

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИКАЛОВ ОН И СН В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ГОРЕНИИ ЭТАНОЛА

Б. Ф. Бояршинов, В. И. Титков, С. Ю. Федоров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск  
boyar@itp.nsc.ru, fedorov@itp.nsc.ru

С применением оптических методов измерений в сфокусированных пучках исследовано влияние турбулентности набегающего потока на распределение радикалов СН и ОН. Данные по концентрации СН получены при минимальной степени турбулентности, профили концентрации ОН — при уровнях пульсаций скорости 1, 8 и 18 %. Показано, что в ламинарном пограничном слое область обнаружения ОН смещена относительно максимума температуры в зону окислителя, а СН — в зону горючего. Наибольший уровень концентрации ОН близок к значениям, характерным для горения водорода. Среднеквадратичные пульсации скорости и средние значения концентрации ОН по длине пламени изменяются немонотонно.

Ключевые слова: пограничный слой, горение, турбулентность, радикалы, флуоресценция.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов переноса в сложных условиях [1] показали, что в пограничном слое при горении может происходить аномальное увеличение скорости выгорания. Повышенная турбулентность и ускорение основного потока вызывают локальное возрастание интенсивности тепло- и массообмена в два-три раза. Очевидно, что причины интенсификации процессов переноса связаны с особенностями течения в пограничном слое с химическими превращениями. Выявить эти особенности возможно при сопоставлении распределений потоков вещества и турбулентности с распределениями параметров, характеризующих горение. К числу последних относятся температура и концентрация промежуточных продуктов химических реакций — свободных радикалов, таких как ОН и СН. Результаты измерения концентраций ОН и СН важны для анализа кинетики горения и определения полноты сгорания. Гидроксил участвует во многих химических превращениях, например, реакция  $\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$  является основной при окислении СО. Поэтому при анализе взаимодействия турбулентности с химической реакцией актуальны экспериментальные исследования, связанные с измерением пульсаций скорости и концентраций радикалов.

Для изучения турбулентных характеристик реагирующих течений без внесения возмущений в объект исследования используются оптические методы диагностики, основанные на измерении скорости частиц в газовом потоке. В методе лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), пространственное и временное разрешение которого соответствуют газодинамическим характеристикам турбулентных реагирующих течений, используются микронные и субмикронные несгорающие частицы [2, 3]. Для измерения полей скорости развивается метод PIV (particle image velocimeter), однако из-за малых размеров рассеивающих центров его применение в турбулентных газовых потоках ограничено.

Метод лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) известен и применяется для измерения концентрации радикалов. Он основан на их лазерном возбуждении и последующем измерении флуоресценции. Режим насыщенной ЛИФ реализован для измерения абсолютной концентрации ОН в турбулентном водородовоздушном пламени [4]; получены мгновенные и средние значения, функции плотности вероятности. В [5] методом планарной ЛИФ (ПЛИФ) исследовалось распределение концентрации ОН при распространении пламени метановоздушной смеси в камере постоянного объема. В [6] измерялись поля средних концентраций ОН и NO при сжигании природного газа в вихревой камере.

Одновременные измерения полей концен-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 02-02-16170), интеграционного проекта СО РАН № 28 и проекта НШ-816.2003.8.

трации СН и скорости в горячей спутной струе смеси этилена с азотом выполнены в работе [7], в которой совместно использовались методы PIV и ПЛИФ. При неизменном уровне турбулентности окружающего воздуха получены данные о скорости горения на искривленной поверхности пламени. Обсуждается вопрос о соответствия области обнаружения радикалов, зон реагирования и тепловыделения в пламенах. В расчетах показано, что координата максимума концентрации радикала СН совпадает с положением максимума температуры.

Для пограничного слоя с химическими реакциями, в котором проявляется локальное возращание скорости выгорания, подобные исследования не проводились. Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния турбулентности основного течения на локальные параметры пограничного слоя при горении этанола, испаряющегося со стенки (распределение радикалов ОН, СН и степень турбулентности) с применением методов измерений в сфокусированных лазерных пучках, имеющих сопоставимое временное и пространственное разрешения (ЛИФ и ЛДА).

