

УДК 536.46

А.С. Лобасов^{1,2}, Л.М. Чикишев^{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.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЛАМИНАРНОМ ПЛАМЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ МЕТОДОМ ПЛОСКОСТНОЙ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ОН*

АННОТАЦИЯ

Важной составляющей в понимании процессов горения является информация о распределении концентрации различных радикалов, а так же данные о поле температуры. В данной работе для измерения распределения температуры, был использован метод панорамной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) радикала ОН*. Объектом исследования являлось осесимметричное пропано-воздушное ламинарное предварительно перемешанное пламя при атмосферном давлении. Коэффициент избытка топлива φ варьировался в пределах от 0,9 до 1,2. С шагом в 5 пм было проведено экспериментальное измерение спектра возбуждения радикалов ОН в диапазоне 28 – 284 нм. Проведено сравнение полученного спектра, со спектром возбуждения, рассчитанным в программе LifBase. Для визуализации фронта пламени возбуждение радикалов ОН в продольной плоскости осуществлялось для линии $v'=1 \leftarrow v''=0$ электронного перехода $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$, на длине волны 283,55 нм. Регистрация сигнала флуоресценции от (0, 0) и (1, 1) колебательных линий осуществлялась в диапазоне 305 – 320 нм. Измерение поля температуры выполнено при возбуждении двух переходов ОН*.

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

введение

В настоящее время методы панорамной лазерной диагностики являются стандартными инструментами для диагностики гидро-аэромеханики турбулентных течений и потоков с горением. Использование этих методов позволяет проводить точные измерения скорости, концентраций и температуры с высоким пространственным и временным разрешением, не оказывая существенного влияния на объект исследования. Измерение полей температуры и концентрации радикалов (таких как ОН, СН, и NO) в пламени важно для более глубокого понимания нестационарных и неравновесных процессов при турбулентном горении. Эти данные необходимы для валидации теоретических и численных моделей горения, а также для решения прикладных задач оптимизации работы горелочных устройств.

Лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ) радикалов ОН является общепризнанным инструментом и широко используется для определения положения фронта пламени, количественного анализа локальной температуры и скорости тепловыделения [1,

2]. В рамках данной работы демонстрируются возможности метода для визуализации распределения радикалов ОН, а так же измерения температуры в пламени. Количественная интерпретация ЛИФ сигнала представляет определенные трудности вследствие множества факторов, определяющих его интенсивность. Помимо вероятности переходов и тушения линий, спектр флуоресценции во времени определяется столкновительными процессами и зависит от скорости приближения системы молекул к термическому равновесию (различной для разных возбужденных состояний). Этот процесс существенно зависит от локальной температуры, давления и состава газа. Локальные значения температуры возможно оценить по отношению интенсивностей ПЛИФ при возбуждении молекул на двух различных линиях перехода. Так в работе [3] были измерены значения интенсивности пульсаций температуры в модельной камере сгорания ГТУ в зависимости от фазы периодических пульсаций давления. Однако вследствие сильной зависимости ЛИФ сигнала от давления, температуры и локального состава смеси точность таких измерений находится под вопросом и подразумевает верификацию. С этой целью подобные измерения проводятся одновременно с численным моделированием современными расчетными кодами (LifSim, LifBase, LASKIN) [4].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Объект исследования

В данной работе представлены результаты анализа сигнала ПЛИФ ОН* в центральном сечении конусообразного ламинарного пламени пропано-воздушной предварительно перемешанной смеси. Пламя Бунзеновской горелки было организованно соплом с выходным диаметром 15 мм (профилированное сужающееся сопло использовалось для создания равномерного профиля скорости на выходе из сопла). Коэффициент избытка топлива ф предварительно перемешанной смеси пропан-воздух варьировался в пределах от 0,9 до 1,2 (среднерасходная скорость смеси – 1,7 м/с). Радикал ОН* в пламени возбуждался в (1–0) колебательной линии $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ электронного перехода. Сигнал флуоресценции регистрировался в спектральном диапазоне 305 – 320 нм.

Описание экспериментальной установки

Накачка перестраиваемого лазера на красителях (Sirah) осуществлялась второй гармоникой (532 нм) твердотельного импульсного Nd:YAG лазера (Quanta-Ray, 1000 мДж в импульсе, длительность 10 нс). В качестве красителя использовался Rhodamine 6 G. Лазерный луч проходил через делитель пучка, который отражал небольшую часть лазерного излучения в измеритель мощности. Остальное излучение направлялось в коллимирующую оптику. После удвоения энергия лазерного излучения (282 – 284 нм) составляла 5 мДж, со среднеквадратичным отклонением менее 5 %. После прохождения коллимирующей оптики лазерный луч разворачивался в нож, размером до 50 мм в вертикальном направлении и толщиной менее 0,8 мм. Лазерный нож проходил через ось симметрии горелочного устройства, возбуждая флуоресценцию молекул в области измерения.

