

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

ОТЗЫВ

официального оппонента Медведева Сергея Павловича
на диссертационную работу Смыгалиной Анны Евгеньевны
«Влияние состава горючих смесей на основе водорода на режимы
воспламенения и горения» на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и
теоретическая теплотехника.

Диссертация Смыгалиной А.Е. посвящена актуальной и практически важной теме исследования режимов воспламенения и горения смесей на основе водорода, проводимому методами вычислительной газовой динамики. В последние годы интерес к проблеме горения и взрыва водорода резко возрос в связи с разноплановостью направлений использования фундаментальных результатов в этой области. Прежде всего, это проблемы водородной взрывобезопасности при реализации вероятного сценария тяжелой аварии на АЭС, а также при хранении больших объемов водорода. Другое важное направление – использование водорода в качестве экологически чистого горючего. Известной особенностью смесей водорода с окислителем (обычно воздухом) является высокая, по сравнению с большинством углеводородов, детонационная способность. Быстрые режимы горения и детонация способны нанести значительный ущерб. Поэтому одной из важных целей экспериментальных и теоретических исследований является разработка научных основ систем водородной взрывозащиты. В диссертационной работе Смыгалиной А.Е. удачно сочетаются накопление фундаментальных знаний о горении и взрыве водорода с демонстрацией практических приложений для взрывобезопасности и создании перспективных двигательных установок.

Во **введении** диссертации представлена актуальность работы, описана степень разработанности темы исследования, приведены цели и задачи работы, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также используемая методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены апробация результатов и личный вклад автора. Сведения, представленные в данном разделе, дают ясное понимание оригинальности исследования в ряду имеющихся в литературе аналогичных работ.

В **первой главе** описаны математическая модель и численный метод, а также рассмотрена проблема выбора механизма химической кинетики для использования в расчетах, представляемых в последующих главах диссертации. Валидация численной методики проведена общепризнанным путем расчета ключевых параметров, зависящих от кинетического механизма окисления, а именно, периода индукции (задержки самовоспламенения) и ламинарной скорости пламени. Также проведено сравнение рассчитанных величин с имеющимися в литературе экспериментальными данными с целью выбора для решения поставленных задач детального кинетического механизма, наиболее подходящего для моделирования процессов в заданных широких диапазонах концентрации, давления, температуры.

Во **второй главе** представлены результаты определения нижнего концентрационного предела воспламенения водородо-воздушной смеси, а также обзор литературы по данной проблеме. Показано, что нульмерное приближение для расчета нижнего предела не является вполне корректным, поскольку приводит к заниженному результату – концентрации водорода в воздухе около 1%, ввиду чего в рамках одномерного подхода, учитывающего как газодинамические процессы, так и процессы переноса, предложена постановка задачи определения нижнего предела на основе теории Я.Б. Зельдовича о развитии спонтанной волны горения на градиенте времени индукции. При решении задачи в данной постановке наблюдается формирование спонтанной волны горения, тепловой волны и волны сжатия. По мере достижения фронта волны горения областей со все более низкой концентрацией происходит смена режима течения, характеризующая опережением волной сжатия волны горения. В главе представлен также анализ нижнего концентрационного предела как минимально возможного для распространения пламени на любое расстояние от зоны инициирования горения.

В третьей главе представлено исследование механизма самовоспламенения водорода при его истечении под высоким давлением в канал, заполненный воздухом, а также обзор литературы. Описана постановка решаемой задачи: процесс исследовался при начальном давлении водорода 60 атм и конечных временах раскрытия диафрагмы 20 - 40 мкс. Выявлено формирование двух типов очагов самовоспламенения водорода: 1) на начальной стадии истечения; 2) ниже по течению в пограничном слое у стенки канала. Указано, что моменты и место образования очагов, а также динамика их развития согласуются с известными экспериментальными данными. Приведено подробное описание возможных механизмов формирования очагов самовоспламенения.

В четвертой главе рассмотрена задача подавления детонационных режимов сгорания смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием. Проведен обзор литературы по современному состоянию проблемы использования смесей с высоким содержанием водорода в двигателях внутреннего сгорания. Предложен метод подавления детонации, заключающийся в использовании небольших добавок низкоактивных компонент: метана, водяного пара, избытка воздуха к базовой стехиометрической водородо-воздушной смеси. В ходе моделирования выявлены критические составы, обеспечивающие отсутствие детонации в двигателе. Проанализированы основные параметры работы двигателя: максимальное давление в цилиндре и угол поворота коленчатого вала, соответствующий достижению максимального давления, в зависимости от количества добавок малоактивных компонент и представлены рекомендации по составам, обеспечивающим оптимальные параметры работы двигателя.

В заключении сформулированы основные выводы проведенных исследований.

Методические вопросы и анализ результатов выполненных исследований представлены в диссертации достаточно полно и логически обоснованно. По работе следует высказать ряд критических замечаний и рекомендаций:

1. Известно, что детальные кинетические механизмы окисления водорода, как и экспериментальные данные демонстрируют значительный (достигающий порядок величины и больше) разброс по задержкам самовоспламенения в области низких температур (при $T < 1100\text{K}$). По этой причине представляет интерес анализ влияния кинетического

механизма на расчетную величину нижнего концентрационного предела воспламенения. В работе такой анализ отсутствует.