## УСТАНОВКА

Опыты проводились в аэродинамической трубе [2]. На входе в конфузор устанавливалась проволочная сетка с ячейкой  $1 \times 1$  мм (степень турбулентности  $Tu_0 = 1\%$ ) или решетка с 25 резьбовыми отверстиями M27  $\times$  1.5. Изменением количества открытых отверстий (25 или 9) добивались повышенной степени турбулентности на входе в канал ( $Tu_0 = 8$  или  $18\%$ ). Конфузор состыкован с рабочим участком сечением  $100 \times 100$  мм. В опытах без продольного градиента давления верхняя стенка канала отсутствовала. Прозрачные боковые стенки сделаны из кварцевых пластин. Нижняя пористая поверхность представляла собой засыпку из стеклянных шариков диаметром  $(0.7 \pm 0.15)$  мм, разделенную на пять секций площадью  $80 \times 80$  мм. Система питания обеспечивала постоянный уровень этанола в засыпке, поверхность которой поддерживалась влажной в течение эксперимента. Скорость испарения этанола из каждой секции пористой стенки самоустанавливалась в соответствии с условиями конвективного массообмена. Средняя скорость воздушного потока на входе в канал  $U_0 = 10$  м/с. Пламя стабилизировалось с помощью

ребра высотой  $h = 3$  мм, установленного перед первой секцией поперек потока.

Распределение температуры в реагирующем пограничном слое получено с помощью платина-платинородиевой термопары диаметром 50 мкм. Поля средней продольной скорости и интенсивность турбулентности измерялись лазерным доплеровским анемометром. В качестве рассеивающих центров использовались кварцевые частицы размером  $\approx 1$  мкм. Частицы вводились во входное сечение конфузора. Засыпка, загрязненная порошком, легко заменялась.

Оптическая система анемометра ЛАДО-2 была установлена на подвижной платформе, расположенной над измерительной секцией. Лазерные пучки фокусировались и образовывали область пересечения размерами  $0.1 \times 0.1 \times 0.5$  мм. Рассеянное на частицах излучение регистрировалось фотоумножителем. Сигнал обрабатывался процессором, выполняющим функцию следящего фильтра.

Точность измерения флуктуаций средней скорости ( $u'$ ) в экспериментах определялась при сравнении с данными, полученными термоанемометром в опытах без горения. При горении отношение сигнал/шум уменьшалось, что приводило к увеличению ошибки при определении степени турбулентности ( $Tu = \sqrt{(u')^2}/U_0$ ) до  $\pm 20\%$ , а точность измерения средней скорости  $U_0$  составляла  $\approx 1\%$ .

Концентрации радикалов ОН измерялись методом насыщенной ЛИФ с применением экспериментальной техники, описанной в [8, 9]. Использовался накачиваемый Nd:YAG-лазером перестраиваемый лазер на красителе с преобразованием излучения во вторую гармонику (энергия излучения  $0.5$  мДж/имп, длительность импульса  $15$  нс, частота повторения импульсов  $10$  Гц). Узкополосное ( $\Delta\lambda = 0.04$  нм) ультрафиолетовое излучение фокусировалось в объект измерений, где плотность мощности превышала известное значение порога насыщения и составляла  $3 \cdot 10^7$  Вт/(см<sup>2</sup>·см<sup>-1</sup>). Флуоресценция из измерительного объема размерами  $0.03 \times 0.1 \times 1.0$  мм попадала в призмный монохроматор ДМР-4 и на выходе из него регистрировалась фотоумножителем. Временное разрешение электронной системы регистрации  $\approx 10$  нс. Данные моноимпульсных измерений обрабатывались на компьютере.

Возбуждение и регистрация флуоресценции радикала ОН производились в

колебательно-вращательной полосе 0–0 системы  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ . Длина волны лазера настраивалась на спектральный пик 311.3 нм. Поскольку он объединяет в себе несколько неразрешенных линий, это приводило к возбуждению различных переходов в указанной полосе. В их числе переход  $R_{26}$  — с уровня  $f_{26}$  на уровень  $F_{25}$ . Монохроматор со спектральным разрешением 0.3 нм был настроен на пик флуоресценции с длиной волны 307.5 нм, образованный изолированной линией перехода  $R_{24}$  — с уровня  $F_{25}$  на уровень  $f_{24}$ . Расчеты показывают, что в диапазоне температур  $900 \div 3000$  К населенность исходного уровня  $f_{26}$  изменяется меньше чем на 20 %. Поэтому использование указанной линии для возбуждения ОН обеспечивает сигнал флуоресценции, зависящий не от температуры, а только от концентрации этих радикалов.

