

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ LIF ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ЗА ФРОНТОМ ПЛАМЕНИ ДЕЖУРНОГО ФАКЕЛА МОДЕЛЬНОГО
ФРОНТОВОГО УСТРОЙСТВА ГАЗОТУРБИННОГО ТИПА¹

© 2023 г. А. Г. Савицкий^{a, b, *}, Д. К. Шараборин^{a, b}, В. М. Дулин^{a, b}, Д. М. Маркович^{a, b}

^a Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН,
просп. Академика Лаврентьева, д. 1, Новосибирск, 630090 Россия

^b Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, д. 2, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: a.savitskii@g.nsu.ru

Поступила в редакцию 12.07.2022 г.

После доработки 29.10.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

В последние годы особенно актуальной стала задача снижения уровня выбросов вредных веществ при работе газотурбинных установок (ГТУ). При этом детальное исследование скорости потока и процесса горения в камерах сгорания ГТУ необходимо для оптимизации происходящих в них термодинамических процессов. Такая оптимизация позволяет не только обеспечить высокую полноту сжигания топлива и устойчивую работу горелок в широком диапазоне соотношений топливо/окислитель, но и снизить выбросы вредных веществ. Статья посвящена изучению структуры поля температуры дежурного факела модельного газотурбинного двухзонного горелочного устройства. Для регистрации мгновенного распределения температуры в факеле был использован метод, основанный на термически активированной планарной лазерно-индуцированной флуоресценции [thermally-assisted Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF)] при возбуждении линии $Q_1(8)$ перехода $(1-0)$ электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ гидроксильного радикала OH. Исследование проведено при горении частично перемешанной смеси метана с воздухом со значительным избытком последнего (с коэффициентом $\alpha = 1.54$) при нормальных условиях в закрученном потоке при числе Рейнольдса $Re = 1.5 \times 10^4$. В работе детально описана процедура калибровки thermally-assisted PLIF-системы с использованием термопары. Кроме того, представлены мгновенные распределения температуры за фронтом пламени в диапазоне 1500–2000 К. Полученные данные указывают на значительную неоднородность поля температуры вследствие стабилизации пламени на периферии центрального факела топлива смешивающимся закрученным потоком воздуха. При этом условное осреднение поля температуры с учетом перемежаемости, вызванной движением фронта пламени, свидетельствует о том, что температура в основании фронта близка к минимальным значениям адиабатической температуры предварительно перемешанной смеси вблизи “бедного” [$\alpha > 1$, т.е. когда окислителя (воздуха) больше, чем необходимо для полного сгорания топлива] предела воспламеняемости.

Ключевые слова: вихревая камера сгорания, турбулентное закрученное пламя, лазерно-индуцированная флуоресценция, панорамная термометрия, метановоздушная смесь, коэффициент перемежаемости

DOI: 10.56304/S0040363623050053

Из-за периодически ужесточающихся экологических требований, предъявляемых к современным газотурбинным установкам, возникает необходимость разрабатывать малоэмиссионные камеры сгорания. Наиболее актуальной становится задача сокращения выбросов оксидов азота. В последнее время внедряется технология

сжигания “бедной” предварительно перемешанной смеси метана и воздуха со значительным его избытком для снижения эмиссии оксидов азота из-за подавления термического механизма образования NO_x путем снижения температуры в камере сгорания. Топливоздушная смесь должна быть хорошо перемешана как для контроля выбросов вредных веществ, так и для эффективной работы горелочного устройства. Для обеспечения стабильных режимов горения в широком диапазоне соотношений топливо/окислитель исполь-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-79-30075). Оборудование предоставлено в рамках государственного задания в Институте теплофизики Сибирского отделения РАН.

зуются горелки с закруткой потока. Высокая степень закрутки приводит, с одной стороны, к образованию центральной зоны рециркуляции, где горячие продукты сгорания подогревают реагенты. С другой стороны, движение сильно закрученных течений является нестационарным ввиду распада и прецессии вихревого ядра, приводящих к высоким пульсациям скорости и давления [1, 2]. Кроме того, известно, что “бедные” пламена более чувствительны к внешним воздействиям, которые могут повлечь термоакустические пульсации в камере сгорания, снижению эффективности горения и срыву пламени [3, 4]. Поэтому на практике по центру фронтального устройства организуют дежурный диффузионный факел, а основное количество топлива подают в камеру сгорания в виде предварительно перемешанной смеси.

При этом важно оптимизировать термогазодинамические характеристики потока в камере сгорания в целях обеспечения высокой полноты сжигания топлива, низкого уровня выбросов вредных веществ и устойчивой работы камеры сгорания в широком диапазоне расходов топлива и воздуха. Для этого необходимы детальные исследования особенностей движения потока и процессов смешения и горения. Однако проведение экспериментов в реальных камерах сгорания довольно затруднительно и неоправданно дорого, поэтому при разработке ГТУ используют методы численного моделирования. В свою очередь, результаты численного моделирования процессов, протекающих в горелочных устройствах (особенно процесса горения), нуждаются в проверке на упрощенных моделях камер сгорания, воспроизводящих основные физико-химические процессы.

