

Утверждаю



директора ИТ СО РАН
К.Ф.М.н. А.В. Бильский

11 июня 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Экспериментальное исследование структуры импактной струи с закруткой и горением» выполнена Толстогузовым Р.В. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (ИТ СО РАН).

В 2018 году Толстогузов Роман Владимирович окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ) по направлению 03.04.02 «Физика», номер диплома магистра 105424 4015879. В 2022 году Толстогузов Р.В. окончил очную аспирантуру НГУ по специальности 03.06.01 «Физика и астрономия», номер диплома 105424 5997380. Кандидатские экзамены сданы во время обучения в аспирантуре. С 2015 года Толстогузов Р.В. работает в ИТ СО РАН (в настоящее время в должности инженера в лаборатории суперкомпьютерных вычислений и искусственного интеллекта в энергетических технологиях, 7.2).

Научный руководитель – профессор РАН, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физических основ энергетических технологий (7.4), Дулин Владимир Михайлович.

По итогам обсуждения принято следующее **закключение**:

Актуальность работы

В большом количестве промышленных и технических приложений сжигание горючего газа происходит вблизи стенок. В частности, это имеет место при нагреве поверхностей, резке металлов, горении в камерах сгорания, в различных горелочных устройствах, а также в химической промышленности и других областях. Горение вблизи стенок может приводить к нежелательным эффектам: к изменению пределов стабильного горения, к возникновению автоколебаний, изменению условий протекания химических реакций. К тому же с каждым годом становятся все строже экологические требования к вредным выбросам промышленных установок, двигателям внутреннего сгорания. Для повышения эффективности сжигания топлива, уменьшения размеров камер сгорания и для учета нежелательных эффектов, которые могут возникнуть при горении вблизи стенок, необходимо развивать достоверные математические модели процессов тепломассообмена при факельном горении вблизи холодных преград. Проведение натурных экспериментов в реальных условиях является слишком дорогим и технически сложно реализуемым. Поэтому при разработке новых горелочных устройств и камер сгорания все больше используются численные методы моделирования, верифицированные при помощи экспериментальных данных, полученных на модельных горелочных устройствах.

Для достижения технических характеристик, удовлетворяющих растущим требованиям к горелочным устройствам, необходимо решение ряда задач по интенсификации тепломассообмена, достижению равномерного нагрева поверхности, уменьшению количества несгоревшего топлива, лучшего перемешивания топлива и окислителя, повышению диапазона воспламенения и устойчивого горения в значениях числа Рейнольдса (Re) и коэффициента избытка топлива (Φ) и так далее. Для этого используют известные способы управления потоком в зависимости от назначения и конструкции горелочных устройств. Например, организация закрутки потока может турбулизировать поток, существенно интенсифицировать процессы теплообмена и позволяет достичь радиальной однородности нагрева вблизи импактной поверхности по сравнению с незакрученными струями. Во многих промышленных применениях использование закрутки потока успешно используется для повышения устойчивости горения пламени, лучшего перемешивания топлива и окислителя, тепловых характеристик и уменьшения образования вредных выбросов. Однако закрутка потока способствует образованию зон рециркуляции в струе. Помимо закрутки, установка холодной преграды

вблизи пламени влияет на процессы горения. Это взаимодействие носит нетривиальный характер, и оно оказывает влияние на особенности химического реагирования и гидродинамику.

Развитие методов численного моделирования и оптических измерений позволяет детально исследовать структуру потока импактного пламени и тепломассообмен между потоком и поверхностью, понять особенности горения в непосредственной близости от стенки, не возмущая поток, однако таких работ в настоящее время недостаточно. С развитием оптических методов измерений, таких как метод анемометрии по изображениям частиц (англ.: Particle Image Velocimetry, PIV) и метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (англ.: Planar laser-induced fluorescence, PLIF), стали возможны исследования, позволяющие проводить одновременные измерения концентрации веществ, пространственные распределения скорости и температуры в потоке. Благодаря использованию панорамных оптических методов исследований потока стал возможен анализ особенностей химического реагирования и локального тепломассопереноса в сложных трехмерных турбулентных потоках.

Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование влияния плоской холодной преграды на структуру потока импактной струи с закруткой и горением, на распределение температуры и расположение зоны химического реагирования с использованием оптических методов на основе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) и анемометрии по изображениям частиц.

В рамках поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- Развитие метода ПЛИФ радикала ОН (метод термической активации) для регистрации поля температуры – численное моделирование спектров с учетом столкновений молекул.
- Апробация метода ПЛИФ радикала ОН на примере ламинарного пламени в форме конуса (конус бунзеновской горелки).
- Исследование режимов горения и особенностей структуры потока для пламени прямоточной струи, натекающей на преграду.
- Исследование влияния преграды на структуру потока и особенности горения турбулентного пламени, стабилизированного закруткой потока.