Возбуждение флуоресценции радикала СН производилось в полосе 0–0 системы  $B_2\Sigma^- - X^2\Pi$ . Перестраиваемый лазер работал в режиме суммирования частот генерации красителя и первой гармоники лазера накачки. Его длина волны перестраивалась вблизи пика 390.7 нм, образованного малочувствительными к температуре линиями  $Q_1(8)$  и  $Q_2(8)$ . Регистрировалась интегральная флуоресценция в полосе 0–1 при настройке монохроматора с разрешением 15 нм на длину волны 435 нм. Сигналы фотоэлектронного умножителя, включенного с предельной чувствительностью, интегрировались в течение 200 нс. Записывался участок спектра шириной около 100 точек ( $390.1 \div 391.3$  нм) с накоплением сигнала по пяти импульсам лазера в точке. Определялась высота указанного пика с вычитанием уровня фона вблизи него.

Для получения абсолютных концентраций проводилась калибровка сигнала в опытах с известным распределением ОН в диффузионном пламени этанола, испаряющегося с поверхности сферы в воздушный поток [8]. Эта сфера диаметром 15 мм из пористой нержавеющей стали устанавливалась на входе в горизонтальный канал диаметром 50 мм; скорость обтекания 0.7 м/с, скорость выгорания  $0.027$  кг/( $m^2 \cdot c$ ). Результаты измерения на этом объекте, в свою очередь, также тестировались по данным измерения концентрации гидроксила в пламени водорода [4] и приняты за эталон.

При измерении концентрации радикала СН подобная калибровка сигнала ЛИФ не проводилась, поэтому измерялась относительная

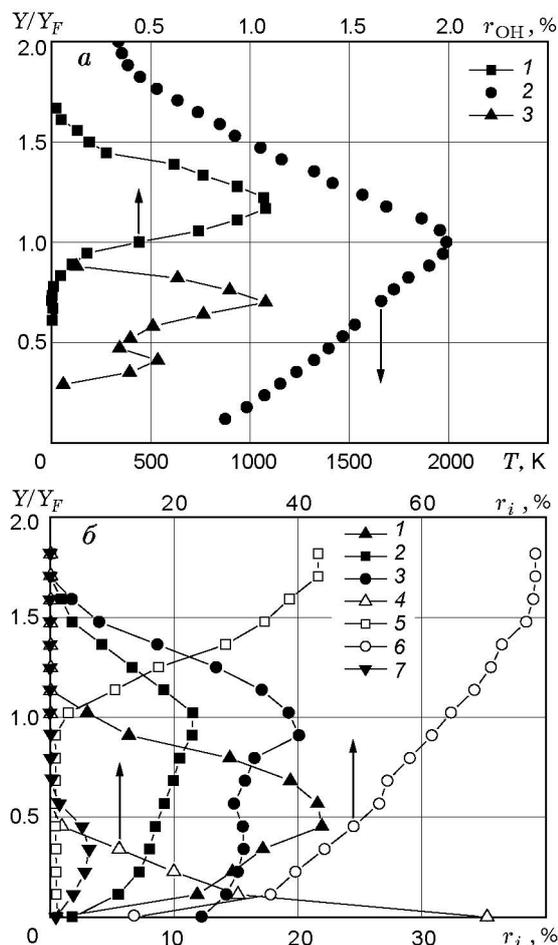


Рис. 1. Параметры ламинарного пограничного слоя при горении испаряющегося этанола:

*a* — вблизи лобовой точки сферы: 1 — распределение абсолютной концентрации ОН, 2 — температуры, 3 — относительной концентрации СН; *b* — при продольном обтекании плоской поверхности [13] ( $U_0 = 3$  м/с,  $Tu_0 = 1$  %,  $x = 140$  мм,  $h = 3$  мм), концентрации стабильных веществ (результаты газохроматографического анализа: 1 — CO, 2 — CO<sub>2</sub>, 3 — H<sub>2</sub>O, 4 — C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, 5 — O<sub>2</sub>, 6 — N<sub>2</sub>, 7 — C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O; поперечная координата  $Y$  отнесена к координате максимума температуры  $Y_F$

концентрация этого радикала.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В объекте, принятом за эталон, при минимальной турбулентности набегающего потока  $Tu_0 = 1$  % в ламинарном пограничном слое, когда исключались колебания пламени, исследовалась окрестность лобовой точки сферы. Измерялись температура, абсолютные мгновенные концентрации радикалов ОН ( $r_{OH}$ ), а также относительные средние концен-