2. На основе представленных в диссертации подходов было бы полезно получить зависимость концентрационных пределов воспламенения от температуры и давления, и уже на основе этих данных рассмотреть возможность изменения и дополнения существующего ГОСТа.
3. На стр.78 декларируется, что формирование вихревых течений является основным механизмом перемешивания водорода с воздухом. Это утверждение следует дополнительно обосновать и показать отличия от механизма турбулентного перемешивания.
4. При моделировании сгорания в поршневом двигателе (глава 4) мощность искрового поджига не варьировалась. Между тем, как показывает практика численного моделирования, простое уменьшение его энергии может привести к подавлению детонационного режима сгорания. Отсутствие такого анализа в диссертационной работе может приводить к несоответствию результатов расчетов и экспериментов.
5. Замечания по опечаткам и оформлению работы: 1) в подписи к рис.33 упоминается профиль скорости, а на рисунке изображено давление; 2) на стр.107 вместо ссылки на рисунок 35 следует, по-видимому, сослаться на рис.36.

Актуальность работы определяется тем, что задачи диссертации связаны с решением следующих проблем современной энергетики: обеспечение безопасности на АЭС, обеспечение безопасного хранения и использования водорода, определение оптимальных составов топлива на основе водорода для использования в двигателях внутреннего сгорания.

Научная новизна заключается в разработке оригинального метода определения нижнего концентрационного предела воспламенения на основе концепции о спонтанной волне горения; описании механизма образования и динамики развития очагов самовоспламенения водорода при его истечении под высоким давлением в канал, заполненный воздухом; разработке метода подавления детонационных режимов сгорания в двигателе, работающем на водороде; исследовании зависимостей параметров работы двигателя от состава околостехиометрических смесей на основе водорода.

Теоретическая значимость работы определяется предложенным подходом для расчетно-теоретического определения нижнего

концентрационного предела воспламенения горючих смесей, детально представленными механизмами образования очагов самовоспламенения водорода при его истечении под высоким давлением в канал, представляющими важность для решения вопросов водородной безопасности, предложенным подходом для предотвращения детонационных режимов сгорания смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием.

Практическая значимость работы определяется тем, что разработанный метод определения нижнего концентрационного предела, исследованные механизмы образования очагов самовоспламенения водорода при его истечении под высоким давлением в канал, заполненный воздухом, предложенный метод подавления детонации смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием за счет использования малых добавок низкоактивных компонент, а также предложенные составы, обеспечивающие оптимальные характеристики сгорания в двигателе, могут использоваться для исследований сгорания смесей на основе водорода, проводимых в Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Институте химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН), Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКиГ СО РАН), Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН), Госкорпорации «Росатом».

Результаты исследований, представленные в работе, докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: «Фундаментальные и прикладные задачи механики», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2017; XXVIII, XXX, XXXII Conference on interaction of intense energy fluxes with matter, Эльбрус, 2013, 2015, 2017; XXIX, XXXI Conference on equations of state for matter, Эльбрус, 2014, 2016; 7, 8, 9 конференциях «Необратимые процессы в природе и технике», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2013, 2015, 2017; 36th International symposium on combustion, Seoul, 2016; 7th International conference “Photosynthesis research for sustainability”, Пущино, 2016; Международном конгрессе «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность», Москва, 2015; «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2015; 7th European combustion meeting, Budapest, 2015; «Физико-

математические проблемы создания новой техники», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2014; 6th International symposium on non-equilibrium processes, plasma, combustion and atmospheric phenomena, Сочи, 2014; конференции в рамках Летней суперкомпьютерной академии, ВМК МГУ, Москва, 2014; XXV Симпозиуме «Современная химическая физика», Туапсе, 2013; 54й конференции «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе», МФТИ, Москва, 2011, и на семинаре Лаборатории водородных энергетических технологий ОИВТ РАН (21 апреля 2015, Москва).

Публикации, содержащие основные результаты диссертации, в журналах из перечня ВАК:

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.

Личный вклад автора является одним из основных. Автор выполнила необходимые модификации компьютерных кодов для решения поставленных задач, участвовала в постановке и анализе задач, а также в интерпретации результатов, вошедших в диссертацию.

В **заключении** следует отметить, что упомянутые недостатки не влияют на качество исследований, проведенных А.Е. 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. Результаты исследований А.Е. Смыгалиной докладывались и обсуждались на многочисленных российских и международных конференциях. Разработанные подходы и полученные расчетно-теоретические результаты могут служить фундаментальной основой для разработки средств и методов повышения водородной взрывобезопасности и создания перспективных энергетических установок, использующих водород в качестве топлива.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации.

На основании сформулированных положений следует заключить, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Смыгалина Анна Евгеньевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил заведующий лабораторией гетерогенного горения Института химической физики имени Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН) д.ф.-м.н. Медведев Сергей Павлович.

119991, г. Москва, Косыгина ул. 4, (495) 939-73-02,
s_p_medvedev@chph.ras.ru

Ученый секретарь ИХФ РАН

к.х.н. Стрекова Л.Н.

119991, г. Москва, Косыгина ул. 4, (499) 137-63-20, strekova@chph.ras.ru



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической физики имени Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН) 119991, г. Москва, ул. Косыгина 4, (499) 137-29-51, icp@chph.ras.ru