. Но я хотела бы сказать, в основном спрашивали про вот этот слайд, про выбор кинетического механизма.

**Председатель**

Да-да-да, я поэтому и сказал, что мы вообще это уже обсуждали, поэтому на этот вопрос, больше не нужно его касаться.

**Смыгалина А.Е.**

Да, да. Также был вопрос, почему в главе 4 использовались только стехиометрические смеси. Я хотела бы ответить, что в самой последней задаче были решены, была решена для обедненной смеси с коэффициентом избытка воздуха 1,5. Был вопрос о влиянии геометрии и объема камеры высокого давления на процесс возникновения воспламенения водорода для задачи из главы 3. Я хотела бы отметить, что такой анализ не проводился. Также, что касается численного метода, использовался лагранжево-эйлеров метод «крупных частиц», он явный и сеточный.

**Председатель**

А насчет турбулентности?

**Смыгалина А.Е.**

Да, но я, по-моему, уже сказала, что модель турбулентности не использовалась, проводилось решение системы уравнений Навье – Стокса, что также называется прямым численным моделированием. Не указаны точные границы исследуемых диапазонов времен раскрытия. Я говорила в докладе, что они составили 20, 30 и 40 микросекунд. И был вопрос о том, на какую величину снижается КПД при увеличении угла поворота коленчатого вала при максимальном давлении. Но такой вопрос не анализировался, то есть КПД в работе не определялся. И я хотела бы сказать, что вроде бы все вопросы...

**Председатель**

Спасибо. Спасибо. Я думаю, что в основном все вопросы вы затронули. Представление есть по-видимому у членов Совета. Тогда мы можем перейти к заслушиванию оппонентов. И первый у нас Медведев Сергей Павлович. Будьте любезны. Я думаю, что нет необходимости пересказывать содержание, поскольку тут ...

**Медведев С.П.**

Да. Добрый день, уважаемые коллеги, ...

**Председатель**

... мы ознакомлены уже.

**Медведев С.П.**

... я не буду пересказывать содержание диссертации, как это сделано в отзыве, а хотел бы просто выделить основные моменты, которые отличают именно эту диссертацию от подобных работ, которые выходят по водороду и в последние годы мы наблюдаем целый вал таких работ, особенно теоретических, в которых исследуются самые разнообразные вопросы. Собственно, само количество даже этих работ свидетельствует об актуальности темы, о том, что водород имеет самые разнообразные применения. Эта тема интересна как с точки зрения водородной взрывобезопасности, так и с точки зрения применения водорода в качестве топлив перспективных и так далее. Но тем не менее, несмотря на такое большое количество работ, на мой взгляд, достаточно было трудно найти свое место в этом. Но диссертанту и его, так сказать, команде это удалось, потому что те задачи, которые решены в диссертации, они отличаются от того, что было представлено ранее, они являются новыми и, кроме того, здесь мы наблюдаем помимо, действительно, накопления фундаментальных знаний по горению и взрыву водорода примеры практического применения, буквально в каждой главе. То есть все это свидетельствует о том, что диссертация действительно имеет новизну, действительно имеет практическую

