

ГВЕРЖДАЮ»
директора ФГБУН
Института теплофизики
С.С. Кутателадзе СО РАН
м.н. Сиковский Дмитрий
Иппович

21.02.2024

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Тамбовцева Александра Сергеевича «Исследование сценариев диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию особенностей горения струй водорода, истекающих из сопел микрометрового масштаба (в сотни микрометров) на до- и сверхзвуковой скорости. Рассмотрены случаи одиночной струи топлива, взаимодействия двух струйных факелов, ориентированных под небольшим углом, а также условия зажигания и режимы горения комбинированной струи, организованной центральным и кольцевым соосным соплами.

Актуальность темы диссертации

Актуальность исследования связана с широким распространением миниатюрных горелочных устройств в различных технических приложениях: от бытовых нагревателей до энергетического оборудования небольшой мощности. Удобство применения таких горелочных устройств обусловлено, в том числе, возможностью масштабирования нагревательного устройства, камеры сгорания и котла, при объединении нескольких микро/мини-горелочных устройств. При этом важно понимать особенности взаимодействия струй и факелов между собой, их взаимное влияние на устойчивость пламени и режимы горения. Также важно подчеркнуть, что водород является перспективным видом топлива для обеспечения глобального снижения выбросов CO₂ в атмосферу земли. Однако, сложность его хранения из-за негативного воздействия на металлы вследствие анимальной диффузии, а также высокая скорость горения накладывают значительные ограничения на использование традиционных, хорошо отлаженных горелочных устройств.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 32 наименования. Полный объем диссертации составляет 105 страниц с 63 рисунками и 3 таблицами.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, излагаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов и описан личный вклад соискателя, а также кратко изложено содержание рукописи диссертации и приведены сведения об апробации работы.

В **первой главе** выполнен анализ современного состояния исследований, посвященных диффузионному горению свободных прямооточных струй, истекающих из сопел различного масштаба. Подчеркнуты особенности горения для микро- и макромасштабных горелочных устройств. Ввиду того, что достоверных результатов численного моделирования процессов смесеобразования и горения в литературе представлено сравнительно немного, в данной главе рассмотрены результаты преимущественно экспериментальных исследований.

Во **второй главе** описаны результаты исследования диффузионного горения одиночной струи водорода, истекающей в затопленное воздушное пространство из сопел, представляющих собой тонкостенные металлические трубки с внутренним диаметром 200 и 500 мкм. Представлено описание экспериментального стенда и оборудования, использованного для теневой визуализации струи и факела. В данной главе классифицированы режимы горения и проведено сопоставление полученных результатов с данными других работ.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования горения струи водорода в присутствии спутной струи воздуха, поступающего из соосного кольцевого канала. Диаметр центрального сопла составлял 200, 500 и 800 мкм. Представлены результаты визуализации картин течения и режимов горения. Обсуждены особенности условий зажигания факелов. Также визуализирован процесс взаимодействия струи и факела с поперечной струей водяного пара, когда соосная струя выступает в роли экранирующей завесы.

В **четвертой главе** рассмотрен противоположный случай, когда центральная струя воздуха окружена кольцевой струей водорода. Рассмотрены характерные режимы горения для различных значений скорости истечения газов. Помимо теневой визуализации также был использован тепловизор с целью визуализации областей как с неоднородной плотностью, так и с повышенной температурой. Обнаружен новый эффект запираания пламени сверхзвуковой струей в окрестности среза сопла. По-видимому, данный эффект связан с образованием локальной зоны рециркуляции.

Пятая глава посвящена исследованию взаимодействия двух струй водорода и образованных ими факелов при диффузионном горении газа. Рассмотрены случаи различной ориентации (наклона) и расстояний между соплами с выходными диаметрами 200 и 400 мкм. Также рассмотрен случай, когда оси струй были не в одной плоскости. Помимо теневой визуализации также был использован тепловизор.

В **заключении** сформулированы основные выводы по работе.

