

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 27.04.2022г. № 6

О присуждении Мельниковой Ксении Сергеевны, гражданке Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Горение ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на больших пространственных масштабах» по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 24.02.2022г., (протокол заседания № 4) 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 Мельникова Ксения Сергеевна 1992 года рождения, в 2015 году окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)".

В 2019 году окончила очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории № 15.2 – Вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Лаборатории № 15.2 – Вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией № 15.2 - Вычислительной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Киверин Алексей Дмитриевич.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Термогазодинамики и горения» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук Якуш Сергей Евгеньевич;

- доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Физико-математического моделирования процессов горения» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук Фурсенко Роман Викторович;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном сотрудниками отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок: заведующим отделением д.т.н. Киселевым А.Е., зам. заведующего отделением д.ф.-м.н. Семеновым В.Н. и утвержденном 31.03.2022 директором ИБРАЭ РАН, доктором физико-

математических наук Л.А. Матвеевым, указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой с высокой научной значимостью, которая обусловлена тем, что расчетная оценка нижнего концентрационного предела, классификация режимов горения, представляют практический интерес с точки зрения анализа и обоснования безопасности объектов, на которых возможны утечки и выбросы водорода в атмосферу. Практически результаты работы могут быть использованы при проектировании и анализе безопасности объектов производства, хранения, транспортировки и использования водорода.

Основное содержание диссертации изложено в 6 публикациях в журналах, рекомендованных ВАК, 6 из которых индексируются в международной системе «Web of Science»:

1. I.S. Yakovenko, M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, K.S. Melnikova Large-scale flame structures in ultra-lean hydrogen-air mixtures // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. V. 43. p. 1894-1901.

2. В.В. Володин, В.В. Голуб, А.Д. Киверин, К.С. Мельникова, А.Ю. Микушкин, И.С. Яковенко Динамика очагов горения в ультра-бедных водородно-воздушных смесях в крупных масштабах в условиях земной гравитации // *Горение и взрыв*. 2019. Т.2, №12. стр. 53-59.

3. V.V. Volodin, V.V. Golub, A.D. Kiverin, K.S. Melnikova, A.Y. Mikushkin, I.S. Yakovenko Large-scale dynamics of ultra-lean hydrogen-air flame kernels in terrestrial gravity conditions // *Combust. Sci. Tech*. 2021. V. 193(2). p. 225-234.

4. I. Yakovenko, A. Kiverin, K. Melnikova Ultra-Lean Gaseous flames in terrestrial gravity conditions // *Fluids*. 2021. V. 6(21). 1058113. (ISSN 2311-5521).

5. A. D. Kiverin, I.S. Yakovenko, K. S. Melnikova On the structure and stability of ultra-lean flames // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1147. 012048.

6. A. D. Kiverin, K. S. Melnikova, K. O. Minaev, A.E.Smygalina, I.S. Yakovenko Peculiarities of mathematical modeling of combustion of hydrogen flames // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1348. 012091.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от нижеследующих организаций:

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (зам. директора по научной работе, д.ф.-м.н., доцент Шарыпов О.В.) – отзыв положительны, без замечаний.

2. Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси (зав. лаб., к.ф.-м.н. Кривошеев П.Н.) – отзыв положительный, с замечаниями:

1) В тексте автореферата не указано какая модель турбулентности использовалась автором, и использовалась ли вообще. Возможно ответ на указанный вопрос содержится в тексте диссертации.

2) Основные результаты диссертации, пункт 2. На мой взгляд не совсем корректно писать про способ подавления образования вторичных очагов пламени и снижения скорости всплытия очага горения, с помощью теплоотвода к стенкам. Вряд ли тут речь может идти о способе как таковом.

3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Тереза А.М.) – отзыв положительный, с замечаниями:

1) На стр.4 наблюдается опечатка при ссылке на детальный кинетический механизм (ДКМ) работы [3], в котором рассматриваются 20 элементарных обратимых реакции, а не 21, как указано в автореферате.