ценность. И на мой взгляд, конечно, это связано с тем, что диссертант и научный руководитель являются продолжателями школы, известной выдающейся школы вычислительной газодинамики в реагирующих смесях, основанной в ИВТАНе Михаилом Федоровичем Ивановым, к сожалению, ушедшим. И что еще можно сказать. Я бы хотел выделить особенно тот подход, который был применен для оценки нижнего концентрационного предела. Здесь используется концепция, высказанная Яков Борисовичем Зельдовичем еще в 1970 году, и здесь интересен некий такой исторический ракурс. В 80-е и 90-е годы наблюдался действительно большой бум работ по исследованию этой концепции, по моделированию различных процессов в системах с неравномерным градиентом: воспламенения и инициирования детонации и прочее. Но в последние годы этот поток иссяк. Постановка связана, на мой взгляд, именно с тем, что несмотря на то, что концепция очень красивая, и так сказать, ей можно было бы объяснить многие процессы, которые были непонятны и в том числе экспериментальные, прямых экспериментальных доказательств этой концепции не существует. Есть только косвенные доказательства. В этом плане то, что диссертант вернулся к этой концепции и на основе нее ей удалось получить конкретные величины нижнего концентрационного предела, которые соответствуют экспериментальным измерениям, – фактически, если мы взглянем на это с другой стороны, получается так, что диссертант дал очередное экспериментальное доказательство концепции Зельдовича. Да, может быть оно не прямое, но тем не менее, именно концепция Зельдовича позволила предсказать те цифры, которые записаны даже в ГОСТах, там, еще в работах известных. Это конечно, большое преимущество этой работы и отличает ее от многих других работ. И вот этот вот возврат к истокам, он, на мой взгляд, очень важен в настоящее время, потому что часто бывает, незаслуженно забытые теории и достижения отечественные в том числе классиков горения и взрыва. В целом работа, конечно, выполнена на высоком техническом уровне. То есть вот это вот, то что мы обсуждали на счет задержек воспламенения – это действительно, большая, скрупулезная работа, которая, так сказать, требует огромного внимания, и поэтому то, что автору удалось провести этот анализ, потому что реально такой анализ не во всех работах встречается, и он уже сам по себе имеет ценность, а здесь это просто инструмент, то есть это настоящее, настоящее приложение результата содержится по ходу работы в главах. На счет концентрационного предела воспламенения я сказал. Соответственно, следующая глава, посвященная истечению водорода в открытое пространство, в канал и появлению очагов самовоспламенения в течение этого процесса. Эта также проблема исследуется очень широко, и в последнее время, действительно, большой поток работ, и опять же, здесь мы видим то, что в диссертации удалось найти новые подходы к решению этой задачи, получить новые данные, которые тоже соответствуют эксперименту, и соответственно, могут, на мой взгляд, быть перенесены и на другие масштабы установок. Просто здесь надо понимать, что настолько большие вычислительные затраты, что так сказать, невозможно охватить даже за несколько лет, за несколько лет при подготовке диссертационной работы все аспекты, вычислительные аспекты этой проблемы. Просто не хватит машинного времени. Ну и наконец, глава про двигатели внутреннего сгорания. Она также обладает новизной, тем что действительно, химическая кинетика достаточно сильно влияет на, может влиять на процессы сгорания в двигателе. То что обсуждали КПД, это она просто брала так сказать, оптимальные условия для двигателя, это не оценка КПД, а, действительно, исследовался процесс при оптимальных условиях, при оптимальном угле зажигания, поэтому здесь все в порядке. И в принципе, эти данные дают перспективу для того, чтобы понять, как все это будет сгорать не только в двигателях внутреннего сгорания, но и, скажем, в каких-то горелках и каких-то других энергетических устройствах. В целом, диссертация, конечно, производит

очень хорошее впечатление, хотя имеются и замечания, которые я с вашего позволения зачитаю. На многие из этих замечаний уже был получен ответ, то есть поскольку они в автореферате фигурировали. В частности, про то что действительно, как мы видим, известные кинетические схемы дают часто большой разброс вплоть до нескольких порядков, и в результате неясно, как эта схема будет работать в том или ином, так сказать, приложении. Но в принципе, само исследование влияния кинетической схемы на величину, скажем, нижнего предела, нижнего концентрационного предела тоже представляет интерес. К сожалению, в работе такой анализ отсутствует. Кроме того, на счет, в самой диссертации, значит, предлагается рассмотреть даже возможность рассмотрения и изменения существующего ГОСТа по водородной взрывобезопасности, в котором заложена цифра 4 процента. Но на мой взгляд, такое возможно, но необходимо, конечно, исследовать зависимости в рамках этой модели исследовать зависимости концентрационного предела в широком диапазоне температур и давлений, и уже потом на основе этих данных рассмотреть возможность включения в ГОСТ. Далее, при истечении, при истечении газа, исследовании истечения водорода в канал декларируется, что формирование вихревых течений является основным механизмом перемешивания водорода с воздухом. Но это утверждение тоже следует дополнительно обосновать и показать отличие по крайней мере от механизма турбулентного перемешивания. Так в общем, многие полагают, что здесь механизм турбулентного перемешивания. Хотя те вихри, которые рождаются, их можно рассматривать как крупномасштабную турбулентность, но это требует каких-либо дополнительных сравнений. Ну и наконец, вопрос про двигатель, вопрос про моделирование сгорания в двигателе. Здесь, на мой взгляд, действительно, опять же из-за недостатка мощности вычислительной или недостатка машинного времени полностью этот вопрос не исследовался. Потому что как показывает практика, простое уменьшение энергии зажигания искры, так сказать, в двигателе, может привести к подавлению детонационного режима и переходу в режим дефлаграции. То есть как бы вот этот анализ и может приводить к тому несоответствию результатов, которое не отмечено в диссертации. Ну имеется еще пара замечаний по опечаткам и оформлению. В целом, конечно, практическая значимость работы несомненна, теоретическая значимость определяется теми находками, теми приемами, которые были использованы при написании диссертации. Личный вклад автора не вызывает сомнения, поскольку я знаком с диссертантом уже более пяти лет, я присутствовал на тех конференциях, где она докладывалась, и здесь конечно, следует отметить, что она провела действительно огромную работу при написании диссертации, поэтому следует в общем-то отметить, что, конечно, упомянутые недостатки не влияют на качество исследований, проведенных Анной Евгеньевной Смыгалиной. Работа выполнена квалифицировано, на высоком научном уровне. Разработаны оригинальные методики и подходы, позволившие получить новые результаты, имеющие практическую значимость и высоко оцененные специалистами. Список публикаций в журналах ВАК представлен, статьи отражают основное содержание диссертации. И обсуждались на многочисленных конференциях. Разработанные методы и подходы могут служить фундаментальной основой для разработки энергетических установок нового поколения, а также для оптимизации имеющихся в настоящее время. Ну и на основании сформулированных положений следует заключить, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным пунктом 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Смыгалина Анна Евгеньевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### **Председатель**

Спасибо, Сергей Павлович. Я думаю, что вопросов у нас не возникло к оппоненту. Тогда Анна Евгеньевна, пожалуйста, относительно того, что здесь возможно возникло в вопросах.

