

УДК 536.461, 536.464, 534.222

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПЛАМЁН\*

В. М. Дулин<sup>1,2</sup>, Д. М. Маркович<sup>1,2</sup>, М. П. Токарев<sup>1,2</sup>,  
Л. М. Чикишев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2  
E-mail: dmark@itp.nsc.ru

Представлено описание ряда современных оптических методов, используемых для диагностики реагирующих течений. Детально обсуждены аспекты применения современных модификаций методики PIV (Stereo-PIV, High-repetition PIV, Tomo-PIV) для измерения полей мгновенной скорости в реагирующих течениях. На примере исследования турбулентного закрученного пропановоздушного пламени и изотермической струи продемонстрированы возможности метода PIV, а также спектроскопии излучения пламени (радикала СН\*) для получения данных о пространственной структуре потока и пламени.

*Ключевые слова:* анемометрия по изображениям частиц, PIV, закрученное турбулентное пламя, крупномасштабные вихревые структуры.

**Введение.** Турбулентные струйные реагирующие течения широко распространены в ряде технических приложений: при сжигании попутного газа, в камерах сгорания, в ракетных и газотурбинных двигателях и т. п., что порождает большой интерес к изучению структуры таких потоков в различных конфигурациях. В настоящее время является общепризнанным, что наиболее эффективны при проектировании технических устройств подходы, основанные на совместном использовании математического моделирования и углублённого физического эксперимента. Экспериментальная информация особенно важна для изучения процессов горения, так как существующие математические модели, даже самые современные, не могут дать надёжных предсказаний без использования эмпирических данных и детальной верификации для таких сложных объектов, как турбулентные пламена. В данных системах необходим одновременный учёт широкого набора физических механизмов: многомасштабности, начиная с крупномасштабных вихревых структур (КВС), размер которых сопоставим с масштабом системы в целом, и заканчивая масштабами, на которых идут химические реакции; взаимного влияния турбулентного спектра и флуктуаций тепловыделения; соотношения интенсивностей естественной и вынужденной турбулентной конвекции и т. д.

Современные методы для бесконтактной оптической диагностики широкого класса реагирующих течений в различных приложениях основаны на следующих технологиях: лазерной доплеровской анемометрии (LDV — Laser Doppler Velocimetry), анемометрии изоб-

\*Работа выполнена при поддержке Федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

ражений частиц (цифровая трассерная визуализация, или общепринятое международное наименование — PIV (Particle Image Velocimetry)), спектральном анализе рассеяния (рассеяние Рэля, спонтанное рассеяние Рамана (SRS — Spontaneous Raman Scattering) и др.), когерентном антистоксовом рамановском рассеянии (CARS — Coherent anti-Stokes Raman Scattering), а также плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF).

Метод PIV основан на регистрации поля смещений трассерных частиц при импульсном освещении с заданной временной задержкой и вычислении мгновенных распределений скорости. Анализ ансамбля мгновенных полей скорости даёт возможность получить полный набор статистических гидродинамических характеристик потока, а также проанализировать динамику вихревых структур. Помимо базового варианта плоскостного PIV, позволяющего определить две компоненты скорости в выбранном (освещённом) сечении потока, различают ряд его модификаций: Stereo-PIV (три компоненты скорости в сечении), являющийся в настоящее время общепризнанным стандартом, Томо-PIV (томографический, три компоненты скорости в объёме потока), а также эти модификации с высоким временным разрешением (High-repetition PIV).

Метод спонтанного рассеяния Рамана основан на спектральном анализе неупругого рассеянного молекулами излучения, который с помощью моделирования спектра комбинационного рассеяния позволяет определить состав, а также температуру исследуемой смеси. Типичная компоновка оборудования для измерения концентрации и температуры в пламени методом SRS представлена на рис. 1, *a*. Измерительная система состоит из импульсного твердотельного лазера Nd:YAG производства фирмы "Quantel" (Франция) (200 мДж в импульсе), спектрографа производства "Newport" (США) (ширина щели 125 мкм) и интенсифицированной ПЗС-камеры "Dcam Pro" производства PCO (Германия). Управление системой осуществляется с помощью персонального компьютера и синхронизирующего процессора. При этом измерения проводятся вдоль линии лазерного пучка.

В методе регистрации рассеяния Рэля (рис. 1, *b*) измерения проводятся в плоскости лазерного ножа, при этом камера оснащается узкополосным оптическим фильтром, пропускающим только длину волны лазерного излучения. Измеряемой величиной является падение интенсивности излучения на длине волны лазера после упругого рассеяния на молекулах, связанное с доплеровским уширением спектра рассеяния, вызванным тепловым движением молекул. После калибровки с помощью данного метода измеряется температура в пламени.

Методика PLIF основана на переизлучении фотонов молекулами из электронно-воз-

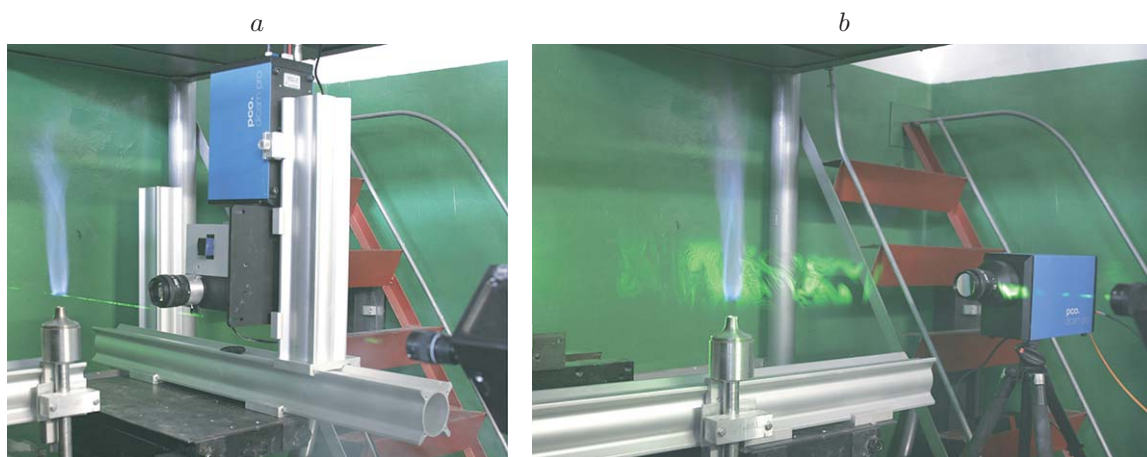


Рис. 1. Фотографии измерительной системы: для регистрации спонтанного рассеяния Рамана (*a*) и рассеяния Рэля (*b*)