трации радикалов СН (рис. 1,а). Полученная максимальная счетная концентрация ОН равная  $\approx 4.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (объемная концентрация  $r_{\text{ОН}} \approx 1 \%$ ), примерно соответствует концентрации при диффузионном горении водорода в воздухе, а также при горении стехиометрической смеси  $\text{H}_2 + \text{O}_2$  [8]. Видно, что положения максимумов концентрации радикалов и температуры не совпадают, в профиле концентрации СН обнаружено два максимума. В расчетах горения во встречных струях смеси этилена с азотом по программе OPPDIF [7] максимум СН совпадает с максимумом температуры и смещен относительно максимума ОН. Различие профилей концентрации СН и ОН отмечается также в пламени стеклодувной горелки [10], в экспериментах с диффузионным горением [11] и горением частично перемешанной смеси метана с воздухом [12]. На рис. 1,б показано распределение объемных концентраций стабильных веществ  $r_i$  при горении этанола, полученное с применением метода газовой хроматографии [13]. Возможно, что специфическое распределение СН (см. рис. 1,а) связано с наличием промежуточных продуктов химического реагирования  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$  и  $\text{CO}$ .

Влияние турбулентности на распределение радикалов исследовалось в пограничном слое над плоской пористой поверхностью при горении этанола. Установлено, что при повышенной турбулентности набегающего воздушного потока погрешность измерения концентрации СН превышает погрешность измерения пульсаций скорости, что ограничивает возможности экспериментов. Очевидно, это связано с низким уровнем концентрации радикала СН, который по данным [11] значительно ниже, чем измеренные значения ОН, и составляет  $\approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому в настоящей работе исследование влияния турбулентности на распределения радикалов ограничено измерениями распределения ОН.

В этих опытах калибровка сигнала проводилась в описанных выше предварительных измерениях известной концентрации ОН в лобовой точке сферы с испарением и горением этанола. Затем для одного значения турбулентности на входе с шагом 32 мм по длине канала измерялись профили концентрации ОН, а также профили турбулентности.

На рис. 2 показаны распределения концентрации ОН и пульсаций скорости в различных сечениях по длине канала. Данные по концен-

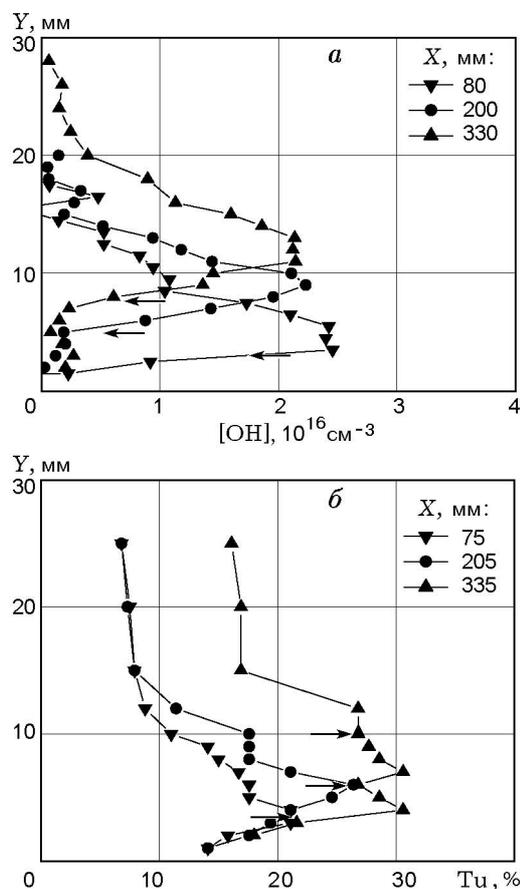


Рис. 2. Распределения концентрации ОН при  $Tu_0 = 1 \%$  (а) и пульсаций скорости при  $Tu_0 = 8 \%$  (б) в различных сечениях канала:

стрелками показано положение максимумов температуры

трации гидроксила (а) соответствуют опытам с  $Tu_0 = 1 \%$ . Тенденция к снижению уровня концентраций в максимуме с удалением от входа в канал усиливается при повышении до степени турбулентности  $Tu_0 = 8$  и  $18 \%$ . На рис. 2,б показаны профили турбулентности при  $Tu_0 = 8 \%$ . Видно, что в отличие от концентрации ОН турбулентность по длине возрастает. В турбулизованном пограничном слое расхождение в положении максимумов ОН и температуры сохраняется.