Для регистрации флуоресценции радикала OH* применялась система, состоящая из оптоэлектронного преобразователя (OЭП) с мультиканальным усилителем, сопряженного с гибридной ПЗС-КМОП (sCMOS) камерой (2560×2160 пикселей, 16 бит). Система регистрации оснащалась кварцевым объективом (100 mm, f# 2.8). Фотокатод оптоэлектронного преобразователя (S20 multialkali) имеет квантовую эффективность около 25 % в исследуемом диапазоне длин волн (300 – 320 нм). Экспозиция каждого кадра составляла 200 нс. При регистрации сигнала флуоресценции, использовался полоснопропускающий оптический фильтр (305 – 320 нм). Применение оптического фильтра позволяет избавиться от нежелательного фона вследствие рассеяния лазерного излучения и

переотражений от горелочного устройства. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки и приведен пример мгновенного регистрируемого изображения флуоресценции радикала OH*.



Рис. 1. Схема установки для регистрации флуоресценции радикала OH*(a) и пример регистрируемого изображения (б)

Калибровка перестраиваемого лазера на красителе

Лазер на красителе имеет некоторый сдвиг длины волны относительно задаваемой. Следовательно, для возбуждения соответствующего перехода необходимо проводить предварительную калибровку перестраиваемого лазера. С этой целью сканировался спектр возбуждения флуоресценции радикала ОН*. Длины волн возбуждения варьировались в диапазоне 282 – 284 нм с шагом 5 пм. Проводилось осреднение по 10 изображениям для каждой измеренной линии перехода ОН*. Интенсивность расчётного и экспериментального спектра возбуждения нормировалась по пику, имеющему максимальную интенсивность. На рис. 2 представлено сравнение фрагмента полученного спектра возбуждения флуоресценции радикала ОН* и фрагмента спектра смоделированного с помощью программы LifBase [5].



Рис. 2. Сравнение экспериментального и расчетного спектра возбуждения флуоресценции радикала ОН*

Расположение пиков и их относительная интенсивность на этих спектрах позволяют сопоставить и идентифицировать отдельные переходы. Было установлено, что смещение длины волны лазерного излучения составляет 29 пм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуализация радикала ОН

Интенсивность сигнала флуоресценции (в отсутствие насыщения, при низкой плотности энергии лазерного излучения) зависит от концентрации возбуждаемых молекул, температуры окружающей среды, скорости тушения флуоресценции и т.д. С целью визуализации OH*, осуществлялось возбуждение перехода $Q_1(8)$ ($v'=1 \leftarrow v''=0$, $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$), который имеет слабую зависимость от температуры [5].

На рис. 3 представлен сигнал флуоресценции радикала ОН*. Лазерный нож проходит через ось симметрии горелочного устройства и пламени. Центр выходного отверстия сопла соответствует началу координат. Визуализация распределения радикалов ОН* проводилась в предварительно перемешанном ламинарном пламени с различным соотношением топливоокислитель. Осреднение проводилось по 500 изображениям. Для богатой топливновоздушной смеси флуоресценция радикала ОН* достигает максимума в зоне смешения окружающего воздуха с продуктами горения, где происходит догорание несгоревших углеводородов. В случае бедной топливно-воздушной смеси, наибольшая интенсивность флуоресценции ОН* имеет место в продуктах горения за фронтом пламени.



Рис. 3. Осредненная по времени флуоресценция радикала OH* в центральном (вертикальном) сечение фронта пламени. а – бедная топливно-воздушная смесь (φ = 0.9), б – стехиометрическая топливно-воздушная смесь (φ = 1), в – богатая топливно-воздушная смесь (φ = 1.2)

Измерение температуры

Были проведены измерения полей температуры, основанные на анализе ПЛИФ сигнала при последовательном возбуждении двух различных переходов. Метод 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. Таким образом, зависимость отношения сигналов практически не зависит от пространственного распределения интенсивности зондирующего лазерного излучения, неравномерной концентрации OH и степени тушения. Связь между отношением интенсивностей сигналов флуоресценции (S_1 и S_2) и вращательной температурой (T) представлена в выражении (1):

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{B_1 I_1 (2J_1 + 1)}{B_2 I_2 (2J_2 + 1)} \exp(-\frac{E_1 - E_2}{kT}) .$$
(1)

где, J_1 и J_2 – вращательное квантовое число переходов 1 и 2, соответственно, E_1 и E_2 – уровни энергии начальных состояний, B_1 и B_2 – коэффициенты Эйнштейна, а I_1 и I_2 – это энергии импульсов лазерного излучения.



Рис. 4. Среднее поле температуры, измеренное методом two-line OH* ПЛИФ. Вне области, обозначенной пунктирной линей, измерения не достоверны

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. В данном случае конусообразный фронт пламени был ламинарным, и его положение не менялось во времени. Поэтому заселенность различных молекулярных уровней считалась постоянной во времени, что позволило использовать только один лазер для измерения полей температуры методом ПЛИФ.

