



УДК 536.46

А.С. Лобасов^{1,2}, Д.К. Шараборин^{1,2}, В.М. Дулин^{1,2}, Д.М. Маркович^{1,2}, К. Ханъялич²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090,
Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, E-mail: alexey.lobasov@gmail.com

² Новосибирский государственный университет, Россия, 630090,
Новосибирск, Пирогова ул., 2.

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ ПАНОРАМНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

АННОТАЦИЯ

Проведены измерения распределения температуры методом рассеяния Рэлея (РР) и методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) радикала OH^* . Возбуждение радикал OH^* происходило на линии ($v'=1 \leftarrow v''=0$) электронного перехода $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$, на длине волны 283.55 нм. Измерение температуры осуществлялось в закрученном пропано-воздушном пламени организованном вихревым форсуночно-горелочным устройством. Проведено сравнение полей температуры измеренных методом РР и методом ПЛИФ с предположением о локальной равновесности радикалов OH^* . Для определения относительной концентрации основных компонент газовой смеси продуктов сгорания топлива использовались данные полученные в результате анализа спектров спонтанного комбинационного рассеяния (СКР). Методом СКР были проведены измерения локальной концентрации в нескольких точках пламени над горелкой, на высоте до 35 мм по оси и краю горелки.

ГОРЕНИЕ, ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, ПЛОСКОСТНАЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ, ПАНОРАМНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Закрученные пламена нашли широкое применение в промышленности и энергетике. Данный факт обусловлен тем, что закрученные реагирующие течения в широком диапазоне режимов обеспечивают хорошую стабилизацию пламени и поджига, а так же с помощью закрученных пламен возможно организовать в достаточно компактных объемах эффективное сжигание топлива [1 – 3]. В настоящее время стандартным инструментом для измерений в изотермических течениях [4], а часто и в потоках с горением [5], является метод анемометрии по изображениям частиц (PIV). Преимуществом данного метода является то, что он позволяет без существенного влияния на поток проводить измерения мгновенных полей скорости. Однако, для реагирующих течений информации только о скорости потока недостаточно в связи с тем, что, проходя фронт пламени, параметры потока претерпевают скачкообразное изменение. Для более полного описания процессов происходящих в пламени необходимо обладать информацией о распределении плотности, давления и скорости в комплексе.

На настоящий момент существуют различные оптические методы измерения полей температуры и концентрации в пламенах [6]. Панорамная регистрация РР позволяет оценивать значения плотности в исследуемой плоскости потока, однако регистрация сигнала

рассеянного излучения происходит на длине волны возбуждающего лазерного излучения, что делает практически невозможным комбинацию метода РР с РІV измерениями. Важно отметить, что метод ПЛИФ (в отличие от РР) позволяет проводить одновременные измерения полей мгновенной температуры и скорости газа в сочетании с методом РІV, так как длина волны принимаемого излучения отличается от длины волны возбуждаемого излучения или лазера РІV системы.

Существует несколько различных подходов определения температуры из распределения сигнала флуоресценции. Один из основных подходов основан на определении температуры из соотношения заселенности двух различных начальных уровней молекулы. Определение отношения заселенностей проводится путем сравнения сигнала флуоресценции для двух переходов в одно и то же возбуждаемое состояние [7]. Таким образом, зависимость отношения сигналов практически не зависит от пространственного распределения интенсивности зондирующего лазерного излучения, неравномерной концентрации ОН и степени тушения. Преимущество данного подхода заключается в том, что его единственным требованием является тепловое равновесие для внутренних степеней свободы молекулы. Недостатком является то, что эти два молекулярных перехода необходимо исследовать одновременно. Следовательно, ПЛИФ на двух переходах является затратным в случае нестационарных и турбулентных пламен, так как необходимо использовать два отдельных лазера. Другой подход основан на предположении локального равновесия ОН* и паров воды в области измерений. Локальная температура продуктов горения в этом случае может быть оценена исходя из температурной зависимости концентрации ОН* [8].