2) К сожалению, в автореферате не представлено рассмотрение других ДКМ, что дало бы возможность получения оценки влияния химических превращений на очаговое воспламенение в зонах больших градиентов температуры и давления (1-й и 2-й пределы воспламенения).

3) В автореферате отсутствует какая-либо информация о распределении промежуточных продуктов горения в зоне воспламенения и распространения очагов пламени.

4. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук** (зав. лаб., д.ф.-м.н. Султанов В.Г.) – отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- доктор физико-математических наук Якуш Сергей Евгеньевич является ведущим специалистом в области физики горения и взрыва газообразных и дисперсных сред, а также крупным специалистом в области численного моделирования многофазных и реагирующих течений.

1. Rashkovskiy, S.A., Yakush, S.E. (2020). Numerical simulation of low-melting temperature solid fuel regression in hydrid rocket engines. // Acta Astronautica, 176, 710-716.

2. Рашковский, С.А., Милёхин, Ю.М., Федорычев, А.В., Якуш, С.Е. (2020). Механизм стабилизации горения в канале заряда твердого топлива в прямоточном воздушно-реактивном двигателе. // Доклады Академии наук, 390(1), 51-56.

3. Борисов, В.Е., Якуш, С.Е. (2019). Численное моделирование распространения метанового пламени в зазоре между параллельными пластинами. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 4, 1-20.

- доктор физико-математических наук Фурсенко Роман Викторович является признанным специалистом в области нестационарного горения в системах с рециркуляцией тепла, пористых средах, а также в условиях близких к пределам горения.

1. Maznoy, A., Pichugin, N., Yakovlev, I., Fursenko, R., Petrov, D., Shy, S. (2021). Fuel interchangeability for lean premixed combustion in cylindrical radiant burner operated in the internal combustion mode. // Applied Thermal Engineering, 186, 115997.

2. Fursenko, R.V., Chudnovskii, V.M., Minaev, S.S., Okajima, J. (2020). Mechanism of high velocity jet formation after a gas bubble collapse near the micro fiber immersed in a liquid. // International Journal of Heat and Mass Transfer, 163, 120420.

3. Fursenko, R., Mokrin, S., Minaev, S. (2019). Stationary combustion regimes and extinction limits of one-dimensional stretched premixed flames in a gap between two heat conducting plates.// Proceedings of the Combustion Institute, 37(2), 1655-1661.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук является профильной организацией, специализирующейся в области комплексных исследований проблем безопасности объектов атомной энергетики и промышленности. В организации разрабатываются эффективные подходы к обоснованию безопасности, которые базируются на разработке и практическом применении современных математических и программных алгоритмов, разработке детальных физических моделей сложных процессов и методов вероятностного анализа безопасности, организации банков экспериментальных и эксплуатационных данных, создании численных моделей переноса радиоактивных и химически опасных веществ в окружающей среде и эффективных методик оценки влияния этих веществ на природную среду и человека. В частности, в отделении «Анализа безопасности ядерных установок» разрабатываются физико-математические модели процессов тепло- и массопереноса в задачах анализа безопасности на объектах использования атомной энергии, проводится разработка расчетных кодов и интегрированных программных комплексов для анализа безопасности АЭС с реакторами водо-водяного типа на тепловых нейтронах и АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

1. Tolias, I. C., Kanaev, A. A., Koutsourakis, N., Glotov, V. Y., Venetsanos, A. G. (2021). Large Eddy Simulation of low Reynolds number turbulent hydrogen jets -

Modelling considerations and comparison with detailed experiments. // International Journal of Hydrogen Energy, 46(23), 12384-12398.

2. Afanasiev, N.A., Goloviznin, V.M., Semenov, V.N., Sipatov, V.N. Nesterov, S.S. (2021). Direct simulation of thermoacoustic instability in gas generators using the cabaret scheme. // Mathematical models and Computer simulations, 13(5), 820-830.