буждённого состояния, в которое они попадают после поглощения излучения определённой длины волны (возбуждение флуоресценции). Данный метод является высокоселективным и даёт возможность детектировать распределения концентрации выбранного радикала в пламени. Применение метода PLIF для исследования пламён подразумевает использование перестраиваемого лазера на красителе в комплекте с мощным лазером накачки (как правило, Nd:YAG с энергией второй гармоники порядка 600–1000 мДж), такая комбинация позволяет генерировать излучение для возбуждения флуоресценции радикалов (например, СН — 390 нм, ОН — 283 нм). С помощью оптической насадки (сферическая и цилиндрическая линзы) излучение разворачивается в лазерный нож, а регистрация сигнала флуоресценции производится с помощью интенсифицированной ПЗС-камеры, оснащённой оптическим фильтром.

Базовые решения данных экспериментальных методов являются в настоящее время общепринятым стандартом, внедрены в ряде зарубежных лабораторий и начинают активно использоваться в научных, учебных и промышленных организациях России. Однако в силу сложности прецизионной настройки, калибровки измерительных систем, необходимости адаптации к различным физическим объектам каждый новый эксперимент до сих пор остаётся уникальным научным исследованием. Сложности усугубляются проблемами, связанными с широким набором возможных моделей отдельных комплектующих измерительных систем — лазеров, цифровых камер, обладающих различными характеристиками и особенностями в зависимости от модели, производителя и т. д.

Приведём обзор работ по применению оптических методов, основанных на регистрации излучения, рассеянного молекулами, а также на лазерно-индуцированной флуоресценции для измерения мгновенных распределений химического состава и температуры в прямоточных горелках. Например, в [1] температурные измерения выполнялись методом CARS в камере сгорания, работающей по схеме «богатая смесь — резкое охлаждение — бедная смесь». Чтобы получить двумерное распределение температуры в камере сгорания при сжигании предварительно перемешанной обеднённой метановоздушной смеси, в [2] использовали метод CARS одновременно с рассеянием Рэлея. В том же горелочном устройстве в [3] исследовали структуру фронта пламени с помощью PLIF радикала ОН\* (PLIF ОН) и 2D-рассеяния Рэлея. Авторы работы [4] исследовали влияние давления на процессы горения с помощью PLIF ОН и NO в модельном горелочном устройстве, использующем обеднённую испарённую предварительно перемешанную смесь жидкого топлива. Что касается стратегии снижения выбросов NO<sub>x</sub>, то в [5, 6] выполнены количественные LIF NO измерения в горелочном устройстве при повышенном давлении с прямым впрыском обеднённой смеси. В работе [7] применили PLIF ОН с добавлением ацетона в модели газовой турбины на обеднённой предварительно перемешанной смеси, а в [8] — для промышленного газотурбинного горелочного устройства. Авторы [9] использовали совместно методы PLIF ОН, CARS и LDV для диагностики процессов турбулентного горения пропана в горелочном устройстве газотурбинного типа. Метод PLIF ОН применён в [10] для исследования структуры пламени и неустойчивости в газотурбинной камере сгорания с обеднённым режимом горения предварительно перемешанной смеси, в [11] — для визуализации фронта пламени в горелочном устройстве мощностью 400 кВт, в [12] — для исследования деталей явления проскока пламени. В работе [13] провели анализ технической осуществимости схем LIF с двухфотонным возбуждением флуоресценции CO и измерением поля температуры с добавлением индия в низкоэмиссионной газотурбинной установке. Сравнение двух различных схем возбуждения для измерения концентрации с использованием рассеяния Рамана выполнено в [14]. В DLR (Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt) в целях валидации численных расчётных кодов для моделирования горелочного устройства при повышенном давлении [15–18] применялись различные лазерные методики (LDV, CARS, PLIF ОН и PLIF керосина), а также измерения поля температуры с помощью PLIF ОН. В

работе [19] авторы, используя плоскостной метод регистрации рассеяния Рэлея, провели исследования мгновенной структуры фронта пламени в прямооточной горелке при повышенном давлении. Измерения с высоким пространственным разрешением позволили показать уменьшение толщины фронта пламени при увеличении коэффициента стехиометрии подаваемой смеси в сторону единицы. В последнее время с развитием метода PIV появляется всё больше работ по его применению для измерений мгновенной скорости в пламенах (в большинстве случаев на начальном участке). Однако в литературе почти не представлены данные об осреднённой структуре течения и распределениях интенсивности турбулентных пульсаций, полученные на основе PIV-измерений в окрестности фронта пламени [20]. Такие измерения являются возможными при использовании высокоскоростных PIV-систем [21], позволяющих измерить необходимый ансамбль полей скорости за несколько запусков с продолжительностью каждого менее секунды.

В данной работе представлен анализ особенностей применения некоторых из вышеперечисленных оптических методов (Stereo-PIV, High-repetition PIV, Tomo-PIV) для измерения пространственных распределений мгновенной скорости в потоке в целях изучения КВС и их роли, а также метода регистрации интенсивности хемилюминесценции радикала  $\text{CN}^*$  для определения области интенсивного турбулентного горения. Объектами исследования являлись турбулентные закрученные струйные потоки, в том числе при наличии горения.