### **Смыгалина А.Е.**

В начале я хотела бы отметить, что небольшой анализ кинетических механизмов для задачи о нахождении нижнего концентрационного предела воспламенения проводится. Так, в нульмерном приближении задачи были рассчитаны температуры и концентрации кроссовера, которые соответствуют равенству времени индукции и времени экзотермической стадии реакции. И видно, что здесь есть разброс, значительный, результатов, полученных по разным кинетическим механизмам. И далее для решения задачи в одномерной постановке был выбран механизм, который обеспечил именно средний результат для данной нульмерной задачи. Что касается вопроса о механизме перемешивания в задаче из главы 3, то я хотела бы сказать, что крупные вихревые течения формируются за счет разницы скоростей на оси канала и у стенки. И далее как в механизме неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, формируются также небольшие неустойчивости на самих крупных вихрях. Поэтому механизм газодинамического перемешивания по сути является одним и тем же для крупных и для малых вихрей. Теперь что касается задания искрового поджига в задаче о двигателе. Искровой поджиг задавался по условиям экспериментов, и дополнительный верификационный расчет, вот он, в условиях выполненных экспериментов показывает, что модель искрового поджига является достаточно корректной. Также, задача о нахождении нижнего концентрационного предела в диапазоне температур и давлений представляется перспективной, и будет рассмотрена в дальнейшем. И с замечаниями по опечаткам я согласна.

### **Председатель**

Будете стараться их избегать. Спасибо, Анна Евгеньевна. Мы переходим к заслушиванию второго оппонента. Наталия Сергеевна Титова, пожалуйста.

### **Титова Н.С.**

Добрый день. Я очень внимательно ознакомилась с работой, прочитала ее очень тщательно и все проверила. Не буду я говорить подробно о работе, скажу только о замечаниях. Большинство замечаний, которые у меня написаны, они в принципе уже озвучены, но тем не менее, я о них все-таки зачитаю. В главе 2 автор дает, приводит определение нижнего концентрационного предела воспламенения водородно-воздушной смеси, которое определено ГОСТом: это нижний концентрационный предел распространения пламени – это минимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания. Но при этом исследование начинается с решения задачи о самовоспламенении водородно-воздушной смеси, которое реализуется лишь при высокой температуре, здесь видно, при температуре большей 1000 кельвин при атмосферном давлении. Определенная минимальная концентрация водорода в 1 процент для смеси водород-воздух, при котором возможно самовоспламенение смеси при высокой температуре не имеет отношения к тому определению, которое приведено в ГОСТе. В некоторых местах работы происходит смешение понятий концентрационного предела воспламенения и концентрационного предела распространения пламени. В частности, ссылаясь на работы 62, 64, 65, в которых

