

УДК 544.452.42,536.46

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА РЕАГИРУЮЩЕГО ПОТОКА ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ ПРИ ГОРЕНИИ ПРОПАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Д. К. Шараборин^{1,2}, Д. М. Маркович^{1,2}, В. М. Дулин^{1,2}¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, sharaborin.d@gmail.com²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования пространственной структуры реагирующего потока при горении пропановоздушной смеси в турбулентной закрученной струе, истекающей в атмосферный воздух. Коэффициент избытка топлива составлял $\phi = 0.7$, число Рейнольдса струи $Re = 5 \cdot 10^3$. Осредненные по времени пространственные распределения скорости, локальной плотности и концентрации основных компонентов газовой смеси измерены в условиях умеренной и сильной закрутки потока. В обоих случаях фронт пламени был стабилизирован во внутреннем слое смешения, сформированном приосевой областью замедления струи, где концентрировались горячие продукты горения. В случае сильной закрутки потока распределения температуры в сечении $y/d = 0.5$ показывают, что область с максимальной температурой газа расположена по периферии центральной зоны рециркуляции. При сильной закрутке потока на оси присутствовала зона рециркуляции и концентрация CO_2 была практически в два раза больше, чем в струе с умеренной закруткой. Противоположная ситуация наблюдалась для O_2 .

Ключевые слова: пламя в закрученном потоке, спонтанное комбинационное рассеяние, анемометрия по изображениям частиц.

DOI 10.15372/FGV20180305

ВВЕДЕНИЕ

Во многих горелочных устройствах и камерах сгорания пламя стабилизируется путем организации закрученных струй, обеспечивающих успешный поджиг и стабильное горение топлива в компактном объеме в широком диапазоне расходов топлива и окислителя [1–3]. При использовании струй с умеренной закруткой потока (см. [4–6]) можно значительно снизить концентрацию NO_x в продуктах горения смесей с избытком воздуха по сравнению с сильно закрученной струей при аналогичных условиях [7]. Эффект достигается за счет уменьшения времени пребывания горячих продуктов горения, содержащих молекулы азота и кислорода, в камере сгорания вследствие отсутствия центральной зоны рециркуляции потока, так как окисление азота в значительной степени происходит в горячих продуктах горения за фронтом пламени [8]. В частности, закрутка потока позволяет стабилизировать пла-

мя в условиях горения смеси со значительным избытком воздуха, что является эффективным способом снижения выбросов NO_x [9]. Однако при горении обедненной смеси для течения характерна высокая чувствительность к возмущениям в потоке и к пульсациям отношения топливо/окислитель, что, в частности, может привести к возникновению термоакустического резонанса в камере сгорания [10]. Таким образом, исследование пространственной структуры и влияния процессов горения на нее в турбулентных струйных потоках с закруткой, в том числе при горении смеси со значительным избытком воздуха, является важной задачей при оптимизации горелочных устройств и камер сгорания газотурбинных установок.

Подробную информацию о структуре течения турбулентных потоков можно получить с помощью бесконтактных оптических методов, таких как лазерная доплеровская анемометрия [4, 11] и анемометрия по изображениям частиц (PIV) [7, 12–14]). Метод PIV позволяет измерять пространственное распределение скорости в выбранном сечении потока. Для оценки распределения количества движения газа в реагирующих потоках необходимо измере-

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10566).

© Шараборин Д. К., Маркович Д. М., Дулин В. М., 2018.

ние локальной скорости и плотности. В настоящее время существует несколько методов измерения полей температуры, плотности и концентрации компонентов газовой смеси в пламени. Они основаны на регистрации локальной лазерно-индуцированной флуоресценции, рассеяния Рэля, спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) и когерентного антистоксова рассеяния света [15–17]. Методы на основе лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) характеризуются высокой интенсивностью регистрируемого сигнала, однако количественная интерпретация данных затруднительна, а иногда и невозможна, в том числе в связи с неизвестной скоростью тушения флуоресценции. Одним из способов количественного измерения этим методом является определение температуры с использованием подхода two-line LIF. Преимущество его заключается в том, что не нужно знать концентрацию целевых молекул, единственное предположение состоит в том, что внутренние степени свободы молекулы находятся в тепловом равновесии. Недостатком данного метода является необходимость детектировать одновременно населенность, по крайней мере, двух молекулярных уровней, что существенно усложняет эксперимент из-за реализации возбуждения переходов на двух различных длинах волн [18, 19]. Плоскостная регистрация интенсивности рассеяния Рэля позволяет оценить локальную плотность в сечении потока, но только если имеется априорная информация о результирующем сечении рассеяния молекул в каждой точке измерения. Интерпретация СКР при колебательном переходе конкретного типа молекул при измерении температуры не требует априорных знаний о концентрации других молекул и позволяет получить информацию об относительной концентрации основных компонентов газовой смеси. Измерения на основе СКР могут быть выполнены как в одномерной реализации (вдоль лазерного луча), так и в двумерной (в плоскости) [20, 21].