**Экспериментальный стенд и измерительные методики.** Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 2. Исследование горения предварительно перемешанных компонент топлива и окислителя выполнено на открытой горелке мощностью 7,5 кВт. Горелочной насадкой служило профилированное сопло с выходным диаметром  $d$ , равным 15 мм. Расходы компонент смеси контролировались с помощью расходомеров и программного обеспечения Bronkhorst Hi-Tech. Эксперименты проводились при атмосферном давлении. В качестве топлива использовались пропан и метан, в качестве окислителя — атмосферный воздух.

Условия эксперимента варьировались в широком диапазоне параметров: число Рейнольдса ( $Re$ ) (построенное по диаметру сопла, коэффициенту кинематической вязкости и среднерасходной скорости окислителя) достигало значения 8000, коэффициент стехиометрии (избытка топлива)  $\Phi$  варьировался от 0,5 (обеднённая смесь) до 10 (богатая смесь), среднерасходная скорость потока  $U_0$  изменялась от 0,5 до 10 м/с.

Для получения мгновенных полей скорости потока применялась система Stereo-PIV, работающая в двухкадровом режиме с частотой съёмки 770 Гц. Система состояла из скоростного сдвоенного Nd:YLF импульсного лазера "Pegasus", двух скоростных (более

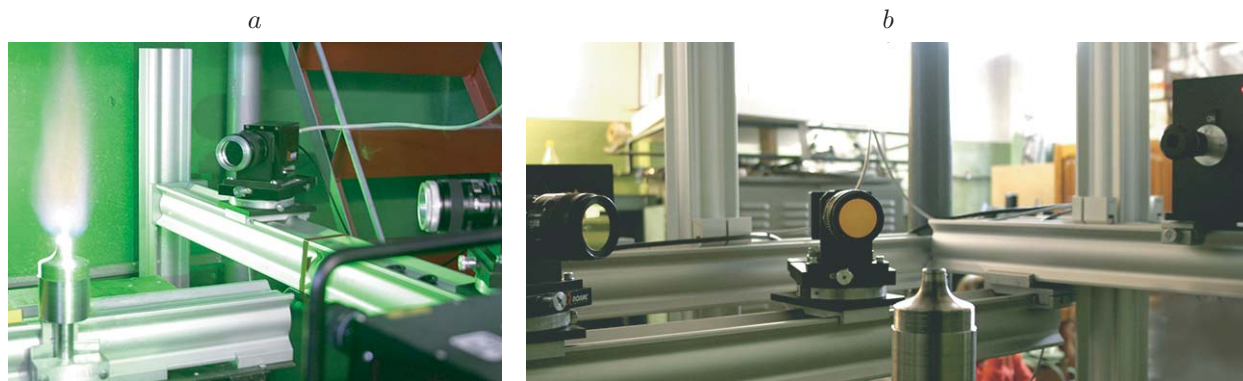


Рис. 2. Фотографии соплового блока и систем Stereo-PIV: высокого пространственного разрешения (a) и высокого временного разрешения (b)

600 Гц при полном разрешении) КМОП-камер РСО 1200HS и управляющего процессора. Для формирования лазерного ножа использовались фокусирующая и цилиндрическая линзы. Измерения проводились в центральной плоскости пламени. Поток засеивался частицами диоксида титана (средний диаметр 1 мкм), а внешний воздух — частицами дыма. В соответствии с данными работы [22] указанный размер частиц является достаточно малым, чтобы обеспечить регистрацию высокочастотных турбулентных пульсаций (время релаксации частиц составляло 10 мкс). Камеры оснащались узкополосными оптическими фильтрами, пропускавшими излучение лазера (527 нм) и подавлявшими излучение пламени. Стерекалибровка проводилась при использовании многоуровневой калибровочной мишени размером 150 × 150 мм, которая имела три уровня калибровочных маркеров: -2, 0, +2 мм относительно центра мишени. Управление системой, сбор, хранение и обработка данных осуществлялись с помощью компьютера с программным обеспечением ActualFlow. Задержка между парами кадров (и, соответственно, между парами вспышек лазера) составляла 1300 мкс, а задержка между двумя вспышками, определяющая смещение частиц на паре кадров, — 40 мкс. Для расчёта статистики набирался ансамбль из 2400 полей мгновенной скорости (в результате четырёх независимых запусков по 600 полей скорости). Поля скорости рассчитывались с использованием итерационного кросс-корреляционного алгоритма с деформацией изображения, конечным размером расчётной области 32 × 32 пикселя и 50 %-ным перекрытием. Для учёта неравномерности засева потока трассерами применялся алгоритм, учитывающий количество частиц в каждой расчётной области (если количество не превышало пяти, то вектор скорости в этой области не рассчитывался). На основе полученных мгновенных полей скорости были рассчитаны пространственные распределения средней скорости и компонент кинетической энергии турбулентности (КЭТ). Детальное описание алгоритмов обработки изложено в [23, 24].

Для определения положения фронта пламени, а также исследования интенсивности горения использовалась интенсифицированная ПЗС-камера «Наногейт-2» на базе электронно-оптического преобразователя. Разрешение камеры составляло 1388 × 1038 пикселей, экспозиция — от 20 нс до 200 мкс, разрядность — 12 бит. Камера оснащена узкополосным оптическим фильтром для выделения излучения радикалов  $\text{CH}^*$  ( $430 \pm 5$  нм). Длительность экспозиции камеры выбрана близкой к задержке между парой лазерных вспышек и равнялась 100 мкс. Для каждого режима горения измерено по 500 распределений радикала  $\text{CH}^*$ . При анализе пространственной структуры горения к осреднённым изображениям было применено обратное дискретное преобразование Абея ( $A^{-1}$ ).