приводится именно нижний концентрационный предел распространения пламени в смеси H<sub>2</sub>-воздух при нормальных условиях, автор пишет о концентрационном пределе воспламенения. Все анализируемые ... Второе замечание. Все анализируемые автором кинетические механизмы окисления водорода занижают экспериментально измеренную скорость ламинарного пламени в бедных смесях, где-то 10-20 процентов водорода в воздухе до двух раз. Это на рисунке 7. Исходя из целей работы, представляется, что точность предсказания этого параметра очень важна для получения количественных данных о нижнем концентрационном пределе распространения пламени. Кроме того, ни один из механизмов, рассмотренных механизмов не описывает экспериментальную зависимость скорости распространения пламени от давления, максимум которого находится при давлении в 2 атмосферы. Совпадение расчетного значения скорости пламени при использовании выбранного автором механизма с экспериментом достигается лишь при атмосферном давлении. В работе эти аспекты никак не анализируются и не обсуждаются. Также следует отметить, что при расчетах двигателя внутреннего сгорания достигалось давление в 240 атмосфер. Однако используемый механизм тестировался только до давлений 87 атмосфер. Ну, конечно, адекватность механизма при использовании в этих условиях должна быть как-то, должна быть подтверждена. Ну небольшое как бы уточнение, что многие экспериментальные данные имеют, конечно, свою погрешность. И поэтому при сравнении расчетов с экспериментом эту погрешность необходимо учитывать, чтобы ну более адекватно оценивать способность модели оценивать, описывать эксперимент. Третье. Время реакции определяется в работе как время от окончания стадии индукции до выхода на стационар профиля температуры. Но это очень такое общее определение, и для смесей очень обедненных этот выход на равновесие может быть достаточно продолжительным. Поэтому необходимо было количественный какой-то критерий, который описывает эту величину. Кроме того, не обосновано утверждение на странице 43, что равенство времени индукции и времени реакции определяет нижний предел экзотермической реакции. Четвертое. Термин, который введен в главе 2 – температура кроссовера, или температура продленного второго предела воспламенения – определен на страницах 43 и 46 по-разному. В одном случае определяется как равенство времени индукции и времени реакции, а во втором случае – равенство скоростей разветвления и обрыва цепи. На рисунках 3 и 7 качественно изображены профили изменения температуры, которые обозначены T относительное при воспламенении смесей водород-воздух и метан-воздух. Ни в тексте, ни в подписи не описано, что подразумевается под этой величиной. Поэтому глядя на рисунок, кажется, что температура изображена некорректно. Во-первых, температура исходной смеси должна иметь ненулевое значение, как изображено на рисунках, а некоторое конечное значение. Во-вторых, до тех пор, пока концентрации исходных реагентов практически не меняются, а количество компонентов, формирующихся в процессе развития цепного процесса, невелико, температура смеси практически не изменяется. При проведении численных расчетов естественно, что температура рассчитывалась автоматически, поэтому было бы логично представить именно абсолютное значение температуры. Кроме того, это дало бы дополнительную информацию об уровне температуры продуктов сгорания. И у меня есть еще два небольших, две небольших таких рекомендации. При исследовании воспламенения водорода при его истечении под высоким давлением через раскрывающуюся диафрагму получены новые и интересные результаты. Однако расчеты проведены лишь при одной геометрии, соответствующей эксперименту. С практической точки зрения было бы полезно получить зависимости предельно допустимого давления водорода в камере высокого давления от диаметра и длины канала, в который вытекает водород, а также для ситуации разгерметизации баллона и истечения водорода в открытое



пространство. При анализе и сравнении влияния небольших добавок низкоактивных компонентов на горение водорода в двигателе внутреннего сгорания, на мой взгляд, выбран не совсем подходящий способ включения этих добавок в смесь. В итоге при добавке метана смесь оказывается богатой, что естественно экономически невыгодно использовать такие смеси, особенно для энергетики. Но эти замечания не влияют на высокую оценку работы Анны Евгеньевны, и она заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### **Председатель**

Спасибо, Наталия Сергеевна, за очень конкретные замечания. Пожалуйста, Анна Евгеньевна.

### **Смыгалина А.Е.**

В начале был вопрос, похожий на замечание от ведущей организации. В тексте диссертации действительно есть некоторая непоследовательность: в начале дается определение ГОСТ, далее проводится определение предела воспламенения в нульмерной и одномерной постановках. Как я уже сказала, в таких постановках определяется предел воспламенения, поскольку сам процесс воспламенения является первичным, исходным по отношению к процессу распространения пламени. Но анализ нижнего предела распространения пламени в работе проводится в конце главы 2, о котором я уже говорила. Также хотела бы сказать, что по поводу второго замечания я отношу себя не к разработчикам, а к пользователям кинетических механизмов, поэтому анализ кинетических механизмов был проведен только при расчете так называемых интегральных величин: времен индукции и ламинарных скоростей. Более детальный анализ не проводился, например, скоростей отдельных реакций. Что касается следующего замечания, критерий для определения времени экзотермической стадии реакции представлен на слайде. И если обратиться к механизму химического превращения при горении водорода, то здесь можно выделить различные стадии. На первой стадии происходит накопление радикалов H и развитие цепной реакции. Эта стадия по времени длится как время индукции, поэтому и в диссертации говорится о том, что в течение времени индукции происходит в основном ветвление цепей. Далее следует вторая стадия, в течение которой происходит рекомбинация радикалов H и выделение большого количества тепла. Эта стадия длится от окончания времени индукции и до окончания выделения тепла, или если, по некоторому критерию если определять окончание этой стадии, вот как здесь приведено. В течение этой стадии происходит, как говорится в диссертации, в основном механизм обрыва цепей. Также стоит отметить, что в механизме горения водорода на стадии выделения тепла происходит диссоциация  $H_2$  с образованием свободных атомов и радикалов, этот процесс необходим для того, чтобы температура не увеличивалась колоссально до десятков тысяч кельвин. Теперь что касается рассмотрения предела воспламенения как равенства времени индукции и времени экзотермической стадии реакции. На данном слайде представлены два графика для температурной зависимости времени индукции и времени реакции. Видно, что время реакции слабо зависит от температуры, и точка пересечения определяет, определяет границу двух диапазонов, где время индукции существенно большое и существенно малое. Причем здесь два графика соответствуют двум разным составам: стехиометрического водород-воздуха и стехиометрического водород-кислорода. И видно, что изменение состава качественно не меняет данную зависимость, то есть точка пересечения определяет смену режима самовоспламенения. И именно по такому алгоритму были определены условия по

температуре и концентрации, которые в диссертации названы температура кроссовера и концентрация кроссовера, точнее, концентрация кроссорвера – такого не было, которые соответствуют равенству времени индукции и времени реакции и определяют переход от качественно различного процесса самовоспламенения. И что касается последнего замечания, в диссертации на трех графиках температура отложена от одной оси вместе с мольными долями, то есть вертикальная ось одна и от нее отложены температура и мольные доли. Для того чтобы отложить температуру от одной оси с мольными долями весь профиль был поделен на некоторое большое число, поэтому создается впечатление, что температура меняется от нуля. И здесь представлены исправленные графики с отложенной температурой от второй оси абсцисс. У меня на этом все.