В данной работе с использованием методов PIV и СКР проведен сравнительный анализ осредненной по времени пространственной структуры турбулентных струйных потоков с умеренной и сильной закруткой при горении пропановоздушной смеси. Целью ставилось изучение влияния распада вихревого ядра и центральной зоны рециркуляции на распределение локальной скорости, локальной плот-

ности и концентрации основных компонентов смеси (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , C_3H_8) в реагирующей газовой струе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки для проведения двумерных измерений представлена на рис. 1. Измерения проводились на экспериментальном стенде, состоящем из горелочного устройства с завихрителем, устройства для засева потока, трубы, в которой происходит предварительное смешение топлива с воздухом, и участка контроля расхода воздуха и пропана. Горелочное устройство представляло собой профилированное сопло формы Витошинского (с выходным диаметром $d = 15$ мм) с расположенным внутри лопастным завихрителем. Степень закрутки потока (определяемая соотношением между моментом импульса и импульсом струи) варьировалась путем использования завихрителей с различными углами наклона лопаток. Степень закрутки потока оценивалась из геометрических параметров завихрителя [1]:

$$S = \frac{2}{3} \frac{1 - (d_1/d_2)^3}{1 - (d_1/d_2)^2} \operatorname{tg} \psi. \quad (1)$$

Здесь $d_1 = 7$ мм — диаметр центрального тела, поддерживающего лопасти, $d_2 = 27$ мм — внутренний диаметр корпуса завихрителя, ψ —

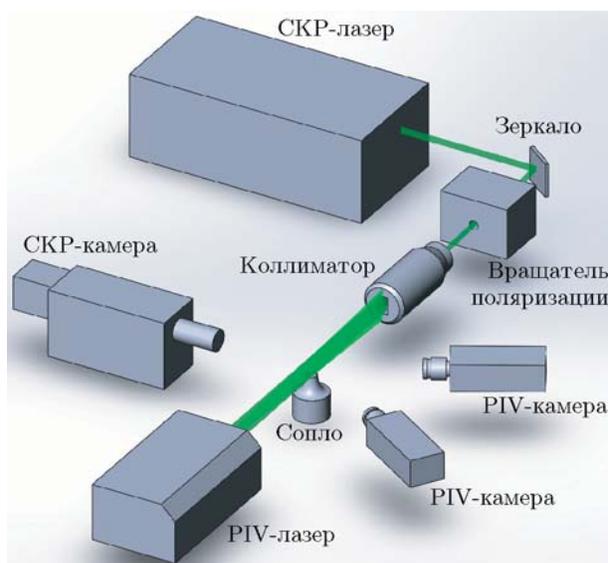


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для двумерных измерений методами СКР и стерео-PIV

угол наклона лопастей относительно оси. В данной работе использовались завихрители с $\psi = 30$ и 55° , соответствующие степеням закрутки $S = 0.41$ и 1.0 . Число Рейнольдса (расчитанное по выходному диаметру сопла d , средней (по расходу) скорости потока воздуха 5 м/с и вязкости воздуха) составляло $5\,000$. Коэффициент избытка топлива в предварительно перемешанной смеси пропан — воздух равнялся $\phi = 0.7$. Для проведения PIV-измерений в поток смеси вводилась взвесь частиц-трассеров TiO_2 (средний размер ≈ 1 мкм). Массовая доля частиц в потоке не превышала 0.03% .