На рис. 3,а показаны распределения концентрации ОН при  $X = 160 \text{ мм}$  и различных значениях  $Tu_0$ . Влияние начального уровня турбулентности на пульсации скорости в близких сечениях представлены на рис. 3,б. Видно, что локальные значения параметров ОН и  $Tu$  с увеличением  $Tu_0$  изменяются немонотонно: наибольшие значения концентрации ОН прак-

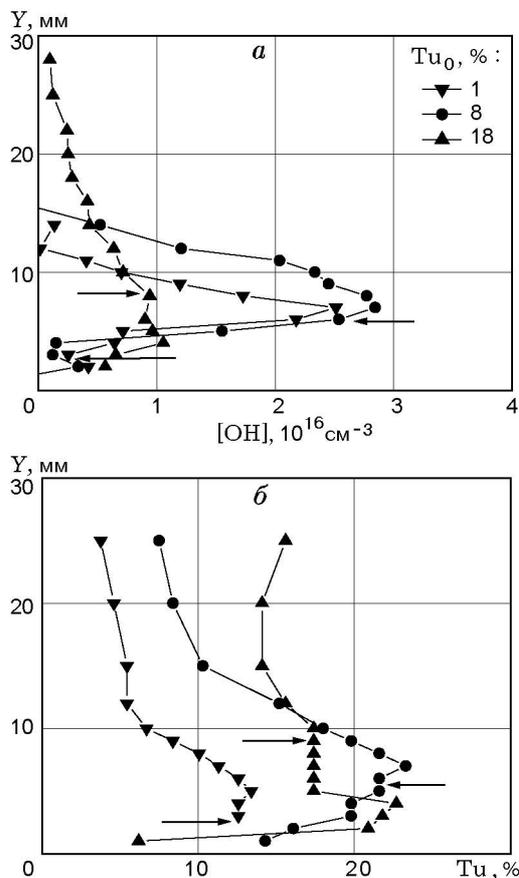


Рис. 3. Распределения концентрации ОН (*a*) в сечении  $X = 160$  мм и пульсаций скорости (*б*) в сечениях  $X = 200$  (▼) и  $140$  мм (•, ▲) при различных значениях турбулентности на входе в канал:

стрелками показано положение максимумов температуры

тически сохраняются в интервале  $Tu_0 = 1 \div 8$  % и снижаются почти втрое при  $Tu_0 = 18$  %; максимум турбулентности, наоборот, в интервале  $Tu_0 = 1 \div 8$  % возрастает, а при  $Tu_0 = 8 \div 18$  % изменяется слабо.

Картина течения (рис. 4) строилась по усредненным по ансамблю значениям. Видно, что несмотря на отсутствие монотонности общая тенденция к увеличению уровня турбулентности и снижению концентрации ОН по длине пламени сохраняется. При  $Tu_0 = 8$  % наибольшие значения степени турбулентности в пограничном слое достигают 30 % и более, а концентрации ОН  $\approx 2.6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Наблюдается сходство в распределении газодинамических особенностей течения и концентрации ОН. Расхождение между максимумами концен-

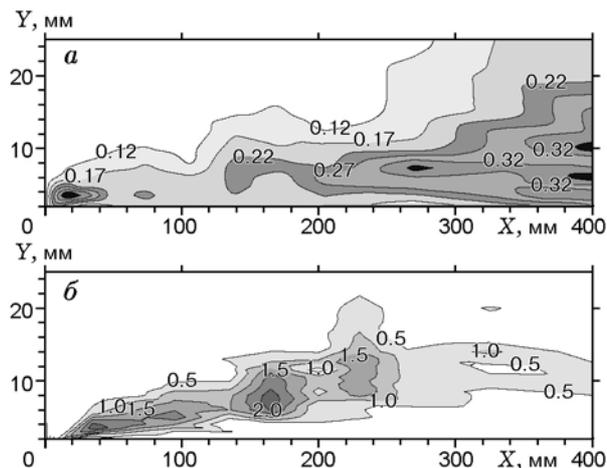


Рис. 4. Линии равной степени турбулентности (*a*) и концентрации ОН  $\cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> (*б*) в пограничном слое при испарении и горении этанола ( $U_0 = 10$  м/с,  $h = 3$  мм,  $Tu_0 = 8$  %)

трации ОН и температуры при  $Tu_0 = 8$  % в конце канала достигает  $3 \div 4$  мм.