Целью настоящей работы являлся анализ применимости метода ПЛИФ в предположении локальной равновесности радикала ОН*, для измерения поля температуры в закрученном пропано-воздушном пламени организованном вихревым форсуночно-горелочным устройством.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Третья гармоника (355 нм) импульсного Nd:YAG лазера (Quanta-Ray, 1000 мДж в импульсе, длительность 10 нс) использовалась в качестве зондирующего излучения в экспериментах по регистрации СКР и РР. Во время проведения ПЛИФ измерений, это лазер применялся для накачки перестраиваемого лазера на красителях (Sirah, 220 – 300 нм после удвоения, до 50 мДж). В качестве красителя использовался Родамин 6Ж. Средняя энергия лазерных импульсов составляла 600 мДж и 5 мДж соответственно, со среднеквадратичным отклонением менее 5%. В экспериментах по регистрации РР и ПЛИФ лазерный луч разворачивался в коллимированный нож, размером до 50 мм в вертикальном направлении и толщиной менее 0,8 мм, а в случае СКР луч фокусировался в пучок диаметром менее 0,8 мм. Нож проходил через ось симметрии горелочного устройства.

Для регистрации сигнала РР и флуоресценции радикала ОН* применялась система, состоящая из оптоэлектронного преобразователя (ОЭП) с мультисканальным усилителем, сопряженного с гибридной ПЗС-КМОП (sCMOS) камерой (2560×2160 пикселей, 16 бит). ОЭП был расположен между ПЗС-КМОП камерой и кварцевым объективом (100 мм, f# 2.8). Фотокатод оптоэлектронного преобразователя (S20 multialkali) имеет квантовую эффективность около 25% в исследуемом диапазоне длин волн (280 – 360 нм). Для регистрации сигнала СКР использовалась интенсифицированная ПЗС камера PCO DICAM Pro (12 бит) на основе аналогичного ОЭП с квантовой эффективностью около 20% в исследуемой области длин волн (320 – 380 нм). Камера подключалась к спектрографу, построенному по схеме Черни-Тернера (Newport MS127i 1/8 м, 1200лин./мм). Время экспозиции каждого кадра составляло 30 нс в случае регистрации сигнала РР/СКР и 200 нс в случае регистрации сигнала флуоресценции. Для повышения соотношения сигнал-шум, сигнал РР и СКР регистрировался для двух перпендикулярных поляризаций излучения Nd:YAG лазера, для поворота поляризации применялась полуволновая пластина. Так же при

регистрации сигнала флуоресценции, использовался полосно-пропускающий оптический фильтр (305 – 320 нм). На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

