

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01
(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 25.12.2024г. № 8

О присуждении Ельянову Артёму Евгеньевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Динамика и структура фронта водородно-воздушного пламени в каналах и плоских зазорах» по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 16.10.2024г., (протокол заседания № б) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Ельянов Артём Евгеньевич 1996 года рождения, в 2020 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 20 – физической газовой динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2024 году окончил очную аспирантуру Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института
высоких температур Российской академии наук

Диссертация выполнена на базе лаборатории физической газовой
динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией физической газовой динамики
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук,
Голуб Виктор Владимирович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
лаборатории микрогорения Департамента энергетических систем
Политехнического института Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный
федеральный университет», Минаев Сергей Сергеевич;

- кандидат физико-математических наук, доцент кафедры химической
физики Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
ядерный институт «МИФИ», Аксенов Виктор Серафимович;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В.Ломоносова» в своем
положительном заключении, составленном профессором кафедры газовой и
волновой динамики, заведующим лабораторией волновых процессов
механико-математического факультета ФГБОУ ВО МГУ им.
М.В.Ломоносова д.ф.-м.н. Смирновым Николаем Николаевичем
(утвержденном 13 ноября 2024г., проректором МГУ имени М.В. Ломоносова
Федяниным А.А) указала, что теоретическая значимость определяется в

первую очередь новизной полученных результатов. Представленные результаты могут использоваться для валидации расчетов. Интересны продемонстрированные структуры и формы фронта пламени. Практическая значимость заключается в том, что модель «обратного пальцеобразного» пламени может учитываться при конструировании водородных энергетических установок, например для повышения эффективности работы двигателей внутреннего сгорания. «Колпачкообразные» пламена могут распространяться в плоских зазорах и нести дополнительные риски при аварийном сценарии работы энергетических установок.

Результаты могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, в организациях, разрабатывающих энергетическое оборудование, в частности в Объединенном институте высоких температур РАН, Институте теплофизики СО РАН, компаниях ПАО «Газпром», ГК «Росатом» и «КАМАЗ».

Соискатель имеет 23 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 4 работы в рецензируемых научных изданиях и 7 тезисов в сборниках трудов конференций:

1. Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е., Исследование распространения водородно-воздушного пламени в плоском зазоре методом инфракрасной визуализации //Теплофизика высоких температур. – 2024. – Т. 62. – №. 3. – С. 425-431.
2. A.Elyanov, V.Golub, V.Volodin, P.Alekhnovich, Decay of a hydrogen-air flame front to cup-like cells in a narrow horizontal gap //Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Т. 191. – С. 1872-1882.
3. A.Elyanov, V.Golub, V.Volodin, Premixed hydrogen-air flame front dynamics in channels with central and peripheral ignition //International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47. – №. 53. – С. 22602-22615.
4. Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е., Горение водородно-воздушных смесей в канале при кольцевом воспламенении

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (Главный научный сотрудник лаборатории горения дисперсных систем, доктор химических наук Рубцов Н.М.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- имеются опечатки, затрудняющие восприятие работы. Например, Стр. 7. “когда фронта пламени представляет собой «пальцеобразную» структура”. Стр. 7. “Показаны (должно быть “измерены”) скорости фронта пламени в зависимости от концентрации”. Стр. 14. “проводились эксперименту по распространению пламени”. Стр. 20. “Построена аналитическая модели «обратного пальцеобразного» пламени”.

- при рассмотрении реакции горения водорода не учитывается её разветвленно-цепной характер, а именно важная роль атомов и радикалов в химическом превращении. Действительно, если атом водорода гибнет на стенке реактора (а для плоского зазора этот процесс важен и при атмосферном давлении), то этот атом не будет участвовать в цикле реакций, приводящих к воспроизводству этих атомов, т.е. не осуществится химическое превращение, приводящее к выделению тепла. Таким образом, процесс гетерогенной гибели атомов формально эквивалентен дополнительным потерям тепла. Эти потери следовало бы учесть, например, в аналитической модели «обратного пальцеобразного» пламени (Глава 1) и при получении критерия, определяющего распад фронта пламени (Глава 2). Данное замечание автору следует принять во внимание при дальнейшем развитии исследований.

2. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук (ведущий научный сотрудник Математического института имени В.А.