**Результаты экспериментов.** На рис. 3 приведены результаты тестовых измерений для ламинарного бунзеновского конического пламени, в соответствии с которыми точность определения среднеквадратичного отклонения скорости внутри конуса составила 1,3 % для компонент скорости в измерительной плоскости и 1,7 % для компоненты скорости, перпендикулярной измерительной плоскости.

На рис. 4 представлены фотография и распределения интенсивности хемилюминесценции  $\text{CH}^*$  ( $I_{\text{CH}}^*$ ) для поднятого пламени с высокой степенью закрутки. В таком режиме наблюдалась широкая область горения, расположенная вблизи кромки сопла ( $0,5 < z/d < 1,2$  и  $r/d < 1,3$ ). Распределения  $I_{\text{CH}}^*$  показывают, что фронт поднятого пламени сильно искажён турбулентными пульсациями скорости, вследствие чего основание пламени имеет существенно трёхмерную форму. Распределения  $I_{\text{CH}}^*$  также демонстрируют, что в некоторые моменты времени фронт пламени может находиться достаточно близко к кромке сопла, например на расстоянии 3 мм от сопла при  $r/d = -0,5$  на указанном снимке.

На рис. 5, а приведён пример поля мгновенной скорости и завихренности для данного режима горения. Отчётливо наблюдаются распад вихревого ядра закрученного течения и возвратное течение вблизи сопла. В целом течение имеет пространственную структуру, сходную со случаем изотермического течения сильнозакрученной струи ( $S = 1,0$  и

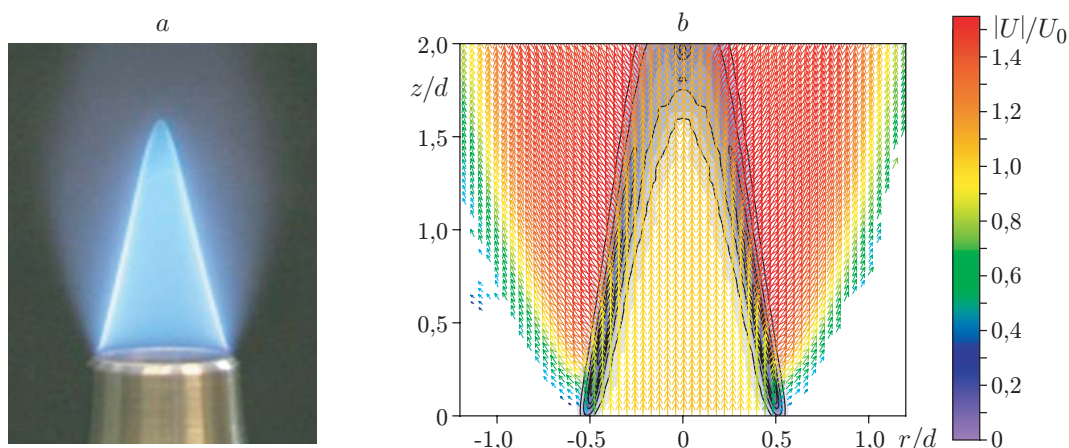


Рис. 3. Бунзеновское пламя при  $Re = 2000$ ,  $\Phi = 0,8$ ,  $U_0 = 2,2$  м/с: фотография пламени (a), поле средней скорости и среднее распределение относительной концентрации радикала  $CH^*$  (b)

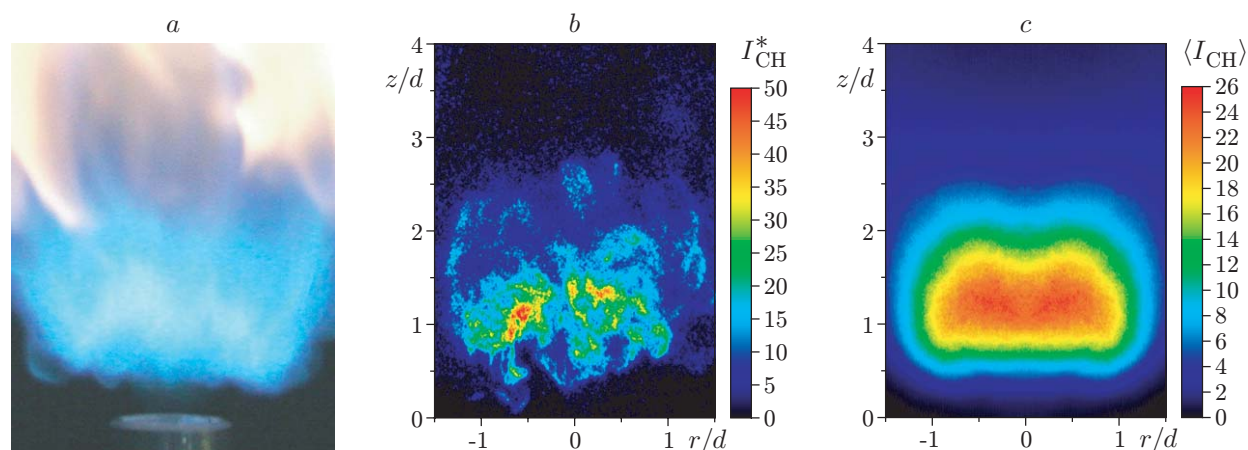


Рис. 4. Поднятое пламя с интенсивной закруткой ( $S = 1,0$ ,  $\Phi = 2,5$ ,  $Re = 4100$ ,  $U_0 = 4,6$  м/с): фотография пламени (a), мгновенное (b) и среднее (c) распределения интенсивности химилуминесценции  $CH^*$