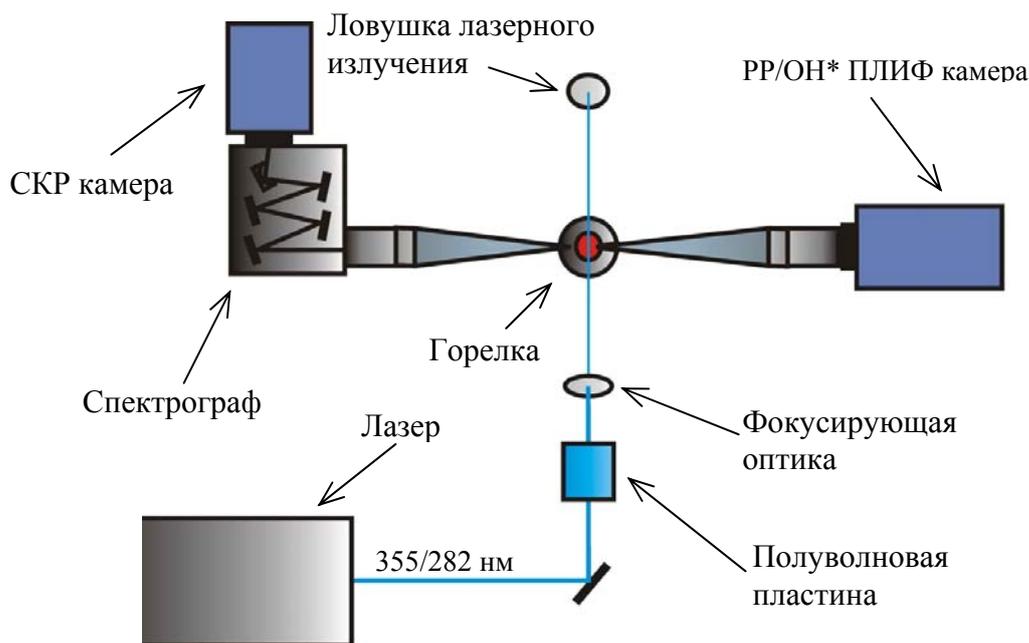


Рис. 1. Схема измерительной системы, позволяющей проводить измерения методами СКР, РР и ОН* ПЛИФ

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как отмечалось выше, регистрация сигнала РР происходит на длине волны возбуждающего лазерного излучения. Следовательно, на изображении, помимо фона и теплового сигнала матрицы камеры, присутствуют переотражения лазерного излучения и сигнал рассеяния Ми на частицах пыли содержащихся в окружающем воздухе. На рис. 2 представлена фотография пламени за вихревым горелочным устройством и приведен пример исходного мгновенного изображения РР.

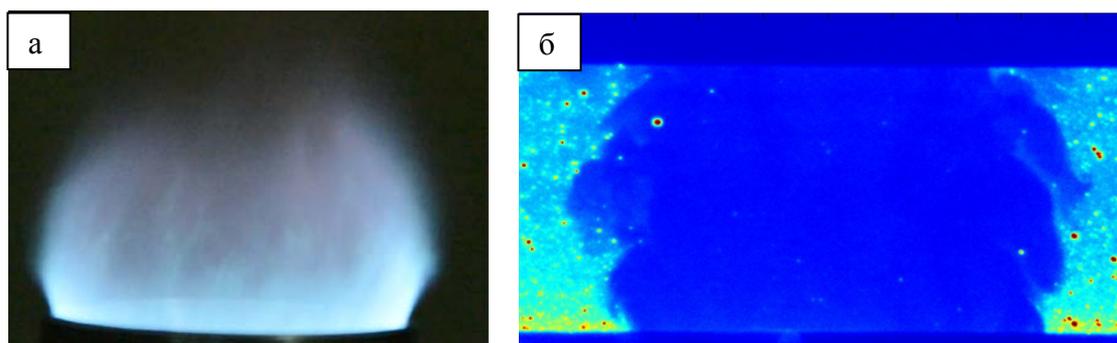


Рис. 2. Фотография пламени за вихревым горелочным устройством (а) и пример мгновенного исходного изображения РР (б)

Интенсивность сигнала РР зависит от плотности газа в исследуемом объеме и концентрации основных компонент газовой смеси. Для определения относительной концентрации основных компонент газовой смеси продуктов сгорания топлива использовались данные полученные в результате анализа спектров СКР. Методом СКР были проведены измерения локальной концентрации в нескольких точках пламени над горелкой, на высоте до 35 мм по оси и краю горелки.

Спектры СКР регистрировались для двух перпендикулярных поляризаций лазерного излучения (вертикальной и горизонтальной). Изображения, полученные для горизонтальной

поляризации, вычитались из изображений с вертикальной поляризацией, что позволило почти полностью устранить влияние: паразитных засветок, фона, а также возможной флуоресценции. Во время регистрации спектральной картины СКР использовался оптический полосно-заграждающий фильтр, который так же позволил уменьшить негативное влияние бликов, фона и РР на СКР сигнал и, тем самым, существенно увеличить динамический диапазон измерительной системы. На рис. 3 представлены спектры СКР на краю и на оси вблизи среза горелочного устройства.

