УДК 536.461

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАДИКАЛА *OH* В ЛАМИНАРНОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОМ ПЛАМЕНИ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕХИОМЕТРИЕЙ МЕТОДОМ ПЛОСКОСТНОЙ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Лобасов А.С., Чикишев Л.М., Дулин В.М.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00203)

АННОТАЦИЯ

Важной составляющей в понимании процессов горения является информация о распределении концентрации различных радикалов. Лазерно-индуцированная флуоресценция радикалов OH является известным и признанным инструментом для измерения распределения концентрации, определения температуры и положения фронта пламени. Объектом исследования являлось модельное пропано-воздушное ламинарное предварительно перемешанное пламя при атмосферном давлении. С шагом в 5 пм было проведено экспериментальное измерение спектра возбуждения радикалов OH в диапазоне 283-284 нм. Проведено сравнение полученного спектра, со спектром возбуждения, рассчитанным в программе LifBase. Для визуализации пламени, происходило возбуждение радикалов OH в $v''=0 \rightarrow v'=1$ колебательный переход A-X электронного перехода, на длине волны 283,55 нм, а сигнал флуоресценции от (0,0) и (1,1) колебательных линий регистрировался в диапазоне 305-320 нм.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время только оптические методы, основанные на использовании лазерного излучения, позволяют проводить измерения с высоким пространственным и временным разрешением, не оказывая существенного влияния на измеряемый объект. Знание распределения температуры и концентрации различных радикалов, таких как OH, CH, NO в пламени, играет ключевую роль с точки зрения понимания процесса горения. Измерения поля температуры и концентрации с высокой точностью необходимы как для проведения фундаментальных исследований с целью валидации теоретических и численных моделей, так и для решения прикладных задач диагностики процессов горения.

Лазерно-индуцированная флуоресценция (LIF) радикалов OH является общепризнанным инструментом и широко используется для определения положения фронта пламени, температуры или скорости тепловыделения [1,2]. В рамках данной работы демонстрируются возможности метода для визуализации распределения радикалов OH. Количественная интерпретация LIF 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 сигнала плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) при возбуждении молекул на двух различных линиях перехода (two-line PLIF). 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 LIF 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].

© Лобасов А.С., Чикишев Л.М., Дулин В.М.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Для проведения измерений использовалась PLIF-система Flame Master (производства LaVision, Германия). Измерительная система включает в себя: импульсный твердотельный Nd:YAG лазер накачки (Quant-Ray) с частотой работы 10 Гц и энергией импульса второй гармоники до 1000 мДж, перестраиваемый лазер на красителях (Sirah), позволяющий генерировать излучение красителя, после удвоения длинны волны, в диапазоне 220-300 нм, измеритель энергии лазерного излучения, который регистрирует энергию каждого импульса, коллимирующую оптику, кварцевый УФ-объектив (LaVision UV-lens), электроннно-оптический преобразователь (IRO), с квантовой эффективностью порядка 20% в исследуемом диапазоне длин волн 360-390 нм, и ПЗС камеру с динамическим диапазоном 16 бит (разрешение: 2560×2160 пикселей, размер пикселя: 6.5×6.5 мкм).

Перестраиваемый лазер на красителях имеет возможность с высокой точностью сканировать спектр возбуждения флуоресценции, с шагом 2 пм, что позволяет выбирать в этом спектре линии, соответствующие переходам в выбранные электронно-возбужденные состояния.

На рис. 1 схематически представлена измерительная система. Лазерный луч второй гармоники лазера накачки (1), с помощью системы зеркал (2) приходит в лазер на красителях (3). Излучение, сгенерированное в лазере на красителях проходит через делитель пучка (4), который отражает 4% от общей энергии лазерного излучения в измеритель энергии (5). Прошедший сквозь делить пучка лазерный луч направляется в систему призм (6), которые заводят его в систему оптических линз (7), разворачивающих лазерный луч в коллимированный нож размером до 50 мм в вертикальном направлении и толщиной менее 0,8 мм. Коллимированный нож проходит через ось симметрии пламени (8) возбуждая присутствующие в пламени радикалы OH. Регистрация излучения флуоресценции радикала OH осуществляется с помощью оптического фильтра (9), пропускающего в диапазоне 300-320 нм установленного на кварцевом УФ-объективе (10). Применение оптического фильтра позволяет избавиться от паразитных переотражений, возбуждающего лазерного излучения, хемилюминесценции пламени. Объектив фокусирует излучение флуоресценции в электронно-оптический преобразователь (11), а затем сигнал проецируется на матрицу камеры (12).