### **Председатель**

Спасибо. Спасибо, Анна Евгеньевна. Мы переходим к дискуссии. Кто хотел бы высказаться после того, как весь материал и его обсуждение закончилось. Да, пожалуйста.

### **Голуб В.В.**

Я работу Анны Евгеньевны знаю, наверное, уже больше, чем 6 лет. И данная диссертация очень интересна тем, что мы видим, как от фундаментальнейшей задачи о концентрационном пределе воспламенения водорода Анна Евгеньевна идет к таким прагматичным задачам, как самовоспламенение водорода или подавление детонационного режима в двигателе. То есть такой спектр, начиная, от, так будем говорить, модернизации, каких-то корректировок модели Зельдовича до таких очень важных задач. На всякий случай скажу, значит, про важность этих задач. На самом деле наш институт оказался пионером с точки зрения исследования воспламенения водорода, потому что еще в 2005 году один из главных японских теоретиков говорил: ну что, самовоспламенения водорода от ударной волны в принципе быть не может. В Монреале было сказано в 2005 году. После этого ну и примерно в это, немножко раньше даже мы начали вести эти работы, которые показали, что это может быть. Но не все решишь в эксперименте, можно только некоторые точки показать. Короче говоря, вот Анна Евгеньевна присоединилась к этой задаче, ну и показала уже с помощью расчета особенности, возникающие при этом самовоспламенении. Короче говоря, я хочу сказать, что работа очень интересная с точки зрения такой стрелы от фундаментальных до сугубо прикладных задач. Работа с моей точки зрения заслуживает самой высокой оценки.

### **Председатель**

Спасибо, Виктор Владимирович. Еще кто-нибудь хочет добавить что-нибудь или представляется все ясным. Тогда мы должны выбрать счетную комиссию, и тут есть предложение разбудить Генри Эдгаровича...

### **Норман Г.Э.**

А я не сплю.

### **Председатель**

Владимир Сергеевич, Вас попросить и Алексей Георгиевич, Вас, если можно. Тогда мы переходим сейчас к голосованию. Да, мы должны проголосовать, кто за счетную комиссию, (*Счетная комиссия выбирается единогласно*) и надеюсь, что возражений нет, поэтому счетная комиссия может постепенно переходить к своей работе, а я прошу всех посмотреть на заключение Ученого совета. Спасибо. Не забудьте проголосовать, однако. (*Проводится процедура тайного голосования*).

**Норман Г.Э.**

Так, все проголосовали?

**Председатель**

Все, все проголосовали. Анна Евгеньевна, слушайте, пожалуйста, замечания ...

**Ученый секретарь**

То, что надо будет поправить. (*Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения*). Все, спасибо. Если больше замечаний нет, тогда мы должны прежде всего счетную комиссию заслушать, которая не спит.

**Норман Г.Э.**

Дорогие коллеги, в голосовании участвовало **22** члена Совета, **все – за**.

**Председатель**

Давайте утвердим протокол и поздравим Анну Евгеньевну. (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*). А, последнего слова я вас лишил.

**Смыгалина А.Е.**

Я хотела бы поблагодарить в первую очередь своего научного руководителя Киверина Алексея Дмитриевича, за то, что эта диссертация совершилась. Также огромная благодарность Виктору Михайловичу Зайченко и Виктору Владимировичу Голубу за то, что они мне предложили решать очень интересные задачи, о которых я говорила в диссертации и были выполнены в диссертации. И также огромная благодарность моему первому научному руководителю, Иванову Михаилу Федоровичу, за тот огромный путь, который он со мной проделал и был моим наставником долгие годы. Ну и также своим сослуживцам по работе за моральную поддержку и своим родителям.

**Председатель**

Так, спасибо, с этим мы закончили. Нам осталось только проголосовать Заключение ученого совета, которое мы уже обсудили во время (*голосования*). Какие еще есть дополнения? Если нет, то тогда я предлагаю принять его с теми замечаниями, которые есть. Анна Евгеньевна, вы внесете наши пожелания, да?

**Смыгалина А.Е.**

Да.