Стеклова РАН, доктор физико-математических наук Марков В.В.) – отзыв положительный, с замечаниями

- на стр. 3, 7, 14 и 20 имеются опечатки, которые, впрочем, не искажают содержание;

- в работе для периферийного воспламенения используется установленная в канал пластина, которая формирует периферийный зазор. Однако изначально воспламенение осуществлялось искрой у закрытого торца на некотором расстоянии от пластины. Данный тип воспламенения подразумевает формирование фронта пламени, огибающего пластину. Огибающий фронт может также рассматриваться в виде струй, выходящих в открытое пространство канала с заданной начальной скоростью. В работе этот механизм не учитывается и не рассматривается влияние расстояния искры до пластины, которое может влиять на начальную скорость фронта и образующую форму «обратного пальцеобразного» фронта пламени за ней.

- в части работы, посвященной распространению фронта пламени в плоских зазорах, говорится о балансе между теплом, выделившемся при сгорании смеси и теплом, поглощенным стенками камеры сгорания. Однако количественные оценки этих параметров не приводятся в явном виде.

**3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук** (старший научный сотрудник лаборатории гетерогенного горения ФИЦ ХФ РАН, кандидат физико-математических наук Тереза Анатолий Михайлович) – отзыв положительный, с замечаниями.

- недостаточно подробно изложены и определены параметры, представляющие результаты диссертации. Рецензенту приходится обращаться к полному тексту диссертации для их понимания.

- На стр.7 фраза «Распад фронта пламени возникает в связи с локальным затуханием искривленного фронта пламени согласно механизму термодиффузионной неустойчивости» полностью не раскрывает изучаемый

процесс, поскольку не включает в себя влияние химической кинетики (Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / М: Наука. 1987.)

3. На стр. 13 при рассмотрении ограничений при построении аналитической модели «обратного пальцеобразного» пламени не упоминается влияние гетерогенных процессов на поверхности, способных вносить примесь активных атомов и радикалов.

4. **Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет»** (доцент кафедры экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра Политехнического института Сургутского государственного университета, кандидат физико-математических наук Семенов Олег Юрьевич) – отзыв положительный, с замечаниями.

- Не приведены температурные характеристики на основе ик-излучения, зарегистрированного камерой.
- Не представлено полное описание разницы между «пальцеобразным» и «тюльпанообразным» пламенем.
- В работе можно выделить недостатки при оформлении текста.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н. Минаев Сергей Сергеевич специалист по теоретическим и экспериментальным исследованиям в области горения газов, направленных на поиск эффективных и экологически чистых способов сжигания топлив.

1. Zakharov A. D., Fursenko R. V., Minaev S. S. Optimisation method for automatic selection of rate constants of global reaction mechanisms //Combustion Theory and Modelling. – 2023. – Т. 27. – №. 2. – С. 153-167.
2. Moroshkina, A. D., Ponomareva, A. A., Mislavskii, V. V., Sereshchenko, E. V., Gubernov, V. V., Bykov, V. V., Minaev, S. S. Determining the global

activation energy of methane–air premixed flames //Combustion Theory and Modelling. – 2023. – Т. 27. – №. 7. – С. 909-924.

3. Moroshkina, A., Ponomareva, A., Mislavskii, V., Sereshchenko, E., Gubernov, V., Bykov, V., Minaev, S. Activation Energy of Hydrogen–Methane Mixtures //Fire. – 2024. – Т. 7. – №. 2. – С. 42.

- к.ф.-м.н. Аксенов Виктор Серафимович является признанным специалистом в области физики горения и детонации газовых смесей.

1. Frolov, S. M., Shamshin, I. O., Aksenov, V. S., Ivanov, V. S., Vlasov, P. A. Ion sensors for pulsed and continuous detonation combustors //Chemosensors. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 33.
2. Shamshin, I. O., Ivanov, V. S., Aksenov, V. S., Gusev, P. A., Frolov, S. M. Deflagration-to-detonation transition in a semi-confined slit combustor filled with nitrogen diluted ethylene-oxygen mixture //Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 3. – С. 1098.
3. Shamshin, I. O., Ivanov, V. S., Aksenov, V. S., Gusev, P. A., Avdeev, K. A., Frolov, S. M. Mild Detonation Initiation in Rotating Detonation Engines: An Experimental Study of the Deflagration-to-Detonation Transition in a Semiconfined Flat Slit Combustor with Separate Supplies of Fuel and Oxidizer //Aerospace. – 2023. – Т. 10. – №. 12. – С. 988.

- на кафедре газовой и волновой динамики механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» проводятся исследования процессов горения и детонации газовых смесей. Под руководством профессора, д.ф.-м.н. Н.Н. Смирнова сотрудники кафедры принимали участие в первом крупномасштабном эксперименте NASA и Европейского космического агентства по горению в невесомости SAFFIRE.