Для PIV-измерений использовался двойной импульсный Nd:YLF-лазер Pegasus PIV и пара КМОП-камер PCO 1200HS. Регистрация изображений проводилась в двухкадровом режиме с частотой 770 Гц. С использованием оптической системы, состоящей из цилиндрической и сферической линз, луч лазера был развернут в вертикальный «нож» толщиной 0.8 мм в области измерения, который проходил через ось симметрии потока. Камеры были оснащены узкополосными оптическими фильтрами, пропускающими излучение лазера и подавляющими излучение пламени. Управление, сбор и обработка данных осуществлялись с использованием программного пакета ActualFlow, более подробное описание представлено в работе [22]. Stereo-калибровка проводилась с применением многоуровневой калибровочной мишени и полиномиального преобразования 3-го порядка. Для каждого исследованного режима было измерено $2\,400$ мгновенных трехкомпонентных реализаций поля скорости тремя независимыми запусками. Анализ погрешности PIV-измерений в потоке с горением вследствие конечного пространственного и временного разрешения, в том числе вызванного инерционностью частиц, приведен в работе [14].

Измерения на основе СКР были выполнены в одно- и двумерной реализациях, засветка потока осуществлялась третьей (355 нм, в случае одномерной реализации) и второй (532 нм, в случае двумерной реализации) гармониками импульсного Nd:YAG-лазера Quanta-Ray. Энергия лазерного импульса длительностью 6 нс контролировалась измерителем энергии Coherent LabMax-TOP. Энергия каждого импульса с длиной волны 355 и 532 нм равнялась соответственно 200 и 690 мДж при среднеквадратичном отклонении не более 5% . При прове-

дении одномерных измерений лазерный луч фокусировался в пучок диаметром менее 0.8 мм. С помощью коллимирующей оптики во время двумерных измерений лазерный луч разворачивался в «нож» шириной 45 мм и толщиной менее 0.8 мм в измерительной области. Для регистрации сигнала СКР использовалась интенсифицированная 16-битная камера с электронно-оптическим преобразователем (Princeton instruments PI-MAX-4) с фотокатодом S20 (multialkali). В случае измерений вдоль сфокусированного лазерного луча изображение на матрице камеры формировалось при помощи мультихроматора, построенного по схеме Черни — Тернера (Newport MS127i $1/8$ м, $1\,200$ лин./мм). Для регистрации двумерного распределения интенсивности сигнала СКР камера оснащалась узкополосным перестраиваемым фильтром Лио — Эмана (VariSpec LC) на основе жидких кристаллов. Пространственное распределение интенсивности стоксовой составляющей СКР молекулярного азота (колебательно-вращательные переходы) регистрировалось в диапазоне длин волн 607.3 ± 5 нм. Для подавления излучения рассеяния Рэлея, которое не полностью блокировалось перестраиваемым фильтром, использовался оптический полосно-заграждающий фильтр.

Для повышения соотношения сигнал/шум каждый кадр снимался камерой в режиме накопления по 250 импульсам лазера с объединением пикселей в ячейки 8×8 . Осреднение проводилось по 50 измерениям. С целью дальнейшего увеличения соотношения сигнал/шум сигнал СКР регистрировался для двух перпендикулярных линейных поляризаций излучения Nd:YAG-лазера. Поворот вектора поляризации осуществлялся полуволновой пластиной для соответствующей длины волны. Сигнал для поляризации, параллельной плоскости рассеяния, вычитался из сигнала для перпендикулярной поляризации, что минимизировало вклад фонового излучения, флуоресценции и теневого тока фотокатода в данные СКР.

На рис. 2 представлен пример одномерного распределения сигнала СКР в закрученной струе с горением. В спектре СКР присутствуют четыре области: окружающий воздух на расстоянии $x/d > 0.75$ от оси сопла; кольцевая струя смеси топливо — воздух; зона, окружающая фронт пламени (тонкий слой широкополосного сигнала флуоресценции на расстоянии $0.5(x/d)$); зона смещения