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

- Впервые проведена детальная апробация метода ПЛИФ ОН для измерения поля температуры на основе термической активации.
- Впервые установлено, что размещение холодной преграды напротив бунзеновского пламени приводит к формированию застойной зоны, снижающей локальный теплообмен в окрестности лобовой точки.
- Впервые установлено, что для пламен, стабилизированных закруткой, при размещении холодной преграды на расстоянии в несколько калибров может возникать дополнительная мода гидродинамической неустойчивости, сопряженная с локальными пульсациями тепловыделения и снижением эффективности сжигания.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученная в ходе проведения данного исследования база экспериментальных данных значительно расширяет существующие знания о структуре импактных струй с горением. Эти данные могут служить основой для разработки эффективных методов управления теплообменом и горением в различных энергетических установках. Представленные детальные данные о распределениях скорости, температуры и отдельных компонентов продуктов горения обладают большим потенциалом для верификации и апробации численных моделей и различных аналитических подходов, предназначенных для анализа таких типов течений. Реализованные современные оптические методы измерения полей температур, скоростей и распределений радикалов, тщательно верифицированные в работе, могут быть распространены на широкий класс задач теплофизики реагирующих течений.

Степень достоверности результатов:

Для обеспечения достоверности полученных результатов использовались современные методы, проводились дополнительные поверочные измерения, а также проводился анализ погрешностей и проверка воспроизводимости экспериментальных данных. Методики, используемые в исследовании, были протестированы на других объектах в рамках научной работы, не связанной с темой диссертации, и результаты были сопоставлены с известными работами других научных групп, а также проверены с помощью численного моделирования. Достоверность полученных данных также подтверждается публикацией результатов исследований в строго рецензируемых научных журналах.

На защиту выносятся:

- Результаты апробации метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) на основе термической активации молекул гидроксильного радикала (ОН) для измерения температуры в продуктах горения газовых пламен.
- Результаты исследования структуры потока для бунзеновского пламени с преградой с использованием панорамных оптических методов измерения поля скорости и температуры. Эффект образования застойной зоны между фронтом пламени и холодной преградой.
- Результаты исследования пространственной структуры поля мгновенной скорости и формы фронта пламени при горении предварительно перемешанной смеси в импактной струе с закруткой потока. Данные о влиянии плоской холодной преграды на режимы горения, когерентные пульсации скорости и на форму зоны химического реагирования на основе применения метода ПЛИФ ОН и НСНО с использованием метода главных компонент.

Личный вклад соискателя

Соискатель лично получил научные результаты, которые включены в диссертацию и представлены для защиты. Вклад автора заключался в создании и сборке экспериментальных установок и рабочих участков, проведении всех экспериментов, описанных в работе, разработке и проверке комплекса численных алгоритмов для анализа полученных экспериментальных данных, проведении численного моделирования, а также в обработке и анализе результатов. Автор принимал участие в подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и принимал участие в научных конференциях. Постановка задачи и основные методы исследования были сформулированы руководителем диссертационной работы, д.ф.-м.н. В.М. Дулиным.

Список из 18 работ автора по тематике диссертации, включая один патент на изобретение, 14 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Dulin V.M., Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the $A_2\Sigma^+ - X_2\Pi$ (1-0) band // Proceedings of the Combustion Institute. – 2021. – V. 38, №1. – P. 1877–1883.

2. 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. – V. 56. – P. 131–136.

Перевод: Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М. Маркович Д.М. О структуре импактной струи с закруткой потока и горением // Физика горения и взрыва. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 10–16.

3. Kravtsov Z.D., Tolstoguzov R.V., Chikishev L.M., Dulin V.M. On formation of a stagnation zone in the flow between conical flame and flat obstacle // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – V. 25, № 2. – P. 317–320.

Перевод: Кравцов З.Д., Толстогузов Р.В., Чикишев Л.М., Дулин В.М. О формировании застойной зоны в потоке между пламенем в форме конуса и плоской преградой // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 329–332.

4. Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М., Маркович Д.М. О режимах горения в закрученной струе, направленной на плоскую преграду // Горение и взрыв. – 2019. – Т. 12, №2. – С. 60–67.

5. Лобасов А.С., Толстогузов Р.В., Шараборин Д.К., Чикишев Л.М., Дулин В.М. Об эффективности использования различных линий возбуждения перехода (1–0) флуоресценции ОН для панорамной термометрии // Теплофизика и аэромеханика. – 2021. – Т. 28, № 5. – С. 793–797.