Вероятная причина существования последовательно расположенных стационарных областей с повышенной турбулентностью и концентрацией радикалов — это особенность течения за преградой. В [1] для объяснения расслоения опытных данных, при котором образуются уровни интенсивности тепло- и массопереноса, предложена модель течения за рециркуляционной зоной. В ее основе предположение о возможности повторных отрывов и присоединений потока. При горении в областях присоединения происходит местное повышение турбулентности, улучшается перемешивание, интенсифицируется процесс химического реагирования. Поэтому вблизи областей присоединения происходит местное возрастание концентрации радикала ОН и местное увеличение скорости выгорания. Полученные данные о неоднородностях в структуре реагирующего пограничного слоя (см. рис. 4) в сочетании с результатами [2] подтверждают представления о повторных отрывах и присоединениях течения за рециркуляционной зоной.

На рис. 5 показаны гистограммы пульсаций концентрации ОН в окрестности фронта пламени при различной турбулентности воздушного потока на входе в канал. По оси ординат отложена плотность вероятности  $P$  — отношение количества измерений в выбранном

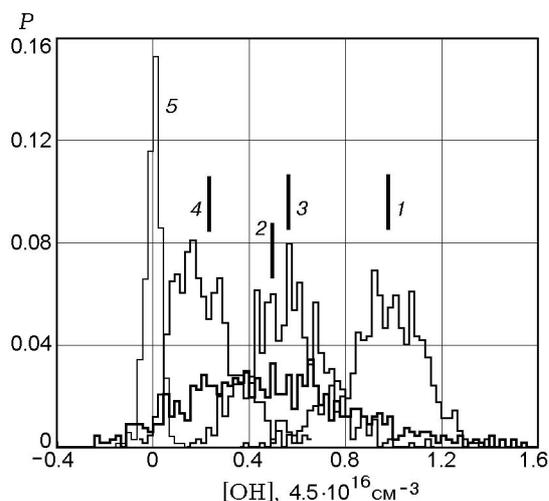


Рис. 5. Гистограммы пульсаций концентрации ОН в окрестности фронта пламени при различных значениях  $Tu_0$ :

1 — ламинарный пограничный слой в лобовой точке при обтекании сферы; 2, 4 — обтекание пластины при  $X = 160$  мм,  $U_0 = 10$  м/с,  $h = 3$  мм и  $Tu_0 = 1$  и 8 % соответственно; 3 — горение в потоке при  $U_0 = 3$  м/с,  $h = 3$  мм с колеблющимся фронтом пламени при  $X = 160$  мм; 5 — аппаратная функция с масштабом по оси ординат 1:2; вертикальные метки — среднеарифметические значения ( $\times 4.5 \cdot 10^{16}$ ): 1 — 0.957, 2 — 0.495, 3 — 0.559, 4 — 0.222

интервале к общему числу измерений. При горении этанола в окрестности лобовой точки сферы (1) средняя концентрация гидроксила достигает наибольших значений:  $[OH]_{max} \approx 4.3 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . Как и в [4], отмечаются отклонения от среднего значения с амплитудой, превышающей полуширину аппаратной функции (5), которая характеризует точность измерений. В условиях, близких к свободно-конвективному горению над горизонтальной стенкой (3), когда возникают периодические колебания поверхности пламени, средняя концентрация примерно равна  $[OH]_{max}/2$ .

С увеличением степени турбулентности до  $Tu_0 = 8$  % (4) средний уровень концентрации ОН снижается до  $0.16[OH]_{max}$  и остается таким же при  $Tu_0 = 18$  %. В этом случае мала вероятность зарегистрировать концентрацию  $\approx 4.3 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ , которая соответствует ламинарному фронту пламени. Возможно, что при сильной турбулентности перемежаемость течения проявляется не только во внешней области пограничного слоя, но также в окрестности фронта пламени. По-видимому, в турбу-

лентном потоке поверхность пламени не только искривляется, в ней возникают разрывы, т. е. не выполняется условие существования диффузионного пламени [14].

