

**ПЛОСКОСТНАЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ РАДИКАЛА ОН  
В ЛАМИНАРНОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОМ ПЛАМЕНИ.**Лобасов А.С.<sup>1,2</sup> Чикишев Л.М.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

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 ОН, СН, 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 ОН 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 ОН. 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].

Объектом исследования являлось ламинарное предварительно перемешанное пламя организованное соплом с выходным диаметром 15 мм (профилированное сопло использовалось для поджигания 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).

Для проведения измерений использовалась PLIF-система Flame Master (производства LaVision, Германия). Накачка перестраиваемого лазера на красителях (Sirah), позволяющего генерировать излучение красителя, после удвоения длины волны, в диапазоне 220-300 нм, осуществлялась второй гармоникой твердотельного Nd:YAG лазера накачки (Quant-Ray, 10 Гц, 1000 мДж). УФ-луч выходящий из лазера накачки проходил через делитель пучка, который отражал 4 % лазерного излучения в измеритель мощности. УФ-луч прошедший сквозь делитель пучка, попадал в систему призм, которые заводили его в систему линз разворачивающих лазерный луч в коллимированный нож. Коллимированный нож размером до 50 мм в вертикальном направлении и толщиной менее 0,8 мм проходил через ось симметрии пламени, возбуждая присутствующие в пламени радикалы ОН.

Для регистрации излучения флуоресценции радикала ОН применялась регистрирующая система, состоящая из оптического фильтра, кварцевого объектива, электронно-оптического преобразователя и КМОП камеры. Оптический фильтр, пропускающий в диапазоне 300-320 нм, был установлен на кварцевом УФ-объективе (LaVision UV-lens). Применение оптического фильтра позволяет избавиться от паразитных переотражений возбуждающего лазерного излучения, хемилюминесценции пламени. Объектив фокусировал излучение флуоресценции в электронно-оптический преобразователь (LaVision IRO), фотокатод которого имеет квантовую эффективность порядка 20 % в исследуемом диапазоне длин волн (290-330 нм), а затем сигнал проецировался на матрицу КМОП камеры (LaVision Imager sCMOS, 16 бит, разрешение: 2560×2160 пикселей, размер пикселя: 6.5×6.5 мкм). Усиление камеры фиксировалось на значение 70%, а экспозиция каждого кадра составляла 200 нс.

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.

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. Ниже (см. рис. 1) представлен фрагмент полученного спектра возбуждения флуоресценции радикала ОН, а так же фрагмент смоделированного в этом диапазоне спектра возбуждения с помощью программы LifBase.

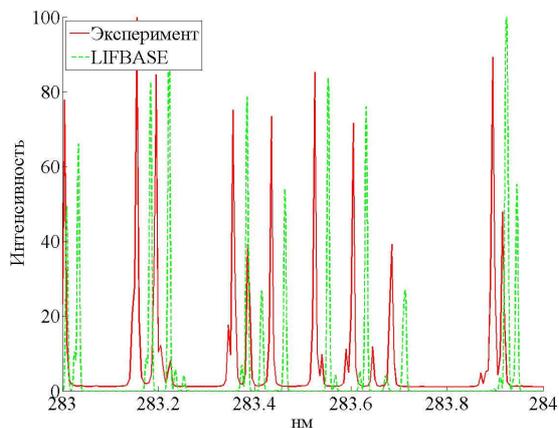


Рис. 1. Спектр возбуждения радикалов OH

Калибровка проводилась в спектральном диапазоне 283–284 нм. В качестве калибровки было проведено сканирование спектра возбуждения радикала OH с шагом 5 нм. Затем осуществлялось 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 нм. Расположение пиков и их относительная интенсивность на этих спектрах позволяют сопоставить и идентифицировать отдельные переходы.

Так как интенсивность сигнала флуоресценции зависит от температуры, при измерении концентрации с помощью метода LIF, 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.

Визуализация распределения радикалов OH (см. рис. 2), осредненная по времени, проводилась в предварительно перемешанном ламинарном пропановоздушном пламени с различной стехиометрией. Осреднение проводилось по 100 мгновенным изображениям. 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 ( $\phi$ ), справа и вниз – богатые, с увеличением  $\phi$ . 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 наиболь-

шей концентрации радикалов OH к верхней точке конуса фронта пламени.

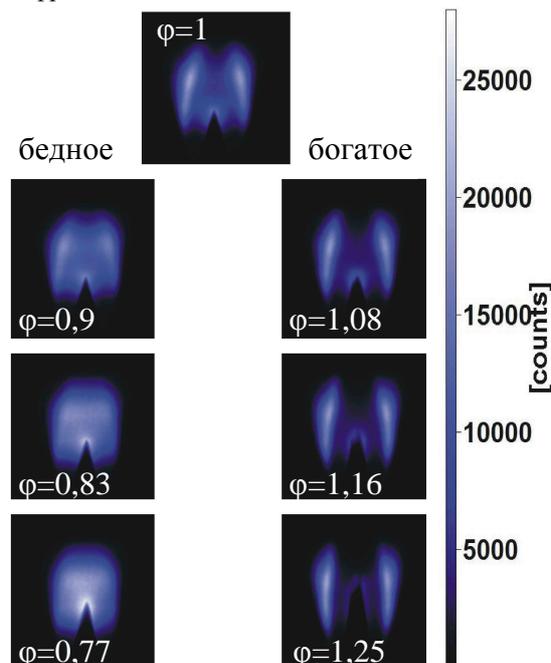


Рис. 2. Поля относительной концентрации радикалов OH при различном  $\phi$ .

В результате работы были проведены экспериментальные исследования, основанные на методе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции радикалов OH. Экспериментально измерен спектр возбуждения радикалов OH, с шагом в 5 нм, в диапазоне длин волн 283–284 нм. Проведено моделирование спектра возбуждения в этом диапазоне с помощью программы LifBase. Определено смещение длины волны излучения лазера на красителях относительно установленной, составляющее 29 нм, 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.

#### 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

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