Перевод: Lobasov A.S., Tolstoguzov R.V., Sharaborin D.K., Chikishev L.M., Dulin V.M. On the efficiency of using different excitation lines of (1–0) two-line OH fluorescence for planar thermometry // Thermophysics and Aeromechanics. – 2021. – V. 28. – P. 751–755.

6. Sharaborin D.K., Lobasov A.S., Tolstoguzov R.V., Dulin V.M. Temperature measurement in a bunsen gas–droplet flame of ethanol using OH PLIF // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2022. – V. 58, №5. – P. 507–515.

Перевод: Шараборин Д.К., Лобасов А.С., Толстогузов Р.В., Дулин В.М. Измерение поля температуры в Бунзеновском газокapельном пламени спирта на основе флуоресценции ОН // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 3–11.

7. Патент на изобретение № 2758869 Российская Федерация, МПК G01K 13/02, МПК G01N 21/64. Способ измерения поля температуры в реагирующих газовых потоках на основе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции гидроксильного радикала: заявл.

30.09.2020, опублик. 02.11.2020 / Маркович Д. М., Дулин В. М., Шараборин Д. К., Толстогузов Р. В., Лобасов А. С., Чикишев Л. М.

8. Kravtsov Z.D., Tolstoguzov R.V., Chikishev L.M., Dulin V.M. PIV and OH PLIF study of impinging propane-air jet-flames // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 754. – № 072001.

9. Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V. Structure of a reacting flow of a turbulent swirling jet during combustion of a syngas–air mixture // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1382. – № 012066.

10. Tolstoguzov R.V., Sharaborin D.K. On combustion regimes of syngas-air and methane-air lean flames for swirl-stabilized burners // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1382. – № 012067.

11. Tolstoguzov R.V., Sharaborin D.K. Coherent Structures in an Impinging Jet With Swirl and Combustion // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2211. – № 040004.

12. Дулин В. М., Шараборин Д. К., Толстогузов Р. В., Лобасов А. С., Чикишев Л. М., Маркович Д. М. Применение плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции для термометрии в камере сгорания с закруткой потока // Горение и взрыв. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 8–18.

13. Tolstoguzov R.V. Temperature measurements in a Bunsen flame by planar laser induced fluorescence // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1677(1). – № 012045.

14. Tolstoguzov R. V. Temperature measurements in a swirling impinging flame by planar laser-induced fluorescence // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2119. – № 012042.

15. Tolstoguzov R. V., Chikishev L. M. Temperature field measurements between a Bunsen flame and flat a cold plate by using PLIF // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – V. 2233. – № 012014.

16. Толстогузов Р.В. Измерение поля температуры в ламинарном пламени на основе ЛИФ гидроксильного радикала // Сборник трудов всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар». – 2022. – С. 308–311.

17. Савицкий А.Г., Толстогузов Р.В. Измерение поля температуры турбулентного закрученного пламени в вихревой камере сгорания методом лазерно-индуцированной

флуоресценции // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». – 2023. – С. 112–116.

18. Толстогузов Р.В., Савицкий А.Г., Измерение поля температуры в пламенах различной конфигурации с помощью метода ЛИФ // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». – 2023. – С. 151–155.

Апробация работы:

Результаты исследований неоднократно обсуждались на конференциях: «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» – 2023. «Сибирский Теплофизический Семинар» – 2022, 2021, 2019. «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» – 2021. «Теплофизика и физическая гидродинамика» – 2021. «13-ая Научная конференция отдела горения и взрыва» – 2020. «12-я Научная конференция по горению и взрыву» – 2019. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» – 2019.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Диссертация Толстогузова Р.В., посвященная экспериментальному исследованию влияния плоской холодной преграды на структуру потока импактной струи с закруткой и горением, на распределение температуры и особенности химического реагирования, соответствует паспорту специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» для физико-математических наук, а именно – натурному моделированию теплофизических процессов в технических приложениях.

Решение о рекомендации к защите

Диссертация «Экспериментальное исследование структуры импактной струи с закруткой и горением» Толстогузова Романа Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заключение принято на заседании секции 5 «Теплофизические основы энергетики (включая горение)» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством руководителя секции академика РАН С.В. Алексеенко.

Присутствовало на заседании 14 человек из 22 членов списочного состава секции №5, в том числе 1 академик РАН, 1 член-корреспондент РАН, 11 докторов наук, 3 кандидата наук. Результаты голосования: «за» - 14 человек, «против» - 0 человек, «воздержалось» - 0 человек. Протокол № 04-2023 от 12 июля 2023 года.



Председатель семинара
Алексеев Сергей Владимирович
академик РАН,
научный руководитель ИТ СО РАН



Секретарь семинара
Лукашов Владимир Владимирович, к.т.н.,
в.н.с. лаборатории физических основ
энергетических технологий