Наиболее распространенный подход к проведению численных расчетов турбулентных закрученных течений и пламени – метод крупных вихрей [Large Eddy Simulation (LES)]. Для валидации результатов численного моделирования структуры течений широко применяются данные, полученные методом анемометрии по изображению частиц [Particle Image Velocimetry (PIV)]. В частности, в работах [5–7] авторы проводят сравнение распределений скорости течения (потока), измеренных методом PIV и рассчитанных методом LES, и отмечают хорошее совпадение полученных данных.

Одним из ключевых параметров потока, подлежащих измерению при рассмотрении процессов, протекающих при горении в камерах сгорания газотурбинных установок, является температура газов. Основные требования к технике измерения температуры – высокое пространственное и временное разрешение и большая точность. Кроме того, метод должен быть бескон-

тактным и оказывать минимальное влияние на исследуемое пламя. Распространенные методы измерения температуры в турбулентном пламени – спонтанное комбинационное рассеяние (спонтанное комбинированное, или рамановское, рассеяние), когерентное антистоксово комбинационное рассеяние [Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS)], а также лазерно-индуцированная флуоресценция (LIF) [8]. В работах [9–11] приведены результаты LES-моделирования распределения температуры в камерах сгорания газотурбинного типа и их сравнение с данными, полученными опытным путем.

Однако стоит отметить, что в настоящее время в литературе представлено довольно мало экспериментальных работ, содержащих информацию о двумерном распределении температуры в турбулентных закрученных пламенах. Это связано, в первую очередь, со сложностью проведения подобных экспериментов.

Для измерения двумерных распределений температуры турбулентного пламени может быть использован метод планарной лазерно-индуцированной флуоресценции, представленный в работе [12] (two-line PLIF). Идея метода состоит в возбуждении радикала OH из двух различных уровней энергии с помощью двух импульсных лазеров. Затем отношение сигналов флуоресценции пересчитывается в температуру через распределение Больцмана заселенностей основного состояния. Реализация представленного метода термометрии, базирующегося на LIF-термометрии, осложнена необходимостью корректировать пространственную неоднородность обоих лазерных ножей. Авторами [12] проведено сравнение распределений температуры, полученных методом two-line PLIF, с результатами измерений, выполненными методом спонтанного комбинационного рассеяния. В публикации также отмечено, что периодические колебания температуры наиболее выражены во внутренней зоне рециркуляции.

Альтернативный вариант измерения температуры турбулентного пламени – это метод термометрии, основанный на thermally-assisted PLIF и приведенный в работах [13, 14]. По сравнению с представленным ранее методом PLIF [12], термометрия с использованием такого подхода проще, но менее распространена из-за того, что регистрируемый сигнал зависит от перераспределения молекул по энергетическим состояниям в процессе столкновений, а также требует дополнительной калибровки. Как в методе two-line PLIF, так и в thermally-assisted PLIF регистрируется интенсивность флуоресценции возбужденного состояния, но первый метод связывает флуоресценцию с температурой молекул через рас-

пределение Больцмана заселенностей основного состояния, а второй – распределение возбужденных квантовых состояний с этой температурой. В методе thermally-assisted PLIF используется один лазерный источник для заполнения возбужденного состояния, а столкновительный перенос (при котором молекулы соударяются одна с другой) затем распределяет их среди других возбужденных энергетических состояний. Это распределение происходит между вращательными состояниями внутри колебательного уровня и между другими колебательными уровнями в пределах электронно-возбужденного состояния. После перераспределения спонтанное излучение с двух или более энергетических уровней может быть связано с температурой пламени. Преимущество данного метода перед методом two-line PLIF заключается в том, что для измерения температуры необходим один источник лазерного излучения вместо двух.

Цель данной работы – исследование пространственной структуры поля температуры для модельного двухзонного фронтального устройства камеры сгорания газотурбинного типа, реализующего “бедное” горение предварительно перемешанной смеси, стабилизированное дежурным факелом. Акцент в работе сделан на анализе температуры горения при подаче только дежурного факела с использованием метода OH thermally-assisted PLIF (возбуждение радикала OH). Проведение подобных экспериментов необходимо для формирования базы данных, содержащей информацию о двумерном распределении температуры за фронтом пламени, которая необходима для ва-

лидации результатов численного моделирования горения в камерах сгорания ГТУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты были проведены в модельной вихревой камере сгорания с оптическим доступом. Испытательный отсек состоял из напорной камеры цилиндрической формы, модельного фронтального устройства и открытой камеры сгорания. Фронтальное устройство было предложено в предыдущих исследованиях в качестве модельного объекта для изучения особенности стабилизации “бедных” пламен [15]. В камере сгорания предусматривались кварцевые квадратные смотровые окна (размером 100×100 мм и толщиной 10 мм). Схема модельной вихревой камеры сгорания и оборудования, используемого для PLIF-измерений, представлены на рис. 1. Схема сопла показана на вставке 1. Сопло включало в себя радиальный лопаточный завихритель и коническое центральное тело. Внешний диаметр сопла составлял $d = 37$ мм. Топливо могло подаваться либо в зону основного потока через отверстия между лопатками завихрителя, либо в зону дежурного факела через центральный канал диаметром 5.8 мм. Более детальное описание камеры сгорания со всеми геометрическими размерами можно найти в работах [7, 9].