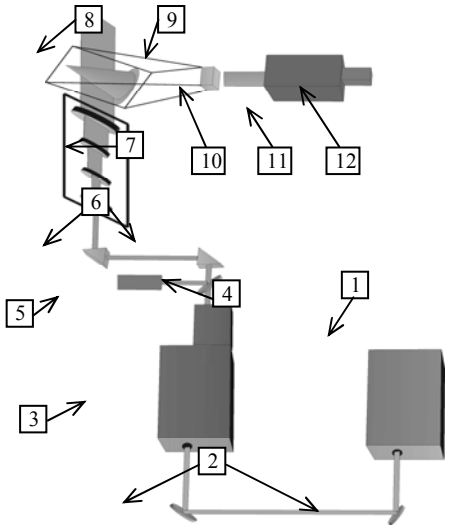

Рис. 1 Схема измерительной системы

Ламинарное предварительно перемешанное пламя было организовано соплом с выходным диаметром 15 мм (профилированное сопло использовалось для поджатия потока и создания ударного профиля скорости). Коэффициент избытка топлива в предварительно перемешанной смеси пропан-воздух исследовался в пределах от 0.77 до 1,25 (среднерасходная скорость смеси 1.7 м/с).

НАСТРОЙКА И КАЛИБРОВКА ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЯХ

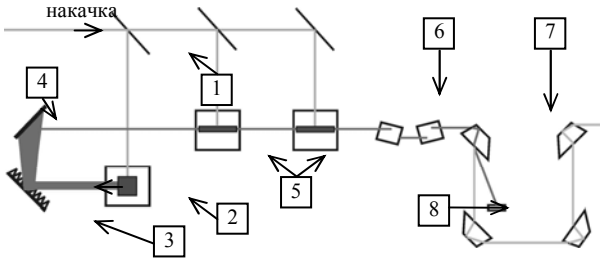

Рис. 2 Схема лазера на красителях

Лазер на красителях представляет собой сложную оптическую систему. На рис. 2 представлена оптическая схема лазера на красителях. Лазерный луч, который приходит от лазера накачки, проходит через делитель пучка (1) и часть лазерного излучения направляется в кювету резонатора (2), через которую прокачивается флуоресцентный краситель. В кювете резонатора происходит возбуждение флуоресцентного красителя. В данной работе в качестве красителя использовался Родамин 6G. Затем излучение от красителя попадает на дифракционную решетку резонатора (3), раскладывается в спектр и приходит на зеркало (4) установленное на моторизированную подвижку. Изменением угла поворота зеркала, выбирается необходимая длина волны излучения красителя. Излучение красителя, после зеркала с заданной

длинной волны, приходит в капиллярные кюветы предусилителя и усилителя (5), через которые так же прокачивается флуоресцентный краситель. После прохождения этой части оптической системы, лазерный пучок, на заданной длине волны, имеет круглую форму диаметром 6 мм и обладает энергией 150 мДж. Затем лазерный луч попадает в блок, состоящий из кристалла удвоения частоты лазерного излучения и кристалла компенсации пространственного смещения лазерного луча (6). После прохождения кристалла удвоения в лазерном излучении присутствуют две длины волны, остаточное излучение от флуоресценции красителя и излучение с удвоенной частотой, находящееся в УФ-области. Для того чтобы произвести разделение этого излучения применяется оптическая схема, состоящая из четырех призм Пеллин-Брока (7). Остаточное излучение от флуоресценции красителя направляется в специальную ловушку лазерного излучения (8), а излучение с удвоенной частотой проходит через все четыре призмы. Одновременное использование блоков (6) и (7) позволяет сохранять неизменное положение лазерного луча на выходе из лазера на красителях при перестройке его длины волны и таким образом сохраняется положение лазерного ножа в измерительной плоскости.

Следует заметить, что при каждом изменении длины волны лазерного излучения, необходимо проводить подстройку кристалла удвоения. Для удобства проведения эксперимента, данный лазер на красителях имеет возможность автоматической подстройки положения кристалла удвоения в зависимости от выбора необходимой длины волны. Проводилась предварительная настройка данной функции. Диапазон длин волн, в котором проводилось сканирование спектра возбуждения радикала OH, делился на семь равных участков. В каждой из этих восьми точек проводилась подстройка положения угла поворота кристалла удвоения, относительно пути распространения лазерного излучения, до тех пор, пока не удавалось добиться максимума энергии лазерного излучения для каждой точки. Данные о положении моторизированной подвижки в этих точках, на которой располагается кристалл удвоения, записывались в программу управления лазером на красителях.

Каждый лазер на красителях имеет некоторый сдвиг длины волны относительно заданной. Следовательно, для учёта этого сдвига необходимо проводить калибровку лазера на красителях в интересующей области спектра. На рис. 3 представлен фрагмент полученного спектра возбуждения флуоресценции радикала OH, а так же фрагмент смоделированного в этом диапазоне спектра возбуждения с помощью программы LIFBASE.