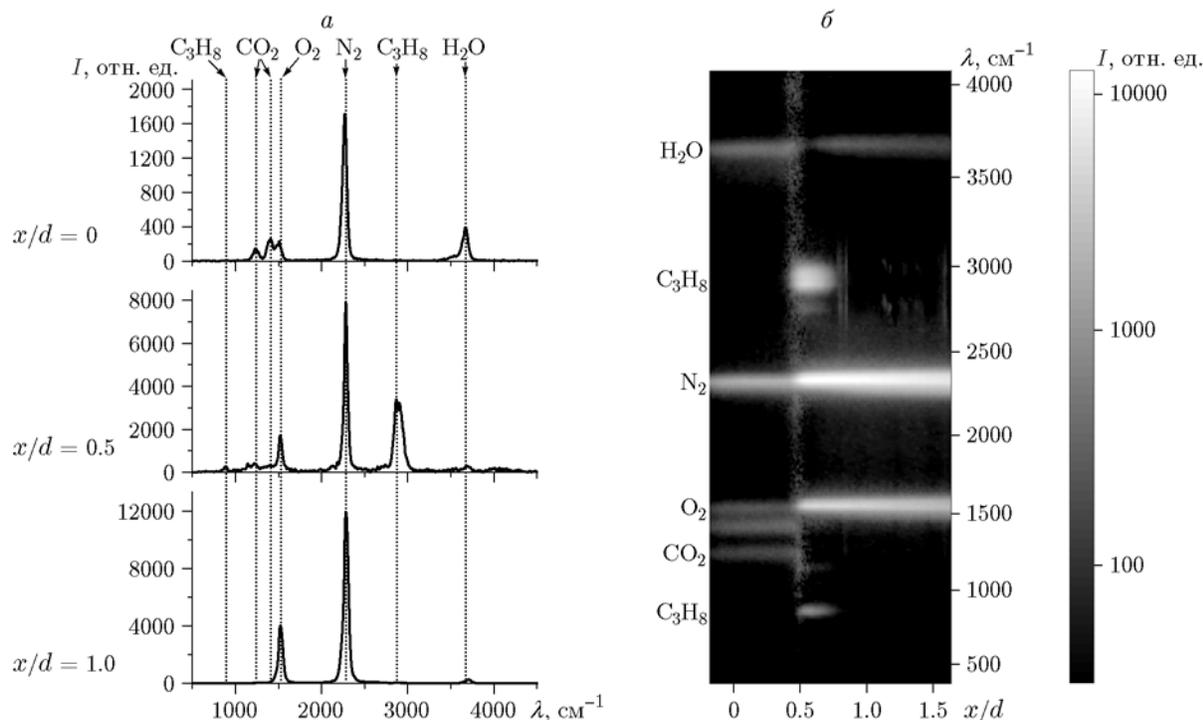


Рис. 2. Спектры (а) и пример регистрируемого распределения сигнала (б) стоксовой компоненты СКР вдоль лазерного луча, пересекающего турбулентное сильнозакрученное ($S = 1.0$) пропановоздушное пламя на высоте $y = 0.5d$ над срезом сопла

с окружающим воздухом. Внутри области замедления потока, ограниченной фронтом пламени, находятся горячие продукты горения с температурой порядка 1800 К. В этой области соотношение сигнал/шум оценивается как 1 : 9 и отношение интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент СКР колебательно-вращательных переходов молекул азота оценивается как 1 : 1.7. Интенсивность антистоксовой компоненты СКР в окружающем воздухе и реагирующем потоке не превышала 2 % интенсивности стоксовой компоненты СКР в воздухе. При оценке локальной плотности антистоксова компонента СКР не учитывалась, поскольку населенность первого колебательно-энергетического уровня не превышала 15 % при температурах ниже 1800 К.

Данные для одномерных измерений обрабатывали аналогично [20]. Обработка двумерных данных основана на отношении между стоксовыми компонентами колебательно-вращательных переходов молекул азота в реагирующей струе и атмосферном воздухе (при остановленной подаче смеси). Детальное описание метода и обработки данных приведено в работе [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фотографии и распределения средних скорости и локальной плотности молекул азота в случае умеренной и сильной закрутки потока пропановоздушного пламени со значительным избытком воздуха представлены на рис. 3. При умеренной закрутке потока осевая скорость достигает минимального значения вблизи координаты $y/d = 0.5$, однако остается положительной, что указывает на отсутствие зоны рециркуляции. Фронт пламени стабилизируется вблизи этой области. При сильной закрутке потока на оси струи присутствует центральная зона рециркуляции, а фронт пламени стабилизируется вокруг нее во внутреннем слое смешения и проникает внутрь сопла. Для обоих случаев закрутки вблизи оси струи в области замедления потока локальная плотность газа приблизительно в шесть раз ниже, чем в окружающем воздухе. Используя данные о распределении локальной плотности и скорости, представленные на рис. 3, можно оценить время пребывания азота в области высоких температур потока. В случае потока с сильной закруткой характерное время пребывания в зоне