Частично перемешанное поднятое турбулентное закрученное пламя было организовано путем подачи топлива (метана с объемным расходом $Q_{fuel} = 27.1$ дм³/мин) через центральный канал и

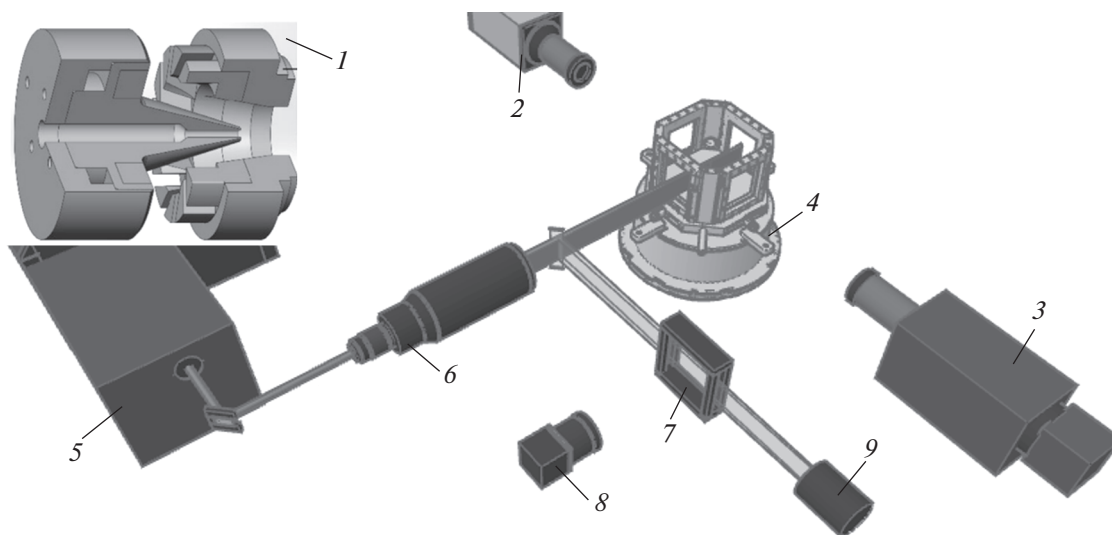


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – схема сопла; 2, 3 – LIF-камера с оптическим фильтром, пропускающим излучение с длиной волны 310 и 265 нм соответственно; 4 – камера сгорания; 5 – LIF-лазер; 6 – коллиматор; 7 – кювета; 8 – камера кюветы; 9 – ловушка для излучения с устройством, куда поступает лазерный луч и в котором он гасится

воздуха через радиальный завихритель (расход воздуха $Q_{air} = 400 \text{ дм}^3/\text{мин}$). Расходы топлива и воздуха контролировались с помощью массовых расходомеров (Bronkhorst High-Tech). Число Рейнольдса и коэффициент избытка воздуха для исследуемого режима составляли $Re = 1.5 \times 10^4$ и $\alpha = 1.54$.

Для проведения температурных измерений методом PLIF была собрана измерительная система для регистрации сигнала флуоресценции радикала ОН. Она состояла из перестраиваемого импульсного лазера на красителе (Sirah Precision Scan, средняя энергия импульса на длине волны приблизительно 283 нм равнялась 20 мДж), накачиваемом импульсным Nd:YAG-лазером (QuantaRay, энергия импульса на длине волны 532 нм составляла 800 мДж), и двух камер, снабженных объективами и оптическими фильтрами. Лазер возбуждал флуоресценцию гидроксильного радикала ОН для перехода $Q_1(8)$ линии (1–0) электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$. Регистрация сигнала флуоресценции переходов (1–1) и (0–0) осуществлялась с помощью ПЗС-камеры² PI-MAX-4 (фотокатод S20, разрешение 1024×1024 пикселей, 16 бит) с объективом и оптическим фильтром (с пропускаемым диапазоном волн $310 \pm 10 \text{ нм}$). Флуоресценция линии (2–0) записывалась КМОП-камерой³ (LaVision, разрешение 2560×2160 пикселей, 16 бит), соединенной с чувствительным в ультрафиолетовом диапазоне электронно-оптическим преобразователем (LaVision IRO, фотокатод S20). Он был оборудован объективом с полосным фильтром, пропускающим сигнал на длине волны $265 \pm 5 \text{ нм}$. Лазерный луч разворачивался в лазерный нож с использованием коллимирующей оптики (LaVision) и освещал центральное сечение исследуемого потока. Толщина лазерного ножа составляла около 0.8 мм. Для последующей коррекции неоднородности распределения энергии в лазерном ноже часть лазерного луча (5%) отражалась в калибровочную кювету с раствором родамина 6G. Линейный режим флуоресценции контролировали путем изменения энергии импульсов лазера.