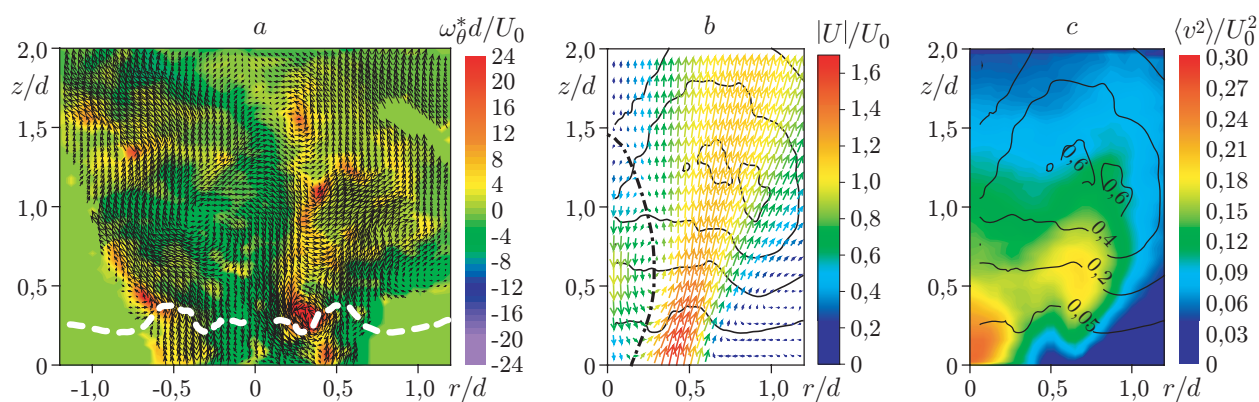
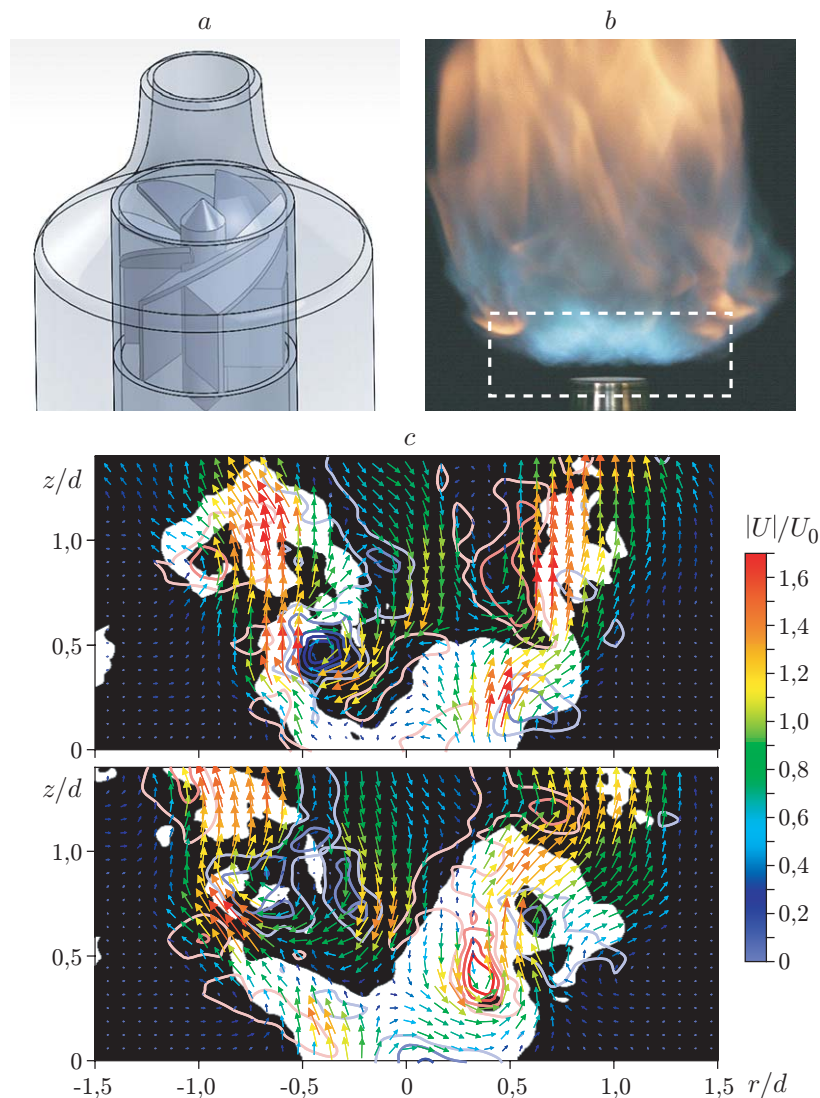


Рис. 5. Пространственные распределения характеристик поднятого пламени с интенсивной закруткой ( $S = 1,0$ ,  $\Phi = 2,5$ ,  $Re = 4100$ ,  $U_0 = 4,6$  м/с): a — мгновенная скорость и завихренность (штриховая кривая — изолиния  $A^{-1}\langle I_{CH}^* \rangle = 0,05$  отн. ед.); b — средняя скорость (штрихпунктирная кривая — зона рециркуляции); c — радиальная составляющая КЭТ (сплошные кривые — изолинии  $A^{-1}\langle I_{CH}^* \rangle$ )

$Re = 8900$ ), описанным в [25]. В этом случае предполагается, что наиболее интенсивные вихри представляют собой пару спиралей, порождаемых прецессией вихревого ядра. Распределения средней скорости и радиальной компоненты КЭТ показаны на рис. 5, *b, c*. Изолинии  $A^{-1}\langle I_{CH}^* \rangle$  демонстрируют, что турбулентное горение происходит как во внешнем, так и во внутреннем слоях смешения реагирующей струи. Наибольшее значение  $A^{-1}\langle I_{CH}^* \rangle = 0,65$  наблюдается в области, соответствующей  $r/d = 0,7$  и  $z/d = 1,3$ . Основные отличия реагирующего течения от изотермического потока проявляются в более сильном расширении струи и в большей скорости возвратного течения, а также в увеличении скорости при прохождении области турбулентного горения вследствие расширения газа.