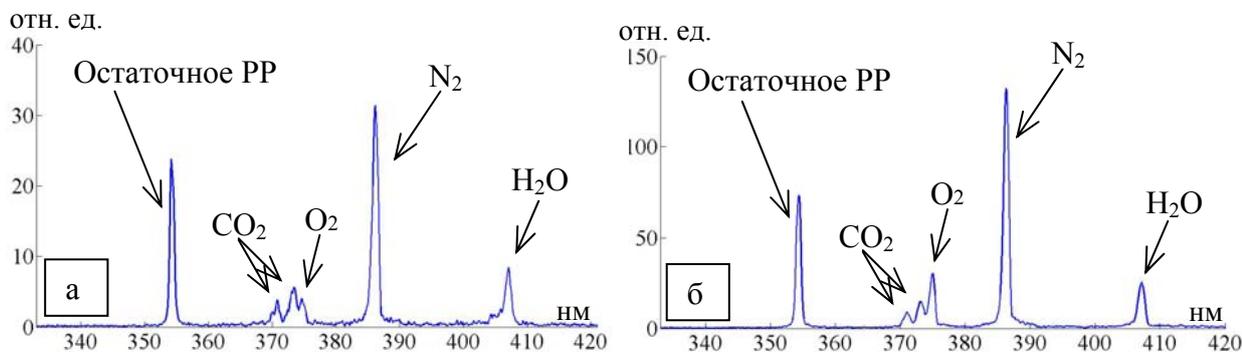


Рис. 3. Пример спектры СКР на краю (а) и на оси (б) вблизи среза горелочного устройства.

Измерения РР также как и СКР выполнены для двух перпендикулярных поляризаций лазерного излучения. При обработке изображений распределения сигнала РР применялся пороговый фильтр, для уменьшения влияния сигнала рассеяния Ми на частицах пыли (рис. 4). Измерение рассеянного излучения происходило в двух областях (в воздухе и в пламени). При этом воздух выступал в роли контрольного объема (его температура измерялась). На рис. 5, а показано поле средней температуры (осредненное по 200 мгновненным полям) в центральном сечении пламени (вертикальное сечение, проходящее через ось симметрии геометрии горелочного устройства) измеренное методом РР.

После определения поля средней температуры за вихревым горелочным устройством методом РР было проведено исследование возможности измерения полей температуры методом ЛИФ ОН*. Возбуждение ОН* осуществлялось на линии перехода $Q_1(8) (\nu'=1 \leftarrow \nu''=0, A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi)$, интенсивность флуоресценции на которой, главным образом, зависит от локальной концентрации ОН*.

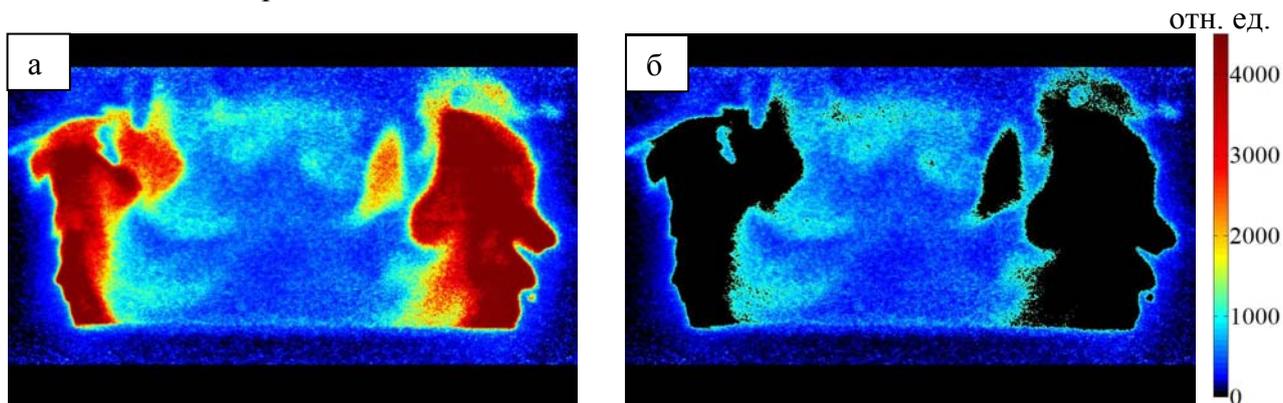


Рис. 4. Мгновенное распределение относительной концентрации радикала ОН* в центральном сечении потока до (а) и после (б) применения порогового фильтра