**Председатель**

Тогда голосуем за Заключение. Против нет. Спасибо. Единогласно. (*Проект заключения принят единогласно*). И вы выполнили все пункты нашего заседания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02, СОЗДАННОГО 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 17.04.2019 протокол № 4

О присуждении Смыгалиной Анне Евгеньевне, гражданке Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние состава горючих смесей на основе водорода на режимы воспламенения и горения» в виде рукописи по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника, принята к защите 11.02.2019г., (протокол заседания № 2), 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, [jiht.ru](http://jiht.ru), (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Смыгалина Анна Евгеньевна 1991 года рождения, в 2013 году окончила Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.

В 2017 году окончила очную аспирантуру Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Диссертация выполнена в Лаборатории № 15.2 – вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук и на факультете «Фундаментальных наук» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Работает младшим научным сотрудником Лаборатории № 15.2 – вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук с 2013 года по настоящее время.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Киверин Алексей Дмитриевич Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, Лаборатория № 15.2, заведующий лабораторией.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Медведев Сергей Павлович, Институт химической физики имени Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН), Лаборатория гетерогенного горения, заведующий лабораторией;

кандидат физико-математических наук, Титова Наталия Сергеевна, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (ЦИАМ им. П.И. Баранова), Отдел «Физика неравновесных процессов и физико-химическая кинетика», начальник отдела,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН, г. Москва), в своем положительном заключении, составленном заместителем заведующего отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок, доктором физико-математических наук, Семеновым В.Н., заведующим отделом перспективных исследований и математического моделирования, доктором физико-математических наук, Головизниным В.М., заведующим отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок,

доктором технических наук, Киселевым А.Е. и утвержденном директором ИБРАЭ РАН, доктором физико-математических наук, Матвеевым Л.В., указала, что к полученным результатам относятся оценка минимального давления, при котором еще происходит воспламенение водородной струи, вытекающей из сосуда под давлением; выделение и анализ двух различных типов очагов воспламенения; метод подавления детонационных режимов сгорания водорода в двигателе внутреннего сгорания. Все представленные в работе и решенные задачи имеют прямое отношение к безопасности обращения с водородом и к эффективности его использования как топлива для энергетических установок.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Институте химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН), Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (ИХКиГ СО РАН), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и во многих других научных учреждениях, связанных с проектированием объектов хранения водорода, а также устройств, использующих водород как топливо, в частности, двигателей внутреннего сгорания.

Соискатель имеет 4 статьи в реферируемых журналах из списка ВАК, 27 печатных работ в сборниках материалов и тезисов конференций:

Основные работы:

1. Об использовании водорода в качестве топлива для двигателей в энергетическом цикле удаленных производственных объектов / Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Зайченко В.М. // ЖТФ. – 2018. – № 88(1). – С. 147-150.
2. Mechanism of self-ignition of pressurized hydrogen flowing into the channel through rupturing diaphragm / Ivanov M.F., Kiverin A.D., Smygalina A.E., Golub V.V., Golovastov S.V. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42(16). – P. 11902-11910.
3. Горение смесей на основе водорода в газопоршневом двигателе / Смыгалина А.Е., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Зайченко В.М. // Известия РАН. Энергетика. – 2015. – № 2. – С. 120-130.
4. Воспламенение водородно-воздушной смеси вблизи нижнего концентрационного предела / Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2013. – № 1(48). – С. 89-108.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН** (Заведующий Лабораторией №2 физико-математического моделирования процессов горения, д.ф.-м.н. Фурсенко Р.В., г. Новосибирск) – отзыв положительный, с замечанием:

- К достоинствам работы следует отнести сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, имеющимися в литературе. Недостатком автореферата является отсутствие графиков демонстрирующих декларируемые результаты такого сопоставления.

**2. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН** (Заведующий лабораторией «Волновых процессов в ультрадисперсных средах», к.ф.-м.н., Бедарев И.А., г. Новосибирск) – отзыв положительный, с замечаниями и вопросами:

1. Исследования в работе выполнены с помощью численного моделирования, а в автореферате подробности алгоритмов указаны весьма скудно. Во всех ли задачах использовались одинаковые схемы химической кинетики?

2. Вопрос по исследованиям, выполненным в третьей главе. Судя по автореферату, расчеты проведены для фиксированной геометрии каналов высокого и низкого давлений при различной динамике раскрытия диафрагмы. Не исследовался ли вопрос о том, как изменятся условия самовоспламенения при уменьшении или увеличении объема камеры высокого давления?

3. Почему в расчетах в главе 4, которые выполнялись в условиях экспериментов, использованы только стехиометрические смеси? Представляется, что использование смесей с коэффициентом избытка воздуха, взятым из эксперимента, позволило бы проверить не только качественное, но и количественное согласование расчетных и экспериментальных данных.