Следует отметить, что для двух переходов в одно и то же возбужденное состояние максимальная температура, измеряемая с достаточной точностью, ограничена [6]. необходимую Следовательно, выбираются такие пары линий, которые имеют чувствительность в измеряемом диапазоне температур, при этом возбуждение происходит в одно колебательное и электронное состояние, но разные вращательные [6 - 8]. В качестве переходов для определения температуры методом ПЛИФ была выбрана пара линий R₁(14) и $P_1(2)$ (v'=1 ← v''=0, $A^2\Sigma^+$ ← $X^2\Pi$). На рис. 4 показано среднее поле температуры, измеренное с использованием этих переходов для пропано-воздушного стехиометрического пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования, основанные на методе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции радикалов ОН*. Экспериментально измерен спектр возбуждения радикалов ОН*, с шагом в 5 пм, в диапазоне длин волн 282 – 284 нм. Проведено моделирование спектра возбуждения в этом диапазоне с помощью программы LifBase. Сравнение рассчитанного и экспериментально измеренного спектра возбуждения флуоресценции позволило определить и учесть смещение длины волны излучения лазера на красителе относительно установленной.

Показано применение метода ПЛИФ для визуализации радикала ОН* в пропановоздушном пламени с различным соотношением топливо-окислитель. Из представленных материалов видно, что для богатой топливно-воздушной смеси интенсивность сигнала флуоресценции радикала ОН* достигает максимума в зоне смешения окружающего воздуха с продуктами горения, где происходит догорание несгоревших углеводородов. В случае бедной топливно-воздушной смеси, наибольшая интенсивность флуоресценции ОН* имеет место в продуктах горения за фронтом пламени. При измерении температуры методом twoline OH* ПЛИФ была выбрана пара линий $R_1(14)$ и $P_1(2)$ ($v'=1 \leftarrow v''=0$, $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$) имеющих достаточную температурную чувствительность в диапазоне температур горения стехиометрического пропано-воздушного пламени. Представлено экспериментально измеренное среднее поле температуры ламинарного пропано-воздушного пламени.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 15-38-21003).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПЛИФ – плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция;

ф – коэффициент избытка топлива;

отн. ед. – относительные единицы;

v – квантовое вращательное число;

 $A^2\Sigma^+$ – первое возбужденное электронное состояние;

 $X^2\Pi$ – основное электронное состояние;

k – константа Больцмана;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eckbreth A. C., Laser Diagnostic for Combustion Temperature and Species (Gordon and Breach, Netherlands 1996)

2. Koshe-Hoinghaus K., Jeffries (Eds.) J., Applied Combustion Diagnostics (Taylor & Francis, New York 2002)

3. Giezendanner-Thoben R., Meier U., Meier W., Heinze J., Aigner M., (2005) Phase -locked two -line OH planar laser-induced fluorescence thermometry in a pulsating gas turbine model combustor at atmospheric pressure // Appl. Optics 44: 6565-6577

4. Day M., Tachibana S., Bell J., Lijewski M., Beckner V., Cheng R. K., (2012) A combined computational and experimental characterization of lean premixed turbulent low swirl laboratory flames I. Methane flames // Combust. Flame, 159: 275–290

5. Luque J., Crosley D. R., Lifbase: Database and spectral simulation (version 1.5). SRI International Report, (MP 99-009), 1999

6. Seitzman J. M., Hanson R. K., DeBarber P. A., and Hess C. F. Application of quantitative two-line OH planar laser-induced fluorescence for temporally resolved planar thermometry in reacting flows // Appl. Opt. 33, 4000–4012 (1994).

7. A. Cessou, U. Meier, and D. Stepowski, Application of planar laser induced fluorescence in turbulent reacting flows // Meas. Sci. Technol. 11, 887–901 (2000).

8. **R. Devillers, G. Bruneaux, and C. Schulz**, 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.

A.S. Lobasov^{1,2}, L.M. Chikishev^{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.

QUANTITATIVE MEASUREMENT IN THE LAMINAR PREMIXED FLAME BY PLANAR LASER-INDUCED FLUORESCENCE OF OH*

Planar laser-induced fluorescence (PLIF) is used to measure spatial distributions of the instantaneous temperature field, and to detect the flame front position. The aim of the present study is the experimental investigation of temperature distribution and flame front location in a laminar propane-air premixed flame at atmospheric pressure using OH* PLIF. The equivalence ratio of the laminar premixed propane/air mixture was changed in the range from 0.9 to 1.2 during measurement (the bulk velocity of the mixture was 1.7 m/s). OH radicals was excited in the $v' = 1 \leftarrow v'' = 0$ 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.