На рис. 4, а показано мгновенное распределение относительной концентрации радикала ОН* в центральном сечении потока. Можно видеть, что максимальная флуоресценция имеет место в области фронта пламени (для радиальной координаты ≈ 30 мм), где условие равновесности не выполняется. В ядре потока, считается, что сигнал ЛИФ обусловлен концентрацией ОН* в равновесных условиях, что может быть использовано для определения локальной температуры в этой области.

Используя программный код Cantera и исходя из значений температуры и распределения концентрации компонент газовой смеси (определены методом СКР, аналогичным описанному в [9]), была рассчитана температурная зависимость газа от относительной концентрации радикала OH^* . В областях с высокой концентрацией радикала OH^* , где происходит процесс горения и условие локального равновесия неприменимо, применялся пороговый фильтр, и данная область в расчете температуры не учитывалась. На рис. 4, б показано мгновенное поле распределения относительной концентрации радикала OH^* после применения порогового фильтра. Используя температурную зависимость концентраций радикала OH^* и паров воды, были оценены поля мгновенной температуры по данным после применения фильтра. Из мгновенных полей, было рассчитано среднее поле температуры. На рис. 5 представлено сравнение средних полей температуры продуктов горения пропано-воздушного пламени, измеренных методом РР и методом OH^* ЛИФ.