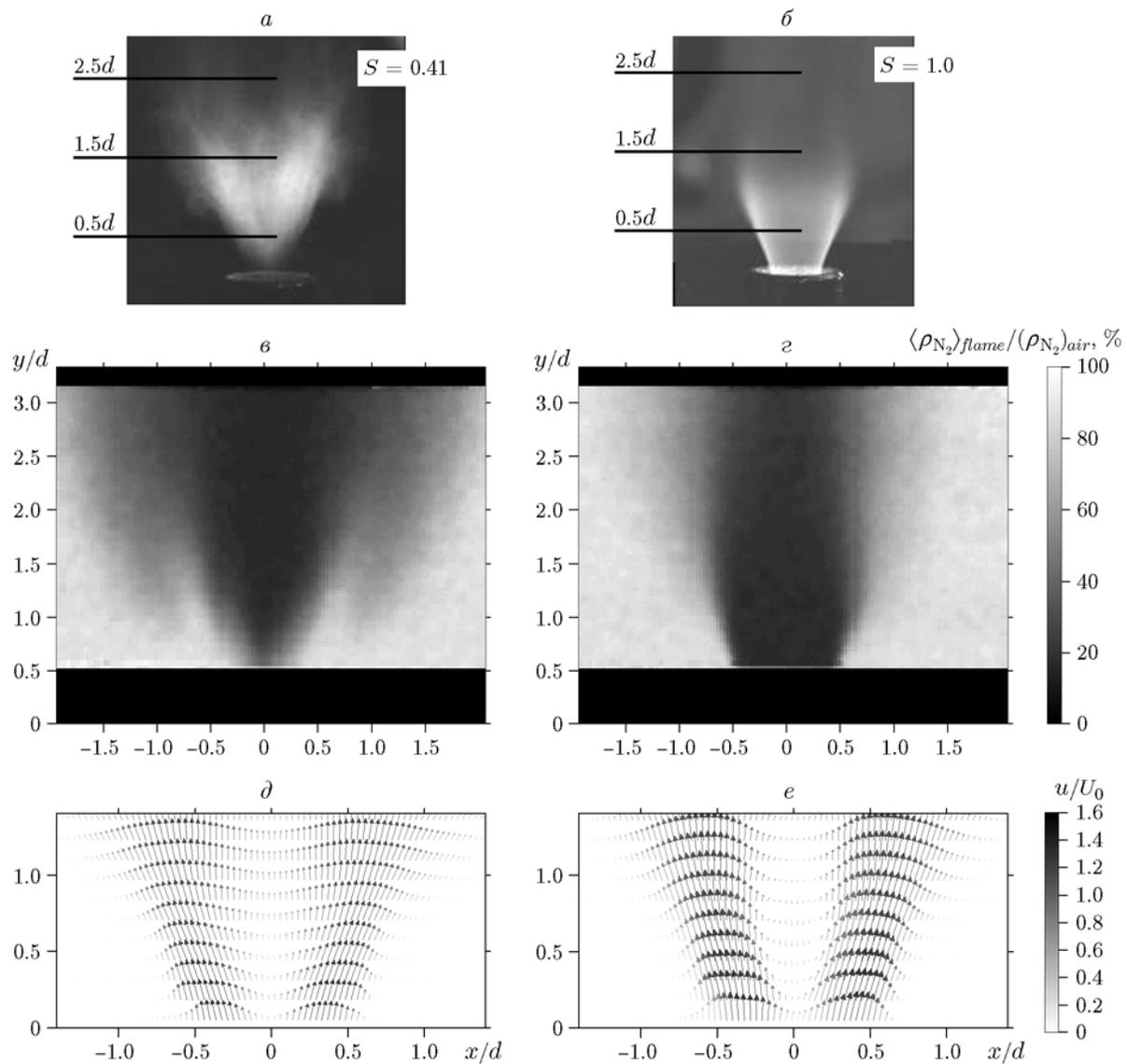


Рис. 3. Фотографии пропановоздушного пламени со значительным избытком воздуха ($\phi = 0.7$) (а, б) и распределения средних нормированных локальной плотности (в, г) и скорости (д, е) в случае умеренной ($S = 0.41$) и сильной ($S = 1.0$) закрутки струи