1. Smirnov, N.N., Azatyan, V.V., Mikhilchenko, E.V., Smirnova, M.N., Stamov, L.I., Tyurenkova, V.V. Safety of using hydrogen: Suppression of detonation in hydrogen-air mixtures // Acta Astronautica. – 2024. – Т. 224. – С. 69-81.

2. Smirnov, N.N., Azatyan, V.V., Nikitin, V.F., Mikhalychenko, E.V., Smirnova, M.N., Stamov, L.I., Tyurenkova, V.V. Control of detonation in hydrogen-air mixtures // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Т. 49. – С. 1315-1324.
3. Смирнов, Н.Н., Никитин, В.Ф., Михальченко, Е.В., Стамов, Л.И. Срыв развитой детонации водородно-воздушной смеси малой добавкой углеводородного ингибитора // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58. – №. 5. – С. 64-71.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- выявлено, что фронт водородно-воздушного пламени, распространяющегося в трубах и каналах при периферийном воспламенении, представляет собой форму «обратного пальцеобразного» пламени. Обнаружено, что «обратное пальцеобразное» пламя распространяется быстрее классического «пальцеобразного» пламени, возникающего при центральном воспламенении, в 2.3 раза быстрее в смеси с 12 об.% содержанием водорода и в 2.8 раза в смеси с 13 об.% содержанием водорода.

- определено оптимальное отношение площади пластины, формирующей кольцевую щель, к площади поперечного сечения трубы, которое обеспечивает максимальную скорость фронта пламени на начальном этапе распространения пламен водородно-воздушных смесей с содержанием водорода 15 и 20 об.% и оно составляет 92.7%.

- показано, что в плоских зазорах толщиной от 3 до 5 мм фронт пламени в бедных водородно-воздушных смесях с содержанием водорода от 7 до 10 об.% распадается на отдельные «колпачкообразные» ячейки при локальном затухании искривленного фронта в вогнутостях.

- предложен критерий распада фронта пламени в плоском зазоре на основе модифицированного числа Пекле, который позволяет предсказывать тенденцию фронта пламени к распаду на отдельные ячейки.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- модель «обратного пальцеобразного» пламени может использоваться как в расчетных работах, так и учитываться при конструировании водородных энергетических установок. Преимущества периферийного воспламенения перед центральным выражающееся в более высокой скорости распространения фронта пламени может повысить эффективность работы двигателей внутреннего сгорания.

- распад фронта пламени в плоском зазоре поднимает вопрос безопасности эксплуатации водородных топливных ячеек. «Колпачкообразные» пламена могут распространяться в плоских узких зазорах и нести риски воспламенения в случае утечки водорода. Условия существования «колпачкообразных» пламен чувствительны к толщине зазора и концентрации смеси, и данный режим горения может проявляться в местах, где не поддерживается дефлаграционное горение.

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

– полученные научные данные способствуют более детальному пониманию динамики горения водородно-воздушных смесей и могут существенно повлиять на создание более эффективных систем управления процессами горения. Это, в свою очередь, может повысить уровень безопасности в различных промышленных установках, включая двигатели внутреннего сгорания и горелочные устройства. Результаты исследования могут стать основой для разработки устойчивых и безопасных технологий использования водорода в энергетических системах и промышленных процессах.

Результаты могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, в организациях, разрабатывающих энергетическое оборудование, в частности в Объединенном институте высоких температур РАН, Институте теплофизики СО РАН, ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, компаниях ПАО «Газпром», ГК «Росатом», ОАО «РЖД» и «КАМАЗ».

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность представленных данных определяется как методами проводимых исследований, так и сопоставлением результатов с работами различных научных групп. Так, например, распад фронта пламени в плоском зазоре происходит при параметрах толщины зазора и концентрации смеси, совпадающих с результатами научных групп НИЦ Курчатовский Институт и Технологического Института Карлсруэ. Совпадение экспериментально полученных результатов с аналитической моделью подтверждает их достоверность.

Личный вклад соискателя состоит в том, что автором диссертации лично были спроектированы, сконструированы и собраны все используемые экспериментальные стенды вплоть до изготовления уникальных частей установок с применением соответствующих станков. Все эксперименты и последующая обработка их результатов также проводились автором лично. Была проведена синхронизация высокоскоростной и инфракрасной камеры. В процессе проведения экспериментов автором дорабатывались стенды и условия проведения экспериментов для достижения максимально точных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 6 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Ельянов Артём Евгеньевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 25.12.2024г. диссертационный совет принял решение за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний присудить Ельянову Артёму Евгеньевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплофизика.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 26 человек, из них очно: 9 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 4 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 26 против 0, недействительных бюллетеней - 0.