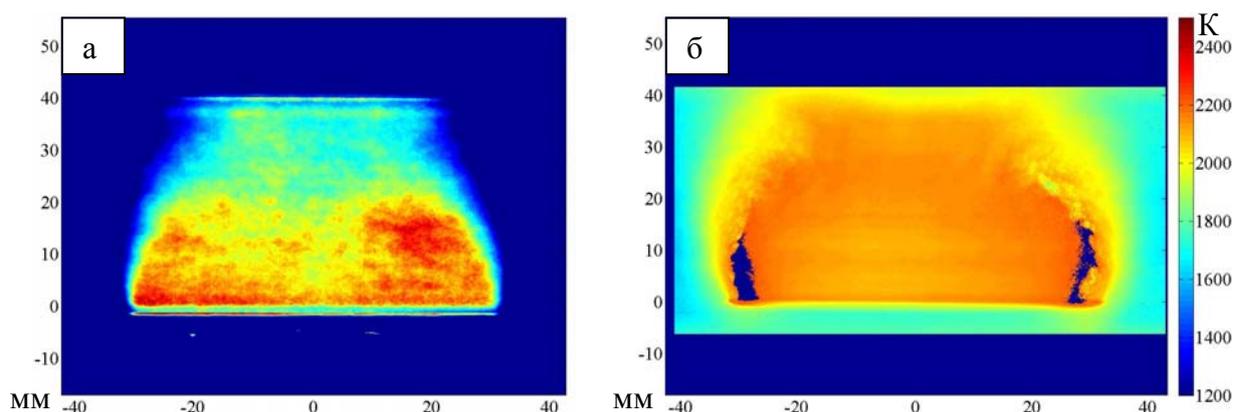


Рис. 5. Поля средней температуры в центральном сечении закрученного пламени
(а) – измерение методом РР, (б) – измерение методом OH^* ЛИФ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено измерение локальной относительной концентрации основных компонент газовой смеси продуктов сгорания в пропано-воздушном пламени в нескольких точках над горелочным устройством методом СКР. С учетом результирующего сечения рассеяния Релея, оцененного из полученной информации о концентрации, было измерено поле плотности газа, по которому оценена его температура. Используя метод ПЛИФ и условие локального равновесия концентрации радикала OH^* , была проведена оценка поля температуры. Сравнение полей средней температуры измеренных методом РР и методом ПЛИФ показало, что метод ПЛИФ в предположении локального равновесия радикала OH^* не применим для измерения температуры в открытом закрученном стехиометрическом пропано-воздушном пламени. Проведенные ранее PIV измерения показали сложную гидродинамическую структуру потока. На приосевой области поля скорости характерно наличие возвратного течения, которое сформировано из закрученного потока, истекающего вдоль внутренних стенок горелочного устройства, а также вовлекаемого внешнего воздуха. Следовательно, в результирующем сигнале флуоресценции сложно разделить влияние OH^* образованного в результате термической диссоциации паров воды и образованных в процессе горения углеводородного топлива. Таким образом, условие локального равновесия не выполняется в исследуемой области.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 14-08-01233 А).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПЛИФ – плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция;
РР – Рассеяние Релея;

СКР – Спонтанное комбинационное рассеяние;
отн. ед. – относительные единицы;
 ν – квантовое вращательное число;
 $A^2\Sigma^+$ – первое возбужденное электронное состояние;
 $X^2\Pi$ – основное электронное состояние;
PIV – метод анемометрии по изображениям частиц;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gupta A., Lilley D., Syred N.** Swirl Flows, Abacus Press, Kent, 1984.
2. **Syred N., Beér J.** Combustion in swirling flows: A re-view, *Combustion and Flame* 23 (1974) 143–210.
3. **Weber R., Dugué J.** Combustion accelerated swirling flows in high confinements, *Progress in Energy and Com-bustion Science* 18 (1992) 349–367.
4. **Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J.** Particle Image Velocimetry, Springer, Berlin Heidelberg, New York. (1998).
5. **Stella A., Guj G., Kompenhans J., Raffel M., Richard H.** Application of particle image velocimetry to combusting flows: design considerations and uncertainty assessment // *Exp. Fluids*, 30, (No. 2), pp. 167-180 *Experiments in Fluids*. (2000).
6. **Hassel E., Linow S.** Laser diagnostics for studies of turbulent combustion// *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000) R37–R57.
7. **Devillers R., Bruneaux G., and Schulz C.** Development of a two-line OH-laser-induced fluorescence thermometry diagnostics strategy for gas-phase temperature measurements in engines // *Appl. Opt.* 47 (2008) 5871-5885.
8. **Heinze J., Meier U., Behrendt T., Willert C., Geigle K., Lammel O., Lückcrath R.** PLIF thermometry based on measurements of absolute concentrations of the OH radical // *Z. Phys. Chem.* Vol. 225:1315-1341. 2011.
9. **Rabenstein F. and Leipertz A.**, One-dimensional, time-resolved Raman measurements in a sooting flame made with 355-nm excitation // *APPLIED OPTICS*. Vol. 37, No. 21.1998.

A.S. Lobasov^{1,2}, D.K. Sharaborin^{1,2}, V.M. Dulin^{1,2}, D.M. Markovich^{1,2}, K. Hanjalić²

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics, Russia, 630090,
Novosibirsk, Ak. Lavrentyev Avenue, 1, E-mail: alexey.lobasov@gmail.com*

² *Novosibirsk State University, Russia, 630090,
Novosibirsk, Pirogova Street, 2.*

TEMPERATURE MEASUREMENTS IN FLAME BY PLANAR OPTICAL TECHNIQUES

The present work is focused on the measurements of temperature in the swirling propane-air burner by using OH-PLIF and planar Rayleigh scattering (based on data from Raman scattering) techniques. OH radicals was excited in the ($\nu' = 1 \leftarrow \nu'' = 0$) band of the A-X electronic system at wavelength 283.55 nm and spectrally resolved detected in the (0,0) and (1,1) vibrational bands around 305 - 320 nm.*

COMBUSTION, LASER DIAGNOSTICS, PLANAR LASER-INDUCED FLUORESCENCE, PLANAR THERMOMETRY.