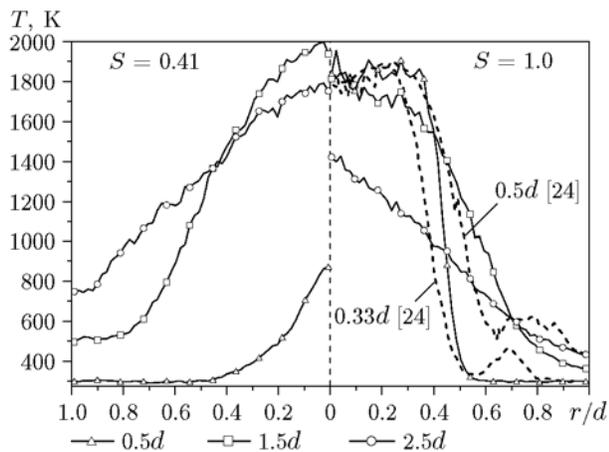


Рис. 4. Распределение средней температуры пропановоздушного пламени со значительным избытком воздуха ($\phi = 0.7$) на расстояниях $y/d = 0.5, 1.5, 2.5$ от среза сопла в случае умеренной ($S = 0.41$) и сильной ($S = 1.0$) закрутки струи

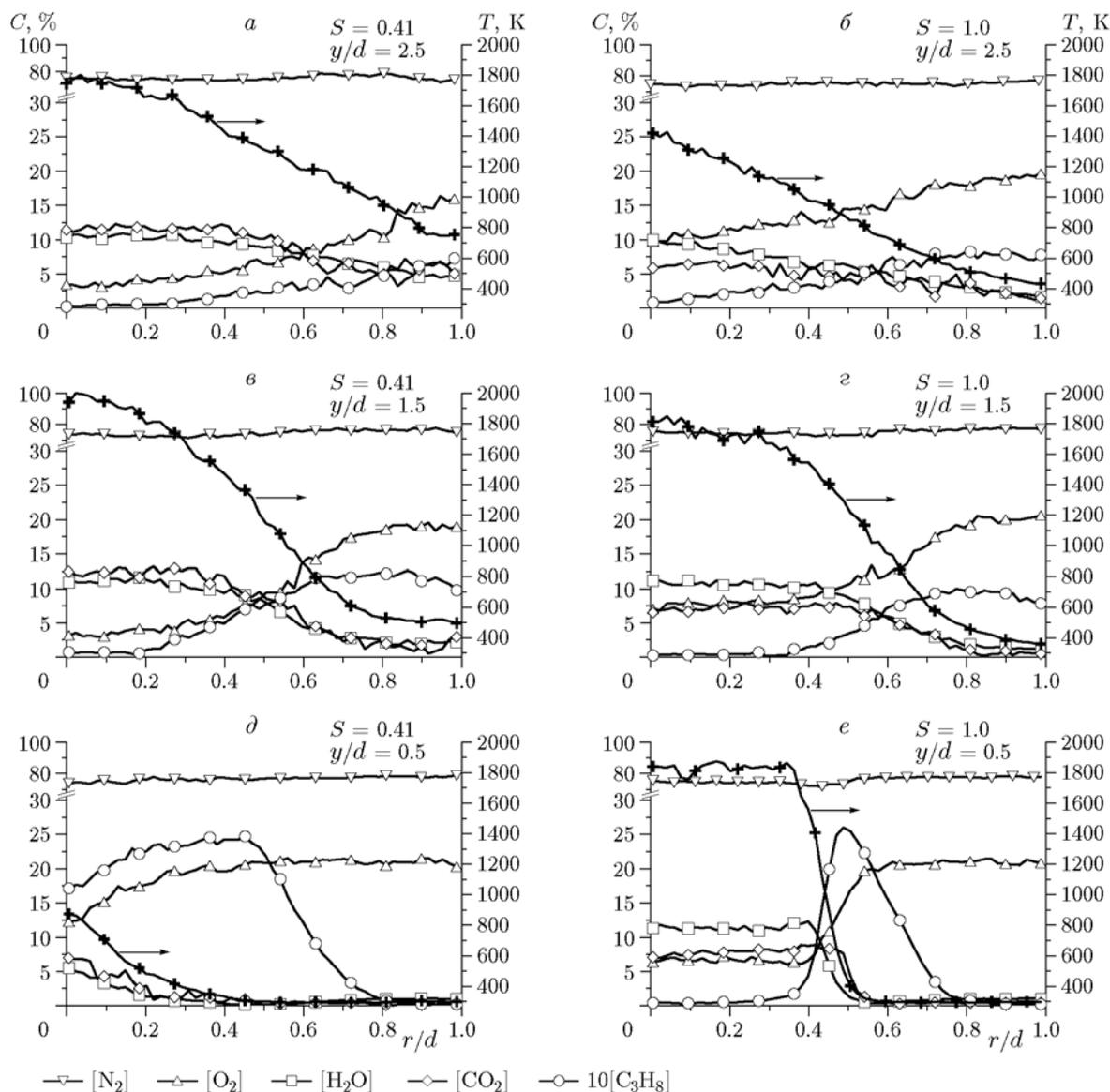


Рис. 5. Распределения средней температуры пропановоздушного пламени со значительным избытком воздуха ($\phi = 0.7$) и концентрации основных газовых компонентов в случае умеренной ($S = 0.41$ (а, б, д)) и сильной ($S = 1.0$ (б, з, е)) закрутки струи

рециркуляции, продольный размер которой составляет 14 мм, можно оценить в 20 мс. При умеренной закрутке для преодоления этого расстояния вдоль оси струи потребуется приблизительно 8 мс.

На рис. 4 приведены распределения средней температуры в потоке с умеренной и сильной закруткой. Для сравнения приведены также измеренные в работе [24] профили температуры в пламени с коэффициентом избытка топлива $\phi = 0.88$ при сильной закрутке потока $S = 0.75$ на расстоянии от сопла $y/d = 0.33$ и 0.5. В

случае сильной закрутки потока распределения температуры в сечении $y/d = 0.5$ показывают, что область с максимальной температурой газа расположена по периферии центральной зоны рециркуляции.

Распределения температуры T и концентрации C основных газовых компонентов в трех сечениях реагирующих потоков представлены на рис. 5. На основании полученных спектров СКР (см. рис. 1) сделан вывод, что концентрация CO ниже чувствительности измерительной системы в данной конфигурации. Для