Калибровка ОН thermally-assisted PLIF-системы проводилась в той же камере сгорания. Для этого было организовано ламинарное предварительно перемешанное пламя. Смесь метана и воздуха ($Re = 750$) подавалась через центральный канал, в то время как воздух через завихритель не поступал. Температура в двух сечениях ламинарного пламени была измерена термопарой типа В

(положительный термоэлектрод: 70% платина, 30% родий; отрицательный термоэлектрод: 94% платина, 6% родий) с размером сая 500 мкм.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обработка зарегистрированных камерами сигналов проводилась с помощью набора математических алгоритмов. Во-первых, из каждого мгновенного изображения был вычтен фоновый сигнал, состоящий преимущественно из тепловых шумов матрицы и различных переотражений. Фоновый сигнал был снят при отсутствии потока, но с включенным лазером.

Во-вторых, была проведена коррекция неоднородности распределения энергии в лазерном ноже. Профиль лазерного ножа является неоднородным, в нем присутствуют полосы разной интенсивности. Более того, пространственное расположение и интенсивность полос может меняться в пространстве и времени, поэтому для каждого мгновенного кадра из плоскости измерений был записан кадр в кювете с раствором родамина 6G, соответствующий данной вспышке лазера. Процедура коррекции мгновенных PLIF-изображений в камере сгорания состояла в получении вертикального профиля распределения энергии в лазерном ноже с использованием соответствующего мгновенного распределения флуоресценции в кювете и последующем его применении к зарегистрированному сигналу в камере сгорания.

Для сведения областей видимости двух камер, предназначенных для регистрации сигнала флуоресценции на разных длинах волн, была задействована двусторонняя калибровочная мишень.

КАЛИБРОВКА PLIF-СИСТЕМЫ

Для применения метода PLIF-термометрии необходима калибровка, смысл которой заключается в нахождении зависимости температуры, измеренной каким-либо другим способом, от отношения зарегистрированных сигналов флуоресценции. В работе [14] было показано, что при возбуждении перехода $Q_1(8)$ линии (1–0) электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ гидроксильного радикала с последующей регистрацией флуоресценции переходов (1–1) и (0–0), а также перехода (2–0) температура линейно зависит от отношения $I_{\Delta v=2}/I_{\Delta v=0}$ [$I_{\Delta v=2}$ – зарегистрированная интенсивность флуоресценции перехода (2–0); $I_{\Delta v=0}$ – суммарная интенсивность флуоресценции переходов (1–1) и (0–0)]. Таким образом, калибровка сводится к поиску наиболее подходящих коэффициентов для уравнения прямой.

² ПЗС – прибор с зарядовой смесью.

³ КМОП – комплементарная структура металл – оксид – полупроводник.

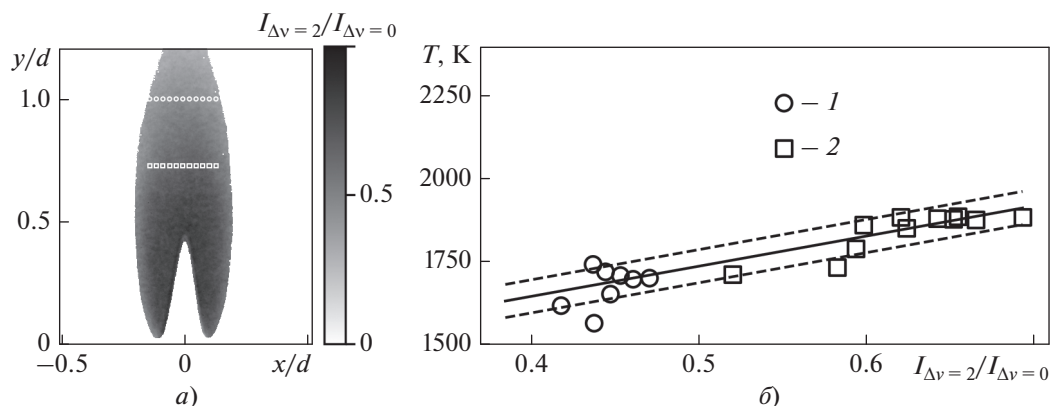


Рис. 2. Отношение сигналов флуоресценции $I_{\Delta v=2}/I_{\Delta v=0}$ (а) и зависимость температуры пламени от отношения этих сигналов (б).