Научная значимость и новизна

Основная новизна полученных результатов заключается в исследовании смешения и горения комбинированных струй, образованных центральным и кольцевым каналами микронного масштаба, по которым подаются водород и воздух. Систематизированы режимы горения и показаны отличия от одиночной струи топлива, истекающей в затопленное пространство. Важно подчеркнуть, что проведены прецизионные эксперименты, крайне востребованные для валидации активно развиваемых в настоящее время математических моделей горения частично перемешанных смесей.

Впервые обнаружен эффект «запирания» пламени в узкой области конусовидной формы вблизи среза сопла при взаимодействии водорода, истекающего из кольцевого сопла, с центральной сверхзвуковой струей воздуха. Экспериментально показаны особенности взаимного влияния двух струйных диффузионных факелов, организованных соплами микронного размера, ориентированных под углом друг к другу.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается использованием сертифицированного измерительного оборудования и тарированных научных приборов, современных аппаратных и программных средств обработки данных, согласованием полученных результатов с известными литературными данными.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для создания комбинированных малоразмерных горелочных устройств для эффективного сжигания водорода в воздушной атмосфере.

Соответствие диссертации и автореферата требованиям, установленным положением о порядке присуждения учёных степеней

Диссертация и автореферат изложены технически грамотным языком и удовлетворяют требованиям ВАК. Тема диссертации соответствует указанной научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы (п. 9. Физико-химическая гидромеханика), а полученные результаты полностью согласуются с поставленным целью и задачами работы. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы

В автореферате и тексте диссертационной работы соискатель приводит информацию о своем личном вкладе в разработку рассматриваемой им научной проблемы. Все основные результаты работы получены при непосредственном участии автора. При выполнении работ по теме диссертации, опубликованных совместно с научным руководителем и другими соавторами, диссертант внес определяющий вклад в проведение экспериментов и обработку данных, анализ полученных результатов и написание научных статей. Выводы по работе сформулированы совместно с научным руководителем работы.

Публикации и апробация

Все основные результаты диссертационной работы в достаточной мере отражены в публикациях автора, которые включают 9 журнальных статей, 6 из которых входят в рецензируемые научные издания из перечня ВАК. Результаты диссертации были доложены и обсуждены на ряде научных конференциях и семинарах, в том числе - на Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2019, 2021, 2022 и 2023 гг.), XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023 г.), X Международном семинаре по структуре пламени (Новосибирск, в 2023 г.).

Общая характеристика работы

Содержание диссертации А. С. Тамбовцева отражает и систематизирует большой объем проделанных диссертантом исследований, изложенных в его публикациях по разрабатываемой теме. Исследования включают в себя изучение режимов горения как одиночного факела водородной струи, истекающей из сопла милли/микрометрового масштаба, так и взаимодействие двух направленных друг на друга струй. В работе также детально исследованы условия зажигания и горения комбинированных соосных струй, для которых были получены наиболее интересные экспериментальные результаты, обладающей высокой степенью новизны. Следует отметить прецизионное изготовление сопел в работе, что обуславливает значимость выполненного экспериментального исследования.

К диссертации имеются замечания:

1. В обсуждении результатов соискатель, как правило, ограничивается только приведением скорости истечения струй, не указывая размер сопла. При этом хорошо известно, что именно градиент скорости, а не его значение определяет устойчивость струйных пламен (критерий для срыва или проскока). Более того, даже название работы подчеркивает важность характерного размера горелочного устройства в проведенном исследовании;

2. Складывается впечатление, что часть работы была написана в спешке. В тексте диссертации присутствует множество опечаток, в том числе и в разделах с выводами о работе, которым, как правило, уделяется пристальное внимание во время подготовки диссертации. Например, «...удается реализовать сценария с факелом отошед.» на стр. 70 или «...и показано, Показано, что...» на стр. 101;

3. Следует отметить, что ряд иллюстраций не имеет масштабных шкал (например, рис. 40, 41, 60, 61);

4. В диссертации не приведен перечень публикаций соискателя, хотя таковой представлен в автореферате.

Сделанные замечания не критичны и не влияют на общую положительную оценку работы, а также на научную и практическую значимость полученных результатов.

Заключение

На основании содержания рукописи и автореферата диссертации сделано заключение, что диссертационная работа А.С. Тамбовцева «**Исследование**

сценариев диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе отвечает требованиям и критериям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции).

