



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научно-организационной
деятельности, д.т.н., доц.

Ю. С. Клочков

« 22 »

сентября

2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
на диссертацию **Толстогузова Романа Владимировича** «Экспериментальное
исследование структуры импактной струи с закруткой и горением»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Бурное развитие цифровых технологий значительно расширило возможности исследователей, однако в теплофизическом эксперименте ощущается недостаток первичных преобразователей физических параметров.

Одним из наиболее сложных для изучения объектов является горение и структура струйных пламён, поскольку в этом случае единой методики и техники эксперимента к настоящему времени не создано.

В работе **исследован** струйный факел, организованный с помощью профилированного осесимметричного сужающегося сопла, который направлен на перпендикулярно расположенную охлаждаемую пластину. Для безуносного горения «бедных» метано- и пропановоздушных смесей со значительным избытком воздуха при больших числах Рейнольдса реализована закрутка потока. Используются панорамные оптические методы: анемометрия по изображениям частиц и плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция (ПЛИФ).

Для более эффективного сжигания топлива, уменьшения размеров камер сгорания и для учёта нежелательных эффектов, которые могут возникнуть

005343

вблизи стенок (автоколебаний, изменений пределов стабильного горения и др.) широко используют численное моделирование. Его результаты необходимо верифицировать. Ввиду сложности натурных экспериментов приобретают особую ценность исследования, проводимые на модельных горелочных устройствах с использованием современной оптической диагностики. Они расширяют возможности и повышают достоверность математических моделей, используемых для описания тепломассообмена при факельном горении вблизи холодных преград. С этих позиций тема диссертационной работы Р. В. Толстогузова вполне актуальна.

Диссертация характеризуется полнотой и завершенностью. **Текст диссертации** состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций по теме исследования и указателя литературы. Материал изложен на 129 страницах, включает 50 рисунков и библиографию из 140 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, её научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен обзор работ, посвящённых исследованию импактных струй, в том числе – с горением и закруткой потока. Особо выделены работы, связанные с горением предварительно перемешанных газовых пламен при различных значениях числа Рейнольдса, коэффициента избытка топлива и при сравнительно небольших значениях параметра $H/d = 0.5 \div 5$, поскольку в этих случаях на пламя – в том числе, с закруткой потока – влияет холодная стенка. Показано, что большинство исследований направлено на визуализацию горения и сопоставление формы пламени с распределением коэффициента теплоотдачи. Однако количественные данные о структуре потока импактных струй с горением и особенностях химического реагирования в пристенной области в литературе практически отсутствуют.

Во второй главе описаны используемые в работе оптические бесконтактные методы: анемометрия по изображению частиц (PIV) и плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция (ПЛИФ). Описаны физические принципы, используемые при изучении полей температуры в пламени на основе возбуждения молекул ОН: «Two-line» ПЛИФ и «Thermally-assisted» ПЛИФ. Подробно описан экспериментальный стенд, алгоритмы обработки изображений, оценены погрешности полученных данных. Представлены результаты численного моделирования спектра флуоресценции ЛИФ ОН с учетом обмена энергией при столкновениях, полученные с использованием программного пакета LASKIN. Выявлена зависимость интенсивности флуоресценции от выбранных линий возбуждения, температуры и спектральных диапазонов регистрации. Сопоставлены результаты исследования поля температуры в коническом пла-

мени предварительно-перемешанной метано-воздушной смеси методами «Two-line» и «Thermally-assisted» ПЛИФ. Представлены данные о поле температуры в газокапельном пламени паров и капель спирта, полученные методом «Two-line» ПЛИФ.

В третьей главе описана измерительная система, используемая при анемометрии по изображениям частиц. Приведены результаты визуализации при различных режимах горения импактного пламени, установлены пределы срыва пламени. Показаны результаты PIV анемометрии для импактного пламени предварительно перемешанной пропано-воздушной смеси, а также результаты, полученные в ламинарном предварительно перемешанном метано-воздушном импактном пламени с помощью методов «Two-line» ПЛИФ и «Thermally-assisted» ПЛИФ. Собственные данные автор сопоставил с трудами других научных групп.

В четвёртой главе описана измерительная установка, использованная для одновременной регистрации полей скорости и распределения сигнала флуоресценции НСНО и ОН. Визуализировано горение импактного турбулентного закрученного пламени при различных числах Рейнольдса, коэффициентах избытка топлива и расстояниях от кромки сопла до поверхности. Представлены результаты измерений – включая поля средней и мгновенной скорости, мгновенные и средние распределения сигнала флуоресценции ОН и НСНО – для импактного закрученного пламени предварительно перемешанной пропано-воздушной смеси. Показано приложение метода главных компонент (POD) к пространственным распределениям мод POD и соответствующим осредненным по фазе пульсациям интенсивности НСНО и ОН. В результате получены распределения первых четырех мод POD и соответствующие им интенсивности НСНО и ОН ПЛИФ.

В результате исследований получены **новые экспериментальные данные** и обнаружены **новые физические эффекты**.