Вертикальными метками на рис. 5 показаны среднеарифметические значения концентраций. Для данных 1 это 0.957; для 2 — 0.495; для 3 — 0.559; для 4 — 0.222. Видно, что при низкой турбулентности (1, 2) и низкой скорости обтекания (3) средневероятностные и среднеарифметические значения близки между собой. При высоком уровне турбулентности ( $Tu_0 = 8$  %), соответствующем на диаграмме данным 4, наиболее вероятные концентрации ниже среднеарифметических примерно на 37 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью лазерных методов измерений (ЛДА и ЛИФ) получены опытные данные о турбулентности и распределении радикалов ОН и СН в пограничном слое. Горение этанола рассматривалось при турбулентности набегающего воздушного потока 1, 8 и 18 %. Показано, что в ламинарном пограничном слое область обнаружения ОН смещена относительно максимума температуры в зону окислителя, а СН — в зону горючего. Наибольший уровень концентрации ОН близок к значениям, характерным для горения водорода. Возможно, как и в случае горения водорода, этот уровень сверхравновесный. Косвенным образом это подтверждается тем, что особенности в пространственном распределении ОН следуют за особенностями распределения уровня турбулентности.

По длине канала турбулентность в реагирующем течении возрастает, а средняя концентрация ОН снижается. Эти изменения происходят немонотонно. Показано, что в пограничном слое за препятствием может сформироваться последовательность неоднородностей, имеющих свойства, характерные для областей присоединения. Продольный масштаб неоднородностей в пограничном слое (см. рис. 4) составляет  $\approx 60 \div 80$  мм. Полученные результаты имеют значение для корректного сопоставления с расчетными данными и с результатами опытов по скорости выгорания, которые должны быть получены с соответствующим пространственным разрешением.

Выявленная пространственная локализация параметров в пограничном слое с горени-

ем (расхождение координат максимумов концентрации радикалов и температуры, характер распределения пульсаций скорости, концентрации ОН) может быть использована для тестирования методов расчета кинетики химического реагирования и развития моделей турбулизованного пристенного течения в сложных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бояршинов Б. Ф.** К анализу опытных данных по тепло- и массопереносу в пограничном слое // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 2. С. 73–81.
2. **Бояршинов Б. Ф., Титков В. И.** Влияние турбулентности набегающего потока на структуру пограничного слоя с диффузионным горением этанола // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 6. С. 55–63.
3. **Ueda T., Mizomoto M., Ikai S., Kobayashi T.** Velocity and temperature fluctuations in a flat plate boundary layer diffusion flame // Combust. Sci. Technol. 1982. V. 27. P. 133–142.
4. **Drake M. C., Pitz R. W., Lapp M., et al.** Measurements of superequilibrium hydroxyl concentrations in turbulent nonpremixed flames using saturated fluorescence // 20th Intern. Symp. on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1984. P. 327–335.
5. **Cattolica R.J., Vosen S.R.** Two-dimensional measurements of the [OH] in a constant volume combustion chamber // 21th Intern. Symp. on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1988. P. 1273–1282.
6. **Bockle S., Kasenvadel J., Kunzelman T., Schulz C.** Laser-diagnostic multi-species imaging in strongly swirling natural gas flames // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. P. 741–746.
7. **Han D., Mungal M. G.** Simultaneous measurements of velocity and CH distribution. Part I: Jet flame in co-flow // Combust. Flame. 2003. V. 132, N 3. P. 565–590.
8. **Бояршинов Б. Ф., Федоров С. Ю.** Измерение методом ЛИФ температуры и концентрации радикала ОН при горении водорода и этанола // Физика горения и взрыва, 2004. Т. 40, № 5. С. 16–20.
9. **Бояршинов Б. Ф., Федоров С. Ю.** Измерения температуры и концентрации ОН в спиртовоздушном пламени методом лазерно-индуцированной флуоресценции // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 2. С. 3–8.
10. **Hanson R. K.** Planar laser-induced fluorescence imaging // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1988. V. 40, N 3. P. 343–362.
11. **Mercier X., Jamette P., Pauwels J. F., Desgroux P.** Absolute CH concentration measurements by cavity ring-down spectroscopy in an atmospheric diffusion flame // Chem. Phys. Lett. 1999. V. 305. P. 334–342.
12. **Heberle N. H., Smith G. P., Jeffries J. B., et al.** Simultaneous laser-induced fluorescence and Rayleigh scattering measurements of structure in partially premixed flames // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. P. 733–740.
13. **Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И.** Структура пограничного слоя со вдувом и горением этанола // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 29–36.
14. **Кузнецов В. Р., Сабельников В. А.** Турбулентность и горение. 1986. М.: Наука, 1986.

*Поступила в редакцию 6/VII 2004 г.*