Линия: прямая – калибровочная, $y = Ax + B$, $A = 908.1$, $B = 1280.6$; штриховая – диапазон отклонений ± 50 К.
 y/d : 1 – 1.0; 2 – 0.7

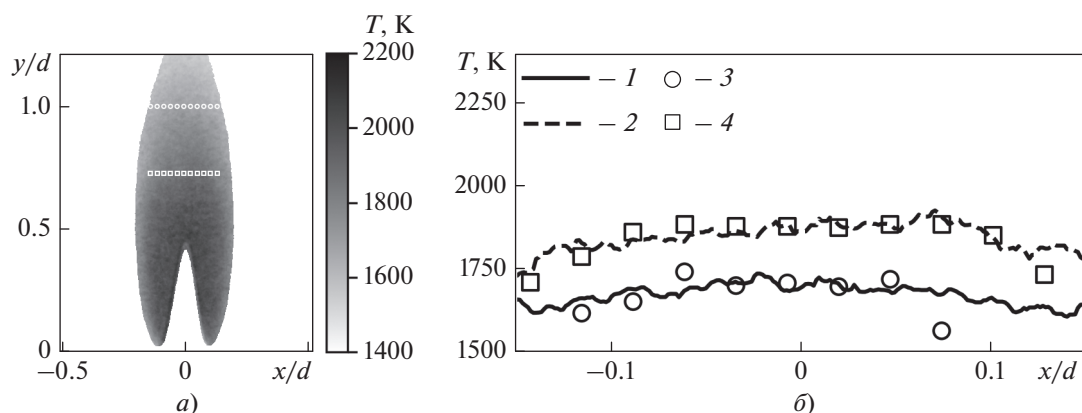


Рис. 3. Поле температуры в ламинарном пламени (а) и профили температуры, измеренной методом PLIF-термометрии (1, 2) и с помощью термопары (3, 4) (б).

y/d : 1, 3 – 1.0; 2, 4 – 0.7

Отношение сигналов флуоресценции радикала ОН в ламинарном пламени представлено на рис. 2, а. Белые маркеры – это точки, в которых были проведены измерения температуры с помощью термопары. На рис. 2, б показаны зависимость температуры от отношения зарегистрированных сигналов флуоресценции и построенная исходя из данной зависимости калибровочная прямая. Большинство точек попадает в диапазон отклонений ± 50 К от найденной прямой.

На рис. 3 приведены поле температуры в ламинарном пламени, а также профили температуры, полученные методом PLIF-термометрии и с помощью термопары.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ввиду того что интенсивность флуоресценции на длине волны приблизительно 265 нм крайне низкая, мгновенные изображения сильно зашум-

лены. Для избавления от нежелательных шумов к изображениям сигнала флуоресценции $I_{\Delta v=2}$ перед вычислением температуры был применен фильтр нелокального среднего. Результат его работы представлен на рис. 4.

На рис. 5 показаны мгновенные распределения интенсивности флуоресценции ОН для $I_{\Delta v=2}$ и $I_{\Delta v=0}$, а также рассчитанное по их отношению поле температуры за фронтом турбулентного закрученного пламени в модельной камере сгорания, полученные с помощью метода PLIF-термометрии для режима с $Re = 1.5 \times 10^4$, $\alpha = 1.54$. Стоит отметить, что распределение температуры получено только в областях, где присутствует радикал ОН, области без сигнала закрашены белым. Кроме того, для удобства последующих расчетов температура в таких областях принималась равной нулю. Вычисленные значения температуры лежат в диапазоне 1500–2000 К.

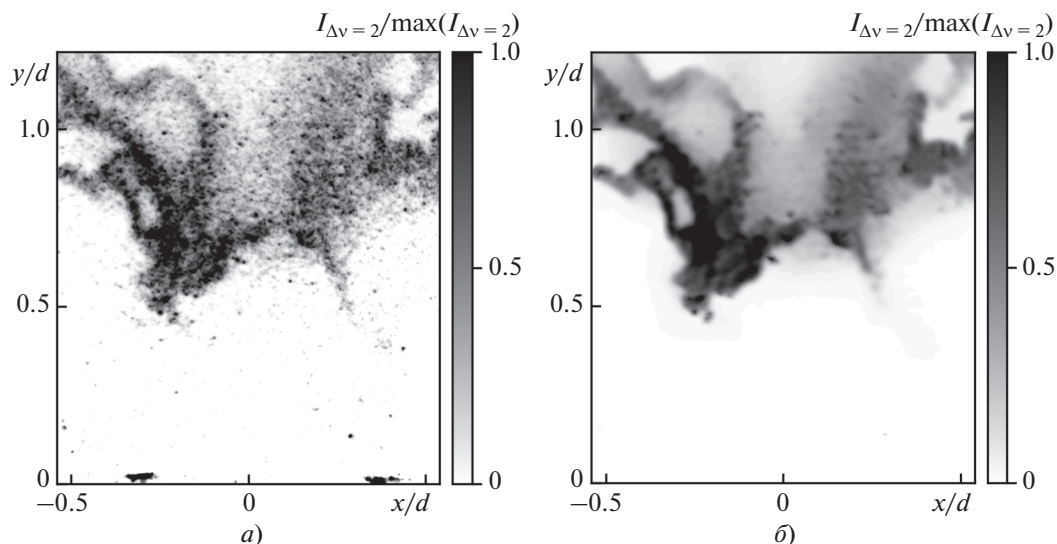


Рис. 4. Мгновенное распределение интенсивности флуоресценции для $I_{\Delta V} = 2$ без фильтра (а) и с его использованием (б). $I_{\Delta V} = 2/\max(I_{\Delta V} = 2)$ – интенсивность, нормированная на максимальное значение