Апробирован и реализован метод термической активации молекул ОН ПЛИФ. В ходе численного моделирования ЛИФ ОН получена детальная база данных. Установлено, в частности, что для термически активированного ПЛИФ возбуждение полосы (1–0) системы $A2\Sigma^+-X2\Pi$ на длине волны перехода Q1(8) позволяет добиться максимальной чувствительности к температуре. Также установлено, что влияние тушения флуоресценции кислородом незначительно. Сопоставлены возможности методов «Two-line» ПЛИФ и «Thermally-assisted» ПЛИФ. Показано, что в стационарных режимах оба метода дают близкие результаты ($СКО \approx 70\text{ K}$). Впервые установлено, что применение термически активированного («Thermally-assisted») ПЛИФ позволяет оценить поле темпера-

туры за одну вспышку лазера. При исследовании в нестационарных режимах применение метода «Two-line» ПЛИФ оказывается более сложным.

В ходе исследования полей скорости и температуры в импактном незакрученном пламени впервые установлено, что наличие холодной поверхности приводит (в пределах 3 – 4 калибров) к образованию вблизи лобовой точки слабоинтенсивной центральной зоны рециркуляции, в случае струй без горения отсутствующей. Это вызвано областью повышенного давления в окрестности лобовой точки, где концентрируются и циркулируют охлажденные поверхностью преграды продукты горения. Обнаруженный эффект позволяет объяснить снижение локального теплообмена в окрестности лобовой точки, наблюдаемое в ряде работ других авторов.

При исследовании поля скорости в импактном пламени впервые количественно показано изменение структуры потока импактной поверхностью. Холодная поверхность над пламенем формирует центральную зону рециркуляции между соплом и поверхностью в форме вытянутого перевернутого конуса как в сильно-, так и в слабо-закрученном пламени. Установлено, что наличие преграды может значительно влиять на химические реакции при турбулентном горении предварительно перемешанных смесей с закруткой потока. С помощью PIV анемометрии по изображениям частиц, методов ПЛИФ ОН и НСНО показано наличие крупных мод гидродинамической неустойчивости, появляющихся под влиянием холодной поверхности.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется следующим. Полученная база экспериментальных данных значительно расширяет существующие знания о структуре импактных струй с горением. Эти данные могут стать основой для разработки эффективных методов управления теплообменом и горением в энергетических установках. Представленные обширные и детальные данные о распределениях скорости, температуры и отдельных компонентов продуктов горения полезны для верификации и апробации численных моделей и аналитических подходов в рассматриваемой области. Современные оптические методы исследования полей температуры, скорости и распределения радикалов, верифицированные в работе, могут быть распространены на широкий класс задач теплофизики реагирующих течений.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных апробированных методик исследования, анализа и обработки данных, широко применяемых передовыми научными группами по данному направлению во всем мире. Используются современные бесконтактные оптические методы, не вносящие возмущений в изучаемые системы. Полученные результаты коррелируют с данными других авторов.

Результаты диссертации могут быть использованы в СПбПУ, ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, МЭИ, МГТУ, НГТУ, ИТМО БАН, МГУ и других организациях соответствующего профиля.

Работа написана внятно и хорошо иллюстрирована. Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание диссертации. Её основные результаты представлены в 18 работах, включая патент на изобретение, 14 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК. Материалы исследований докладывались на многочисленных семинарах и конференциях.

Отметим следующие недостатки диссертационной работы.

1. Автор не задаётся вопросом, «насколько холодной» должна быть воспринимаящая факел поверхность. В энергетических установках температура такой поверхности меняется в широких пределах и, предположительно, влияет на формирование особых зон течения и теплообмена.

2. В разделе 2.2, в целом весьма интересном, не затронута методика, по которой требуют оценивать неопределённость величин действующие отечественный и межгосударственный стандарты ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009.

3. При оценке достоверности полученных результатов необходимо исходить не только из того, насколько современны и популярны использованные методы и оборудование. Необходимы и количественные данные, о получении которых упомянуто в замечании 2.

4. Названия глав и разделов излишне многословны. Раздел «Заключение» много выиграл бы, будь он структурирован по пунктам.

Несмотря на указанные замечания, считаем, что работа Р. В. Толстогузова является законченной научно-квалификационной работой в области экспериментального исследования структуры импактной струи с закруткой и горением, соответствует паспорту специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника и профилю ведущей организации. Она логично построена, её структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования.

Диссертационная работа «Экспериментальное исследование структуры импактной струи с закруткой и горением» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Толстогузов Роман Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого 14 сентября 2023 г., протокол № 6 от 14.09.2023 г. Работа получила высокую оценку, а критические замечания отражены в настоящем отзыве.

Мы, Сапожников Сергей Захарович и Митяков Владимир Юрьевич, даём согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Толстогузова Романа Владимировича, и их дальнейшую обработку.

Профессор Высшей школы атомной
и тепловой энергетики
Института энергетики СПбПУ,
директор научно-образовательного центра
«Теплофизика в энергетике»,
д. т. н., проф.

Сергей Захарович Сапожников

тел. +7-812-552-77-73
e-mail: serg.sapozhnikov@mail.ru

Профессор Высшей школы атомной
тепловой энергетики
Института энергетики СПбПУ,
д. т. н., проф.

Владимир Юрьевич Митяков

тел. +7-812-552-77-73
e-mail: mitvlad@mail.ru

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ,
тел.: +7 (812) 775-05-30, e-mail: office@sphsptu.ru