**3. Институт автоматизации проектирования РАН** (Старший научный сотрудник Отдела вычислительных методов и турбулентности, к.ф.-м.н., доцент Уткин П.С., г. Москва) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Некоторые недостатки изложения результатов работы в автореферате касаются недостаточно подробного освещения важных особенностей вычислительных экспериментов. А именно, в тексте нет ни одного упоминания о характерном размере ячеек расчетных сеток в рассмотренных задачах, хотя есть фраза о том, что сеточная сходимость исследовалась. Без этого трудно оценить степень разрешения зон протекания химических реакций. Автор пишет, что использует уравнения Навье – Стокса, однако не пишет о том, используется ли какая-либо модель турбулентности. Данные вопросы особенно важны в задаче об истечении водорода под давлением, где требуется моделировать процесс смешения топлива и окислителя. Также написано, что анализировались различные модели кинетики химических реакций, и для каждой из рассмотренных задач выбиралась наиболее подходящая модель. Было бы любопытно увидеть рекомендации автора, основанные на опыте подобной деятельности, по поводу выбора той или иной кинетической схемы.

**4. Институт химической физики имени Н.Н. Семенова РАН** (Старший научный сотрудник Лаборатории гетерогенного горения, к.ф.-м.н., Тереза А.М., г. Москва) – отзыв положительный, с замечаниями:

1. Не представлены критерии выбора моделей детальных кинетических механизмов (ДКМ), определяющих химию самовоспламенения изучаемых горючих смесей в индукционном периоде и начальных стадиях горения изучаемых горючих смесей, применительно к условиям больших диапазонов температуры и давления изучаемых процессов.

2. Не отражены проблемы, связанные со сложностью численного решения уравнений газодинамики Навье – Стокса для многокомпонентного сжимаемого газа с учетом процессов переноса: вязкости, теплопроводности, диффузии и химических превращений в рамках выбираемого ДКМ, когда разброс собственных значений Якобиана составляет десятков и более порядков, что требует значительных вычислительных затрат. Из автореферата не ясно, проводилось ли диссертантом редуцирование ДКМ с целью понижения ранга матрицы Якоби и, если проводилось, то на основании каких критериев. В тоже время сам факт использования ДКМ с участием метана значительно повышает ценность представленной к защите диссертации и полученных в ней результатов.

**5. Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси** (Старший научный сотрудник Лаборатории физико-химической гидродинамики, к.ф.-м.н. Лещевич В.В., г. Минск, Беларусь) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В качестве замечания следует обратить внимание на отсутствие в автореферате сравнительного анализа результатов расчетов с экспериментальными данными, на основании которого выбирались соответствующие модели и механизмы химической кинетики для диссертационного исследования. Это крайне важный момент, так как от данного выбора зависит достоверность воспроизводимых в работе процессов и как следствие ее результаты и выводы.

- Второе замечание касается некоторой ограниченности практического применения полученных в диссертации результатов. Например, оценка нижнего предела воспламенения водорода проводилась только для атмосферного давления, и автор не указывает возможности применения предложенного метода для других условий. Особенности самовоспламенения водорода при истечении в канал, заполненный воздухом, выявлены для конкретной геометрии канала, а рассмотренная концепция

подавления детонационных режимов горения в ДВС за счет использования малых добавок низкоактивных компонент к водороду не проверена для различных режимов работы двигателя, например, связанных с изменением нагрузки, т.е. с увеличением объемного наполнения цилиндров горючей смесью.

**6. Закрытое акционерное общество «Научно-производственное объединение специальных материалов» (ЗАО «НПО СМ»)** (Старший научный сотрудник НИИ СМ к.т.н. Гук И.В., отзыв утвержден Генеральным директором – Генеральным конструктором ЗАО «НПО СМ» членом-корреспондентом РАН, академиком РАН, д.т.н., профессором, Сильниковым М.В., г. Санкт-Петербург) – отзыв положительный, с указанием неточностей и недостатков:

- В тексте автореферата не сказано, какой конкретно лагранжево-эйлеров метод использовался для решения систем дифференциальных уравнений, явный или неявный, сеточный или безсеточный (стр. 8).

- Не указаны точные границы исследуемого диапазона времен раскрытия диафрагмы (стр. 11).

- Не указано, на какую величину снижается значение КПД двигателя при увеличении угла поворота коленчатого вала (стр. 14).

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н. Медведев С.П. является ведущим ученым в области горения и взрыва, в частности, в области горения водорода, кинетики химического превращения при горении, а также процессов детонации;

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

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

3. Low-temperature ignition delay for hydrogen-air mixtures in light of a reaction mechanism with quantum correction / Medvedev S.P., Agafonov G.L., Khomik S.V. // Acta Astronautica. – 2016. – Vol. 126. – P. 150-153.

- к.ф.-м.н. Титова Н.С. является признанным специалистом в области кинетики химического превращения при горении, математического моделирования процессов горения.

1. Kinetic analysis of n-decane-hydrogen blend combustion in premixed and non-premixed supersonic flows / Starik A.M., Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Titova N.S., Torokhov S.A. // Combustion Theory and Modelling. – 2016. – Vol. 20(1). – P. 99-130.