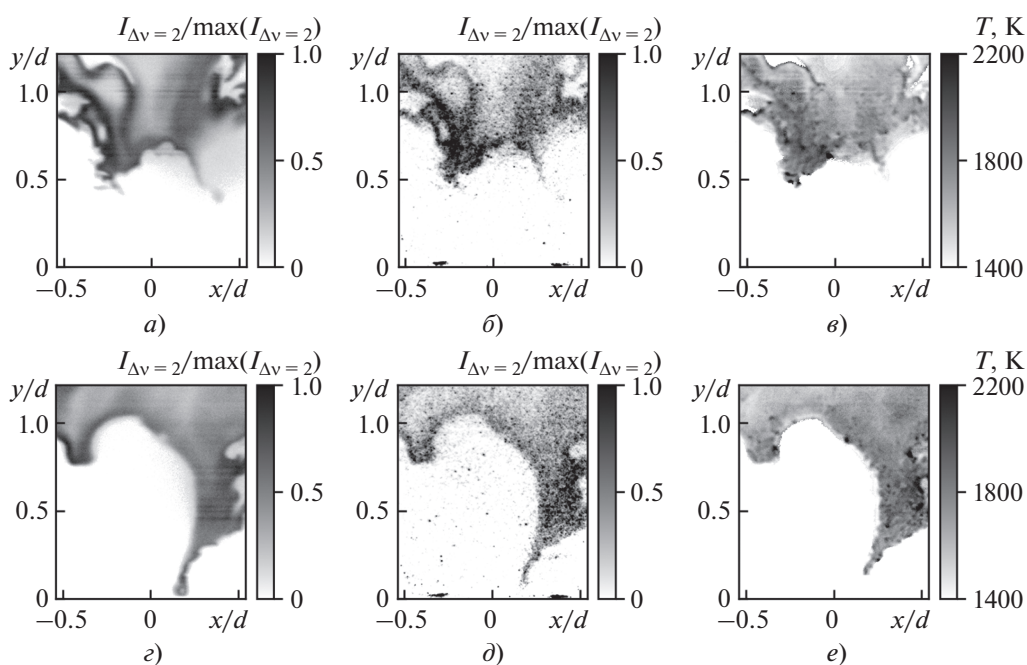


Рис. 5. Мгновенное распределение интенсивности флуоресценции ОН для $I_{\Delta V} = 0$ (а, е), $I_{\Delta V} = 2$ (б, д) и соответствующее поле температуры (в, е)

Распределение температуры в камере сгорания ГТУ представлено на рис. 6, а. При вычислении среднего значения было использовано 1500 мгновенных изображений. Полученные средние значения температуры оказались существенно ниже, чем на мгновенных распределениях температуры. Это связано как с турбулентным поведением пламени, выражающимся в том, что его фронт явля-

ется существенно нестационарным, так и с тем, что температура в областях с малыми концентрациями ОН принималась равной нулю специально для того, чтобы использовать метод условного осреднения, описанный далее. Чтобы оценить среднюю температуру продуктов горения при определении среднего поля температуры, вычисляли коэффициент перемежаемости γ : проводи-

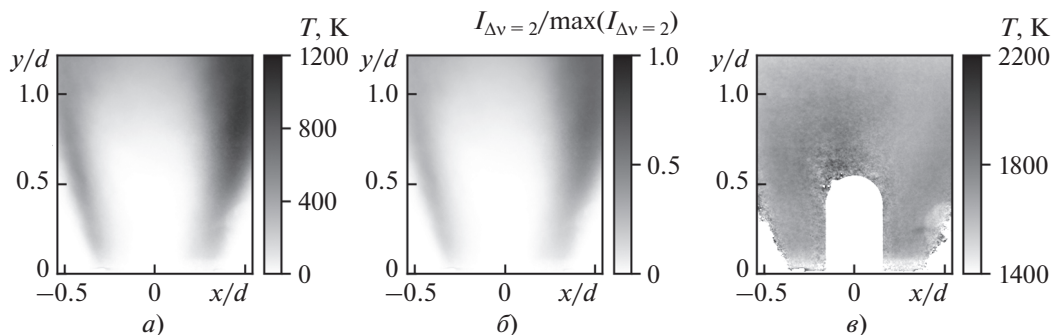


Рис. 6. Распределение средней температуры в камере сгорания (а), коэффициента пережгаемости γ (б) и средней температуры продуктов горения (в)