Таким образом, диссертация Тамбовцева Александра Сергеевича является завершенной научной-квалификационной работой, обладающей научной новизной и практической значимостью, в которой содержится решение актуальной задачи для создания малоразмерных высокоэффективных и экологичных комбинированных горелочных устройств, работающих на водороде. Её автор А.С. Тамбовцев, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - механика жидкости, газа и плазмы.

Обсуждение диссертации А.С. Тамбовцева было проведено 02 декабря 2022 дистанционно на семинаре ИТ СО РАН в рамках крупного научного проекта «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий».

Я Дулин Владимир Михайлович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Заведующий лабораторией
Физических основ энергетических
технологий ИТ СО РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН
телефон: +7 383 335 66 84
e-mail: vmd@itp.nsc.ru

Дулин Владимир Михайлович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
телефон: +7 (383) 330-90-40
факс: +7 (383) 330-84-80
e-mail: director@itp.nsc.ru

Сведения о ведущей организации по диссертации

Тамбовцева Александра Сергеевича

"Исследование сценариев диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии" по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	ИТ СО РАН
Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	Лаборатория физических основ энергетических технологий
Почтовый адрес организации:	630090, Новосибирск, Проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Веб-сайт	www.itp.nsc.ru
Телефон	8 (383)-330-9040
Адрес электронной почты	director@itp.nsc.ru

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	Lemanov V., Lukashov V., Sharov K.	Hydrogen Vortex Flow Impact on the Catalytic Wall	Energies. - 2022. - Vol. 16, №. 1. - 104. - 17 p.	Статья, 2022
2	Arbuzov V., Arbuzov E., Dubnishchev Y., Zolotukhina O., Lukashov V., Tupikin A.	Hilbert-Optic Diagnostics of Hydrogen-Oxygen Inverse Diffusion Flame	Energies. - 2022. - Vol. 15, №. 24. - 9566. - 17 p.	Статья, 2022
3	Arbuzov V. A., Arbuzov E. V., Dubnishchev Y. N., Lukashov V. V., Zolotukhina O. S.	Optical Diagnostics of Hydrogen-Air Diffusion Jet Flame	Journal of Engineering Thermophysics. - 2022. – Vol. 31, №. 3. - pp. 402-413	Статья, 2022
4	Lemanov V., Lukashov V., Sharov K.	Turbulent Superstructures in Inert Jets and Diffusion Jet Flames	Fluids. - 2021. - Vol. 6, №. 12. - 459. - 18 p.	Статья, 2021

5	Dubnishchev Y. N., Arbuzov V. A., Arbuzov E. V., Zolotukhina O. S., Lukashov V. V.	Polychromatic Diagnostics of the Flame with Hilbert Verification of the Visualized Phase Structure	Scientific Visualization. - 2021. - Vol. 13., №. 4. - pp. 1-8	Статья, 2021
6	Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Cherdantsev A.V., Markovich D.M.	Development and interaction of disturbance waves in downward annular gas- liquid flow	International Journal of Multiphase Flow. - 2021. - Vol. 138. - 103614. - 17 p.	Статья, 2021
7	Cherdantsev A. V., Isaenkov S. V., Markovich D. M.	The effect of high- frequency oscillations on the disturbance waves in annular flow	International Journal of Multiphase Flow. - 2021. - Vol. 143. - 103754. - 17 p.	Статья, 2021
8	Lobasov A.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Markovich D.M.	Coherent Structures and Turbulent Transport in the Initial Region of Jets and Flame in Swirling Flow	Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2020 - Vol. 61 (3). - pp. 350-358	Статья 2020
9	Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V., Dulin V.M., Markovich D.M.	On the Structure of an Impact Jet with Flow Swirling and Combustion	Combustion, Explosion, and Shock Waves. - 2020 - Vol. 56 (2). - pp. 131-136	Статья 2020
10	Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Лукашов В.В., Шаров К.А., Леманов В. В	Исследование струйного горения водорода с помощью гильберт-диагностики	Автометрия. - 2019. - Т.54, № 1. - С.21-25	Статья 2019

и.о. директора ФГБУН
Института теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН
к.ф.-м.н.

Сиковский Д. Ф.