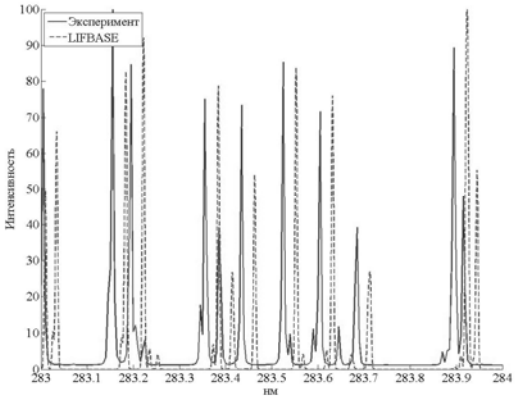

Рис. 3 Спектр возбуждения радикалов OH

Калибровка проводилась в спектральном диапазоне 283-284 нм. В качестве калибровки проводилось сканирование спектра возбуждения радикала OH с шагом 5 пм. Проводилось осреднение по 10 изображениям для каждой измеренной точки спектра возбуждения. Интенсивность расчётного и экспериментального спектра возбуждения нормировалась по пику, имеющему максимальную интенсивность в этом диапазоне длин волн.

После сравнения этих спектров, было установлено, что смещение длины волны лазерного излучения относительно заданного составляет 29 пм. Расположение пиков и их относительная интенсивность на этих спектрах позволяют сопоставить и идентифицировать отдельные переходы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как известно, интенсивность сигнала флуоресценции зависит от температуры. При измерении концентрации с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции, необходимо выбрать переход, который имеет незначительную зависимость от температуры. Так, в литературе имеются данные о том, что интенсивность сигнала флуоресценции радикалов OH при атмосферном давлении при возбуждении перехода $Q_1(8)$ расположенного на длине волны 283,55 нм слабо зависит от температуры [5]. Таким образом, этот переход может использоваться для измерения относительной концентрации радикалов OH.

На рис. 4 представлены осредненные по времени поля относительной концентрации радикалов OH. Визуализация распределения радикалов OH проводилась в предварительно перемешанном ламинарном пропано-воздушном пламени с различной стехиометрией. Осреднение проводилось по 100 мгновенным изображениям, с экспозицией для каждого изображе-

ния в 200 нс. Области с высокой интенсивностью сигнала соответствуют зонам с большой концентрацией радикалов OH.

В середине сверху представлено поле относительной концентрации радикалов OH для стехиометрического случая. Слева и вниз представлены бедные режимы с уменьшением коэффициента избытка топлива (φ), справа и вниз – богатые, с увлечением φ. Как можно видеть, из представленных полей относительной концентрации радикалов OH, в случае богатых режимов область горения смещается в зону, где происходит перемешивание подаваемой недогоревшей смеси с окружающим воздухом. При обеднении смеси наблюдается смещение области наибольшей концентрации радикалов OH к верхней точке конуса фронта пламени.

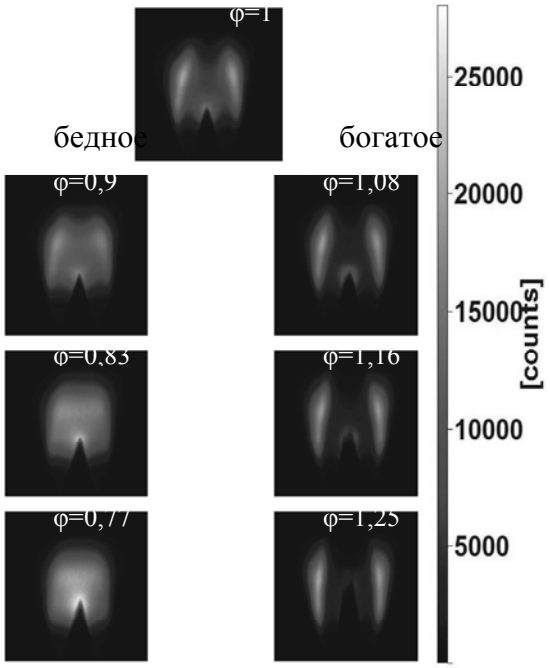

Рис. 4 Поля относительной концентрации радикалов OH при различном φ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования, основанные на методе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции радикалов OH. Экспериментально измерен спектр возбуждения радикалов OH, с шагом в 5 пм, в диапазоне длин волн 283-284 нм. Проведено моделирование спектра возбуждения в этом диапазоне с помощью программы Lif-Base. Определено смещение длины волны излучения лазера на красителях относительно установленной, составляющее 29 пм, путем сравнения этих спектров возбуждения

Представлены результаты визуализации радикалов OH в ламинарном предварительно перемешанном пламени с различной стехиометрией. Видно, что при увеличении коэффициента избытка топлива область высокой концентрации радикалов OH смещается в зону перемешивания подаваемой недогоревшей смеси с окружающим воздухом.

В дальнейшем планируется провести измерения в турбулентных и закрученных потоках с горением.

ЛИТЕРАТУРА

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