На рис. 6 показаны измеренные с временным интервалом 1,3 мс распределения скорости, позволяющие проанализировать динамику крупномасштабных вихревых структур



*Рис. 6.* Характеристики поднятого пропановоздушного пламени с интенсивной закруткой (High-repetition PIV-измерения): схема организации закрученного течения (*a*), фотография частично перемешанного пропановоздушного пламени с интенсивной закруткой ( $Re_{air} = 4100$ ,  $\Phi = 2,5$ ) (*b*), распределение мгновенной скорости и бинарное изображение, соответствующее начальной концентрации трассеров, временной интервал между измеренными полями скорости составляет 1,3 мс (*c*)

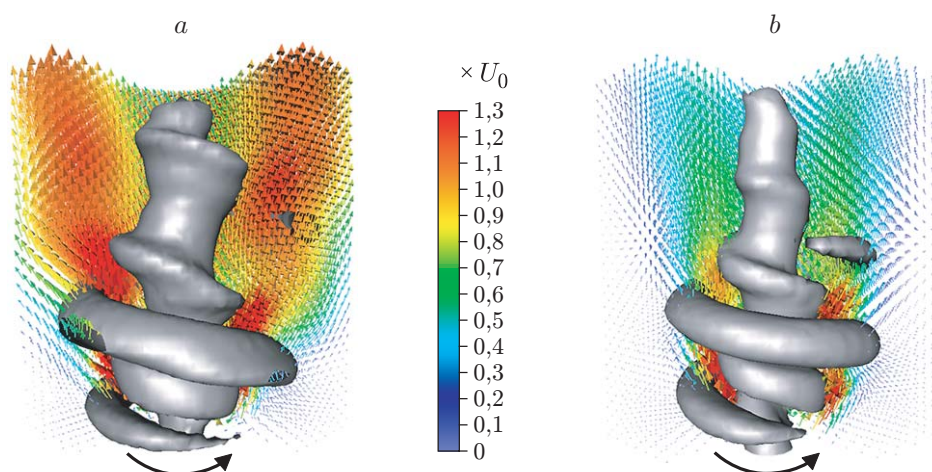


Рис. 7. POD-реконструкция фазово-осреднённой трёхмерной структуры прецессирующего вихревого ядра и вторичной спиральной КВС: поднятое пламя с интенсивной закруткой (а), изотермическая струя с интенсивной закруткой (б)

в пропановоздушном поднятом пламени с высокой степенью закрутки ( $S = 1,0$ ). В соответствии с проведённой оценкой данная временная задержка в 3 раза меньше периода прецессии вихревого ядра. Белым цветом на рисунке показаны области, в которых концентрация трассерных частиц не отличается от концентрации в потоке, выходящем из сопла, т. е. локальное соотношение топлива и окислителя соответствует коэффициенту стехиометрии  $\Phi$ . Как видно из полей мгновенной скорости, крупномасштабные вихревые структуры формируются как во внутреннем (между зоной рециркуляции и главным потоком), так и во внешнем (между главным потоком и окружающим воздухом) слоях смешения кольцевого потока. В целом структура течения была подобна для всех случаев с сильной закруткой: в потоке имела место прецессия вихревого ядра, сопровождающаяся периодическим изменением радиального направления возвратного течения вблизи ниж-

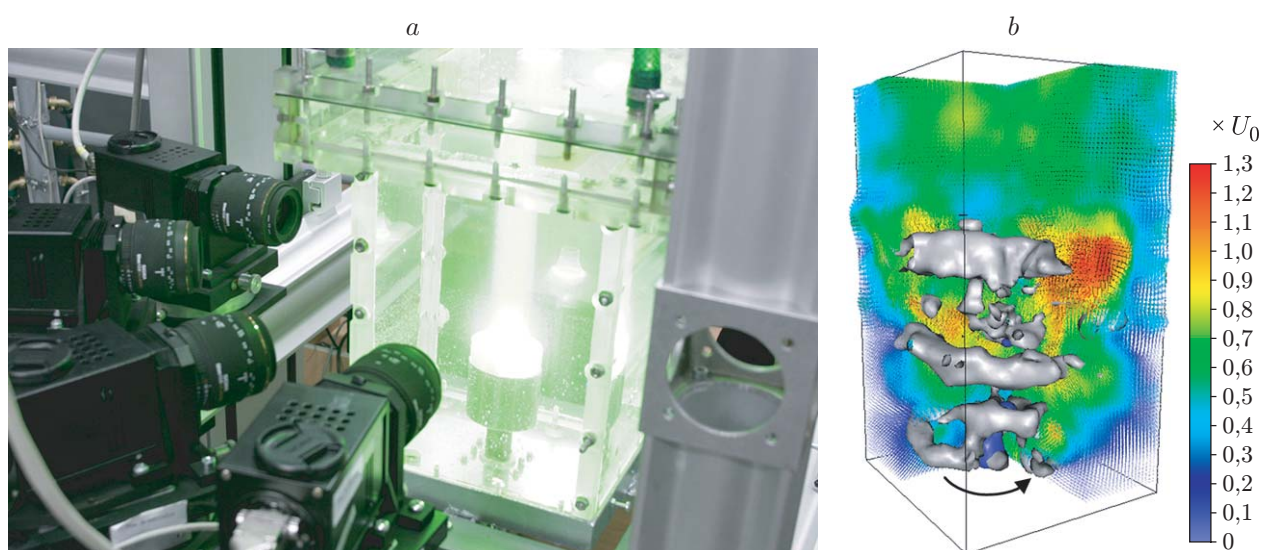


Рис. 8. Результаты томографического PIV-эксперимента: а — фотография измерительной системы; б — измеренное трёхмерное распределение трёх компонент скорости в затопленной изотермической струе с интенсивной закруткой (изоповерхности демонстрируют КВС и область возвратного течения вблизи кромки сопла)