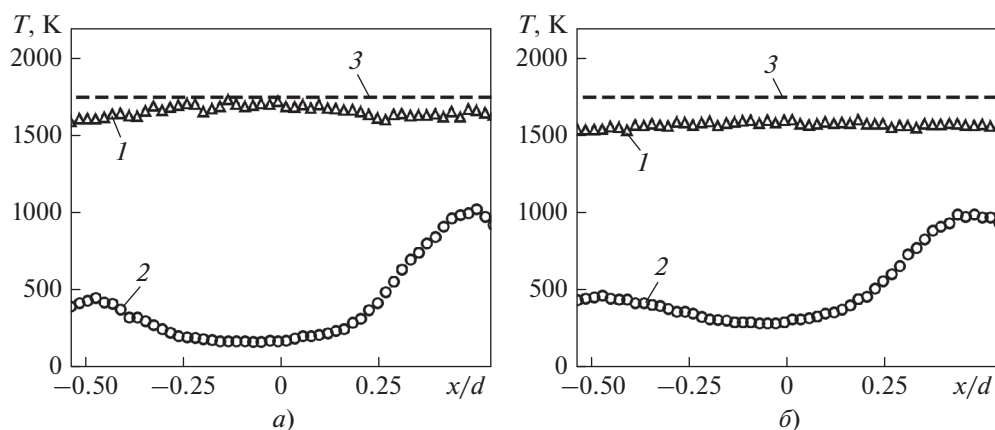


Рис. 7. Горизонтальные профили температуры на расстоянии $y/d = 1.0$ (а) и $y/d = 1.2$ (б) от среза сопла. 1 – T_{mean}/γ ; 2 – T_{mean} ; 3 – T_{ad}

ли бинаризацию мгновенных распределений температуры (1 – если сигнал есть, 0 – если сигнала нет) и рассчитывали среднее значение бинаризованных изображений. Таким образом, для каждой точки в области измерений был получен коэффициент, показывающий, на скольких мгновенных изображениях сигнал в данной точке присутствовал (значение 1 означает, что сигнал в данной точке есть на всех изображениях, 0 – не присутствует ни на одном изображении). При делении среднего распределения температуры на коэффициент пережгаемости была оценена температура продуктов сгорания. По сути, такая операция равноценна вычислению средней температуры в точке с использованием только тех мгновенных изображений, где температура могла быть рассчитана по отношению сигналов флуоресценции радикала ОН.

Распределения коэффициентов пережгаемости γ и средней температуры продуктов горения представлены на рис. 6, б, в соответственно. Ввиду того что температура в окрестности централь-

ной топливной струи не могла быть вычислена, так как в данной области не присутствовал радикал ОН, на поле температуры была наложена маска, скрывающая область в диапазоне x/d от -0.15 до 0.15 и y/d от 0 до 0.55 . Кроме того, на условно осредненном распределении наблюдается постепенное снижение температуры вниз по потоку. Это явление может быть объяснено потерями тепла на излучение.

На рис. 7 приведены профили температуры (средней T_{mean} и адиабатической T_{ad}) на расстоянии $y/d = 1.0$ и 1.2 от среза сопла. Отложена каждая 15-я точка. Значение адиабатической температуры для исследуемого пламени составляет $T_{ad} = 1747$ К. Показано, что температура за движущимся фронтом пламени почти соответствует адиабатической температуре горения метановоздушной смеси, близкой к пределу “бедного” срыва, за исключением, возможно, областей, где сигнал флуоресценции радикала ОН был низким и плохое соотношение сигнал/шум не позволяло достоверно оценить температуру пламени.

ВЫВОДЫ

1. Для измерения температуры пламени, при возбуждении линии $Q_1(8)$ перехода $(1-0)$ электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ гидроксильного радикала OH использовалась калибровка thermally-assisted PLIF-системы, которая позволила провести расчет температуры за фронтом турбулентного пламени с помощью отношения зарегистрированных сигналов флуоресценции.

2. Температура пламени линейно зависит от отношения интенсивностей флуоресценции различных переходов молекул радикала OH.

3. Согласно мгновенным распределениям температуры турбулентного закрученного пламени, полученным в модельной камере сгорания ГТУ методом thermally-assisted PLIF, оцененные значения температуры лежат в диапазоне 1500–2000 К.

4. Температура за движущимся фронтом пламени в среднем соответствует адиабатической температуре горения метановоздушной смеси, близкой к пределу “бедного” срыва.