3. Большов, Л.А., Глотов, В.Ю., Головизнин, В.М., Канаев, А.А., Киселев, А.Е., Юдина, Т.А. (2019). Валидация кода CABARET-SC1 на экспериментах по водородной взрывобезопасности на АЭС. // Атомная энергетика, 127(4), 18-23.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– Впервые описаны ведущие физические механизмы, определяющие развитие горения в околопредельных ультра-бедных водородно-воздушных смесях внутри неограниченных объемов, заполненных предварительно перемешанной газообразной смесью. На основе результатов численного моделирования продемонстрирована ведущая роль газодинамических течений, формирующихся при всплытии очага горения в гравитационном поле. Наличие вихревых потоков приводит к растяжению и разрушению фронта пламени, в результате чего наблюдается сложная многоочаговая структура. В зависимости от активности смеси наблюдается тушение горения (в смесях с объемным содержанием водорода 5% и менее) или же наблюдается устойчивое горение в виде сложной многоочаговой структуры пламени (для смесей с содержанием водорода 5,5–9,0%).

– Продемонстрирован способ подавления образования вторичных очагов горения и снижения скорости всплытия очага горения, с помощью теплоотвода к стенкам.

– Продемонстрировано хорошее согласие проведенных расчетов с экспериментальными данными по динамике всплытия очага горения, его топологии, что подтверждает корректность результатов математического

моделирования и выявленных на его основе базовых физических механизмов, влияющих на процессы горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей.

– Предложена классификация режимов устойчивого и неустойчивого горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей на основе аналогии «пламя-пузырек» и на основе совместного анализа динамики газовых пузырьков в приближении несмешивающихся газов и динамики очагов ультра-бедного горения. Выявлено два основных сценария развития горения в ультра-бедных водородно-воздушных смесях в зависимости от содержания водорода в смеси.

Научная и практическая значимость исследования состоит в изучении тонких механизмов погасания пламени при рассмотрении горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей в условиях земной гравитации, для которых невозможно стационарное фронтное горение. А именно, в выявлении определяющей роли вихревых течений в эволюции очага горения. Полученные в ходе исследования данные по механизмам тушения горения и по значениям нижнего концентрационного предела распространения горения имеют несомненное прикладное значение, что связано в первую очередь с оценкой рисков при возникновении аварийных ситуаций при производстве, хранении и транспортировке водорода, а также при авариях на АЭС. Кроме того, количественная информация о пределах возгорания водорода может найти применение при проектировании датчиков водорода и систем его рекомбинации.

Результаты работы могут быть использованы для широкого круга исследований в области физики нестационарного горения и взрыва, проводимых в институтах Российской академии наук, занимающихся проблемами горения и безопасности, таких как Объединенный институт высоких температур РАН, Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Федеральный исследовательский центр Химической физики им. Н.Н.

Семенова РАН. А также в прикладных организациях в области пожаровзрывобезопасности, таких как Всероссийский институт противопожарной обороны МЧС РФ, Академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что сделанные в работе выводы основаны на детальном анализе имеющейся в литературе экспериментальной и теоретической информации, а также на специально поставленных и решенных численно задачах. При этом в основу математической модели и вычислительного алгоритма, использованных при проведении численных исследований, положены общепринятые на сегодняшний день концепции описания фундаментальных законов горения газообразных сред. Проверка корректности полученных результатов основана на процедуре валидации использованной математической модели и реализующих ее компьютерных кодов. Верификация результатов осуществлялась с привлечением экспериментальных данных, полученных в лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН, а также с помощью данных, имеющихся в литературных источниках. Полученные расчетные результаты для значения нижнего концентрационного предела распространения горения согласуются с известными экспериментальными и расчетными данными.

Личный вклад соискателя состоит в разработке физико-математической модели в приближении малой сжимаемости, проведении вычислений, анализе и интерпретации результатов. Все основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, сформулированы коллективом авторов с непосредственным участием автора диссертации.

Апробация результатов исследования проводилась на 7 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Соискатель Мельникова Ксения Сергеевна согласилась с замечаниями

и ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию и обоснования.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пунктов 9-11, установленными Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., ред. 11.09.2021г.

На заседании от 27.04.2022г. диссертационный совет принял решение присудить Мельниковой Ксении Сергеевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 22 человек, из них очно: 5 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 3 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – 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 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

27.04.2022г.