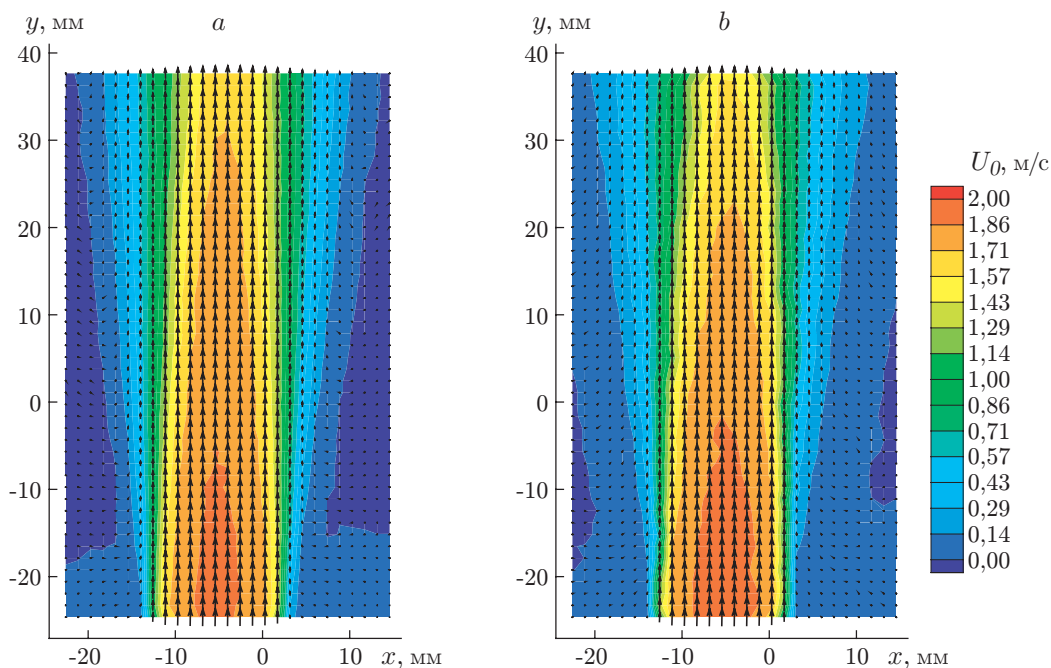


Рис. 9. Поле скорости в центральном сечении свободной затопленной изотермической струи без закрутки: *a* — результаты, полученные методом Stereo-PIV; *b* — результаты, полученные методом Tomo-PIV

ней точки. После «столкновения» возвратного течения и основного потока, выходящего из сопла, во внутреннем слое смешения формировалась КВС, имеющая форму спирали [26] и обеспечивающая тепломассообмен между продуктами горения и свежей смесью. Вторичная спираль также формировалась во внешнем слое и способствовала смешению струи с внешним воздухом.

На рис. 7 представлена POD-реконструкция (POD — Proper Orthogonal Decomposition) трёхмерного поля течения на основе первых двух наиболее энергетичных мод для сильнозакрученного поднятого пламени и изотермической сильнозакрученной струи. И в том и другом случае отчётливо можно наблюдать прецессию вихревого ядра. Методика POD-обработки PIV-эксперимента изложена в [27].

В настоящее время наиболее перспективным направлением развития методов измерения полей скорости в пламёнах является томографический PIV, который позволяет измерять мгновенное трёхмерное поле скорости сразу во всём объёме потока благодаря использованию большого числа камер, расположенных под разными углами к измерительному объёму. На рис. 8 показаны фотография экспериментальной установки и результаты измерений для затопленной изотермической струи с высокой степенью закрутки. Описание методики Tomo-PIV и алгоритмов обработки представлено в [28]. Сравнение результатов, полученных методами Stereo-PIV и Tomo-PIV, свидетельствует о том, что метод Tomo-PIV удовлетворительно отслеживает структуру течения и обладает высоким потенциалом с точки зрения измерений мгновенных трёхмерных трёхкомпонентных полей скорости в объёме потока (рис. 9).

**Заключение.** В данной работе продемонстрированы возможности нескольких модификаций измерительных методик, основанных на принципах анемометрии по изображениям частиц, для диагностики изотермических и реагирующих закрученных струйных течений. Применение метода Stereo-PIV с высокой временной разрешающей способностью дало возможность объяснить эффект подавления прецессии вихревого ядра в закрученной