5. Полученные данные могут быть использованы для проверки результатов численного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lucco-Negro O., O’Doherty T.** Vortex breakdown: a review // Prog. Energy Combust. Sci. 2001. V. 27. Is. 4. P. 431–481.
[https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00022-8)
2. **Syred N.** A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // Prog. Energy Combust. Sci. 2006. V. 32. Is. 2. P. 93–161.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.10.002>
3. **A mechanism** of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors / T. Lieuwen, H. Torres, C. Johnson, B.T. Zinn // J. Eng. Gas Turbines Power. 2000. V. 123. Is. 1. P. 182–189.
4. **Detailed** characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame/ W. Meier, P. Weigand, X.R. Duan, R. Giezendanner-Thoben // Combust. Flame. 2007. V. 150. Is. 1–2. P. 2–26.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.04.002>
5. **Fooladgar E., Tóth P., Duwig C.** Characterization of flameless combustion in a model gas turbine combustor using a novel post-processing tool // Combust. Flame. 2019. V. 204. P. 356–367.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.03.015>
6. **Effect** of burner geometry on swirl stabilized methane/air flames: A joint LES/OH-PLIF/PIV study / X. Liu, A.M. Elbaz, C. Gong, X.S. Bai, H.T. Zheng, W.L. Roberts // Fuel. 2017. V. 207. P. 533–546.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.092>
7. **Influence** of a central jet on isothermal and reacting swirling flow in a model combustion chamber / E.V. Palkin, M.Yu. Hrebtev, D.A. Slastnaya, R.I. Mulyadzhyanov, L. Vervisch, D.K. Sharaborin, A.S. Lobasov, V.M. Dulin // Energies. 2022. V. 15. Is. 5. P. 1615.
<https://doi.org/10.3390/en15051615>
8. **Eckbreth A.C.** Laser diagnostics for temperature and species in unsteady combustion. Dordrecht: Springer, Unsteady Combustion 1996, P. 393–410.
9. **LES** simulation of a model gas-turbine lean combustor: impact of coherent flow structures on the temperature field and concentration of CO and NO / L.M. Chikishev, D.K. Sharaborin, A.S. Lobasov, A.A. Dekterev, R.V. Tolstoguzov, V.M. Dulin, D.M. Markovich // Energies. 2022. V. 15. Is. 12. P. 4362.
<https://doi.org/10.3390/en15124362>
10. **Large** Eddy Simulation of an industrial gas turbine combustor using reduced chemistry with accurate pollutant prediction / T. Jaravel, E. Riber, B. Cuenot, G. Bulat // Proc. Combust. Institute. 2017. V. 36. Is. 3. P. 3817–3825.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.027>
11. **Numerical** investigation of turbulent swirling flames with validation in a gas turbine model combustor / A.C. Benim, S. Iqbal, W. Meier, F. Joos, A. Wiedermann // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 110. P. 202–212.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.143>
12. **Phase-locked** temperature measurements by two-line OH PLIF thermometry of a self-excited combustion instability in a gas turbine model combustor / R. Giezendanner-Thoben, U. Meier, W. Meier, M. Aigner // Flow, Turbulence and Combust. 2005. V. 75. Is. 1. P. 317–333.
<https://doi.org/10.1007/s10494-005-8587-0>
13. **Copeland C., Friedman J., Renksizbulut M.** Planar temperature imaging using thermally assisted laser induced fluorescence of OH in a methane–air flame // Exp. Therm. Fluid Sci. 2007. V. 31. Is. 3. P. 221–236.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.04.005>
14. **Assessment** of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ $(1-0)$ band / V. Dulin, D. Sharaborin, R. Tolstoguzov, A. Lobasov, L. Chikishev, D. Markovich, S. Wang, C. Fu, X. Liu, Y. Li, Y. Gao // Proc. Combust. Institute. 2021. V. 38. Is. 1. P. 1877–1883.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.025>
15. **PIV/PLIF** investigation of unsteady turbulent flow and mixing behind a model gas turbine combustor / D.K. Sharaborin, A.G. Savitskii, G.Y. Bakharev, A.S. Lobasov, L.M. Chikishev, V.M. Dulin // Exp. Fluids. 2021. V. 62. Is. 5. P. 1–19.
<https://doi.org/10.1007/s00348-021-03181-z>

A LIF Study of the Temperature Field behind the Pilot Flame Front of a Gas Turbine Type Model Combustor

A. G. Savitskii^{a, b, *}, D. K. Sharaborin^{a, b}, V. M. Dulin^{a, b}, and D. M. Markovich^{a, b}

^a Kutateladze Institute of Thermal Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^b Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: a.savitskii@gsu.ru

Abstract—The problem of reducing the amount of harmful emissions during the operation of gas turbine units (GTUs) has become especially important in recent years. In this regard, for optimizing the flow thermal and gas dynamic processes, the flow velocity and the combustion process in the GTU combustion chambers have to be studied in detail. Such optimization makes it possible not only to secure highly complete fuel combustion and stable operation of the burners in a wide range of the fuel to oxidizer ratios but also to decrease the amount of harmful emissions. The article deals with studying the temperature field structure of the pilot flame produced by a model gas turbine two-zone burner. The instantaneous temperature distribution in the flame was recorded using the method based on thermally-assisted two-line planar laser-induced fluorescence (PLIF) in exciting the $Q_1(8)$ transition band (1–0) of the $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ OH hydroxyl radical electron system. The study was carried out for the case of combusting a partially agitated methane and air mixture with a significant air excess factor $\alpha = 1.54$ under standard conditions in swirl flow at the Reynolds number $Re = 1.5 \times 10^4$. The procedure of calibrating a thermally assisted PLIF system with using a thermocouple is described in detail. The article also presents instantaneous temperature distribution patterns downstream of the flame front in the range 1500–2000 K. The obtained data show that the temperature field features a significant heterogeneity due to the flame being stabilized at the central fuel flame periphery by a swirl mixing air flow. The conditional averaging of the temperature field with taking into account the alternation caused by the flame's front motion testifies that the temperature at the front base is close to the minimal adiabatic temperature values of the preagitated mixture near the “lean” ($\alpha > 1$, i.e., when the amount of oxidizer (air) is larger than that necessary for complete fuel combustion) flammability limit.

Keywords: vortex combustion chamber, turbulent swirl flame, laser-induced fluorescence, panoramic thermometry, methane–air mixture, alternation ratio