2. Modeling study of combustion and pollutant formation in HCCI engine operating on hydrogen rich fuel blends / Kozlov V.E., Chechet I.V., Matveev S.G., Titova N.S., Starik A.M. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41(5). – P. 3689-3700.

3. Combustion improvement in HCCI engine operating on synthesis gas via addition of ozone or excited oxygen molecules to the charge: modeling study / Starik A.M., Korobov A.N., Titova N.S. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42(15). – P. 10475-10484.

Выбор Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН) в качестве ведущей организации обусловлен тем, что в ИБРАЭ РАН проводятся исследования, в том числе методами вычислительной гидродинамики, по определению критических условий для воспламенения водорода, что чрезвычайно важно для обеспечения штатного функционирования объектов атомной энергетики и что близко к тематике диссертационной работы соискателя.

1. Разработка и верификация модели рекомбинаторов РВК-500, -1000 для моделирования защитной оболочки АЭС с ВВЭР методами вычислительной гидродинамики / Тарасов О.В., Киселев А.Е., Филиппов А.С., Юдина Т.А., Григорук Д.Г., Кошманов Д.Е., Келлер В.Д., Христенко Е.Б. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 131-136.
2. Возможный механизм выхода газовых продуктов деления из натриевого теплоносителя / Киселев А.Е., Сегаль М.Д., Семенов В.Н., Филиппов М.Б., Цаун С.В. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2016. – № 3. – С. 23-31.
3. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / Душкин А.Л., Ловчинский С.Е., Рязанцев Н.Н., Сегаль М.Д. // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 3. – С. 60-69.

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

- определен нижний концентрационный предел устойчивого воспламенения водородно-воздушной смеси как минимальная концентрация водорода, ниже которой невозможно поддержание развития экзотермических реакций горения. Представлен новый метод определения нижнего концентрационного предела воспламенения на основе концепции Я.Б. Зельдовича о спонтанной волне горения;
- получено описание механизмов возникновения очагов воспламенения водорода при его истечении под высоким (60 атм) давлением в канал, заполненный воздухом. Выделены два различных типа очагов самовоспламенения, впервые подтверждающие недавние экспериментальные результаты из литературы. Получена оценка нижней величины давления, не приводящей к самовоспламенению водорода;
- определены минимальные добавки метана, водяного пара, избытка воздуха, обеспечивающие отсутствие детонационных режимов сгорания водорода в двигателе с искровым зажиганием. Определены концентрации низкоактивных добавок к водороду, обеспечивающие оптимальные параметры работы двигателя.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

- предложенный метод определения нижнего концентрационного предела устойчивого воспламенения может быть использован для оценки такого предела в смесях различных составов;
- исследованные механизмы образования очагов самовоспламенения водорода при его истечении под высоким давлением в канал представляют особую важность для составления критериев безопасного использования водорода.

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

- обнаруженные механизмы формирования очагов самовоспламенения водорода при его истечении в канал, а также оценка предела давления, ниже которого самовоспламенение не происходит, для конкретной частной геометрии канала представляют необходимый материал для проектирования компонент водородной энергетики;
- найденные значения добавок низкоактивных компонент к водороду, обеспечивающие отсутствие детонации в двигателе с искровым зажиганием, и составы, обеспечивающие оптимальные значения параметров работы двигателя, важны для разработки условий функционирования двигателей с искровым зажиганием, работающих на смесях с высоким содержанием водорода.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Институте химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН), Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (ИХКиГ СО РАН), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и во многих других научных учреждениях, связанных с проектированием объектов хранения водорода, а также устройств, использующих водород как топливо, в частности, двигателей внутреннего сгорания.



**Оценка достоверности результатов** исследования выявила:

- результаты получены методами вычислительной газовой динамики. Перед непосредственным решением задач диссертации осуществлялось проведение тестов на сходимость решения по расчетной сетке, а также расчеты по выбору механизма химической кинетики, оптимального для исследуемых условий по давлению, температуре и составу;
- результаты моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными, описанными в литературе, в том числе (для задач из глав 3, 4) с данными, полученными в ОИВТ РАН;
- основные результаты были представлены на 19 международных и всероссийских конференциях.

**Личный вклад соискателя** является одним из основных. Автором выполнены все необходимые модификации компьютерных кодов для решения поставленных задач диссертации, проведена валидация кодов, уточнение используемых моделей для расчета транспортных коэффициентов, адаптация кода для проведения моделирования с использованием детальных механизмов химической кинетики, проведены тесты на сходимость для разбираемых задач. Автором выполнено компьютерное моделирование поставленных задач, проведен анализ полученных результатов и их сопоставление с литературными и экспериментальными данными. Автор принимала активное участие в обсуждении и интерпретации результатов, формулировке и обосновании выводов, вошедших в диссертацию.

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 17.04.2019г. диссертационный совет принял решение присудить Смыгалиной А.Е. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 11 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 22, против 0, недействительных бюллетеней 0.

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

Андреев Н.Е.

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

Васильев М.М.

17.04.2019г.