реагирующей струе. Впервые показана возможность диагностики существенно трёхмерных свободно-сдвиговых течений (турбулентных струй с высокой степенью закрутки) с помощью метода Томо-PIV. Сопоставление с результатами измерений методом Stereo-PIV позволяет сделать вывод о приемлемой погрешности измерений. Совместное применение метода Stereo-PIV и хемилюминесценции радикала  $\text{CH}^*$  при диагностике пропановоздушных закрученных пламён дало возможность проанализировать основные особенности закрученной реагирующей струи по сравнению с изотермической: более сильное расширение реагирующей струи, большая скорость возвратного течения, а также увеличение скорости при прохождении зоны горения вследствие расширения газа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kaaling H., Ryden R., Bouchie Y. et al.** RQL combustor development including design, CFD calculations, CARS measurements and combustion tests // Proc. of the 13th Intern. Symp. on Air Breathing Engines (ISABE). Chattanooga, USA, 1997. [CD-ROM. 97-70697].
2. **Kampmann S., Seeger T., Leipertz A.** Simultaneous coherent anti-Stokes Raman scattering and two-dimensional laser Rayleigh thermometry in a contained technical swirl combustor // Appl. Opt. 1995. **34**, Is. 15. P. 2780–2786.
3. **Dinkelacker F., Soika A., Most D. et al.** Structure of locally quenched highly turbulent lean premixed flames // Proc. Combust. Inst. 1998. **27**, Is. 1. P. 857–865.
4. **Fink R., Hupfer A., Rist D.** Non-intrusive measurements of a LPP combustor under elevated pressure conditions // Proc. ASME Turbo Expo 2002. [CD-ROM. GT-2002-30078].
5. **Cooper C. S., Laurendeau N. M.** Comparison of laser-induced and planar laser-induced fluorescence measurements of nitric oxide in a high-pressure, swirl-stabilized, spray flame // Appl. Phys. B. 2000. **70**, N 6. P. 903–910.
6. **Cooper C. S., Laurendeau N. M.** Quantitative measurements of nitric oxide in high-pressure (2–5 atm), swirl-stabilized spray flames via laser-induced fluorescence // Combust. Flame. 2000. **123**, Is. 1–2. P. 175–188.
7. **Shih W.-P., Lee J. G., Santavicca D. A.** Stability and emissions characteristics of a lean premixed gas turbine combustor // Proc. Combust. Inst. 1996. **26**, Is. 2. P. 2771–2778.
8. **Deguchi Y., Noda M., Fukuda Y. et al.** Industrial applications of temperature and species concentration monitoring using laser diagnostics // Meas. Sci. Technol. 2002. **13**, Is. 10. P. R103–R115.
9. **Hedman P. O., Warren D. L.** Turbulent velocity and temperature measurements from a gas-fueled technology combustor with a practical fuel injector // Combust. Flame. 1995. **100**, Is. 1–2. P. 185–192.
10. **Lee S.-Y., Seo S., Broda J. C. et al.** An experimental estimation of mean reaction rate and flame structure during combustion instability in a lean premixed gas turbine combustor // Proc. Combust. Inst. 2000. **28**, Is. 1. P. 775–782.
11. **Arnold A., Bombach R., Hubschmid W., Käppeli B.** Optical diagnostics in gas turbine burners // ERCOFTAC. 1998. Bull. 38. P. 10–19.
12. **Fritz J., Kröner M., Sattelmayer Th.** Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone // Proc. ASME Turbo Expo 2001. [CD-ROM. 2001-GT-0054].
13. **Löfström C., Engstöm J., Richter M. et al.** Feasibility studies and application of laser/optical diagnostics for characterization of a practical low-emission gas turbine combustor // Proc. ASME Turbo Expo 2000. [CD-ROM. 2000-GT-0124].

14. **Gittins C. M., Shenoy S. U., Aldag H. R. et al.** Measurements of major species in a high pressure gas turbine combustion simulator using Raman scattering // Proc. of the 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno, USA, 2000. [CD-ROM. AIAA 2000-0772].
15. **Meier U. E., Wolff-Gaßmann D., Heinze J. et al.** LIF imaging of species and temperature in technical combustion at elevated pressures // Proc. of the 18th Intern. Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF 99). Toulouse, France, 1999. P. 7.1–7.7.
16. **Meier U. E., Wolff-Gaßmann D., Stricker W.** LIF imaging and 2D temperature mapping in a model combustor at elevated pressure // Aerospace Sci. Technol. 2000. **4**, Is. 6. P. 403–414.
17. **Carl M., Behrendt T., Fleing C. et al.** Experimental and numerical investigation of a planar combustor sector at realistic operating conditions // ASME Journ. Eng. Gas Turbines Power. 2001. **123**, N 4. P. 810–816.
18. **Kunz O., Noll B., Lückcrath R. et al.** Computational combustion simulation for an aircraft model combustor // Proc. of the 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibition. Salt Lake City, USA, 2001. [CD-ROM. AIAA 2001-3706].
19. **Halter F., Chauveau C., Gokalp I.** Investigation of the flamelet inner structure of turbulent premixed flames // Combust. Sci. Technol. 2008. **180**, Is. 4. P. 713–728.
20. **Cheng R. K., Littlejohn D., Strakey P. A., Sidwell T.** Laboratory investigations of a low-swirl injector with H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at gas turbine conditions // Proc. Combust. Inst. 2009. **32**, N 2. P. 3001–3009.
21. **Boxx I., Stöhr M., Carter C., Meier W.** Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor // Combust. Flame. 2010. **157**, N 4. P. 1510–1525.
22. **Stella A., Guj G., Kompenhans J. et al.** Application of particle image velocimetry to combusting flows: design considerations and uncertainty assessment // Exp. Fluids. 2001. **30**, N 2. P. 167–180.
23. **Маркович Д. М., Токарев М. П.** Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV // Вычис. методы и программир. 2008. **9**. С. 311–326.
24. **Дулин В. М., Козорезов Ю. С., Маркович Д. М., Токарев М. П.** Исследование газодинамической структуры потока в закрученном турбулентном пламени методом цифровой трассерной визуализации // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2009. **4**, вып. 3. С. 30–42.
25. **Alekseenko S. V., Dulin V. M., Kozorezov Yu. S., Markovich D. M.** Effect of axisymmetric forcing on structure of a swirling turbulent jet // Intern. Journ. Heat and Fluid Flow. 2008. **29**. P. 1699–1715.
26. **Cala C. E., Fernandes E. C., Heitor M. V., Shtork S. I.** Coherent structures in unsteady swirling jet flow // Exp. Fluids. 2006. **40**, N 2. P. 267–276.
27. **Dulin V. M., Kozorezov Yu. S., Markovich D. M., Tokarev M. P.** Determination of coherent structures in forced swirling jets and flames via PIV and POD // Proc. of the Ninth Intern. Symp. on Particle Image Velocimetry. Kobe, Japan, 21–23 July, 2011. [CD-ROM].
28. **Бильский А. В., Ложкин В. А., Маркович Д. М. и др.** Оптимизация и тестирование томографического метода измерения скорости в объеме потока // Теплофизика и аэромеханика. 2011. **18**, № 4. С. 1–12.