всех представленных сечений молярная концентрация N_2 составляла $76 \pm 2 \%$, что показывает, что молекулы азота являются хорошим трассером для двумерных СКР-измерений локальной плотности (ввиду того, что азот практически не расходуется в процессе химической реакции). В сечении $y/d = 0.5$ пространственные распределения температуры и концентрации исследуемых компонентов смеси, за исключением азота, значительно различаются в потоках с сильной и умеренной закруткой. Данные различия можно объяснить расположением точки стабилизации фронта пламени: в случае сильной закрутки фронт стабилизирован внутри сопла на центральном теле лопаточного завихрителя, а в случае умеренной закрутки нижняя точка фронта осциллирует в области на оси потока от среза сопла до $y/d = 0.5$. При сильной закрутке потока в сечениях $y/d = 0.5$ и 1.5 струя смеси топливо — воздух окружает центральную зону рециркуляции, содержащую продукты горения с концентрацией H_2O , равной 11% , а также CO_2 и O_2 в концентрации $7 \pm 1 \%$. Температура внутри зоны рециркуляции достигает 1845 К. При умеренной закрутке потока продукты горения концентрируются внутри области замедления потока. Следует отметить, в сечениях $y/d = 1.5$ и 2.5 концентрация O_2 имеет минимальное значение $\approx 3 \%$ на оси струи с умеренной закруткой. Концентрация CO_2 в области замедления струи почти в два раза выше, чем в потоке с сильной закруткой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено экспериментальное исследование и проведен сравнительный анализ осредненной по времени пространственной структуры турбулентных струйных потоков с умеренной и сильной закруткой при горении пропановоздушной смеси с использованием методов PIV и СКР. В обоих случаях фронт пламени был стабилизирован во внутреннем слое смешения, сформированном приосевой областью замедления струи, где концентрировались горячие продукты горения. При сильной закрутке потока распределения температуры в сечении $y/d = 0.5$ показывают, что область с максимальной температурой газа расположена по периферии центральной зоны рециркуляции. Кроме того, при сильной закрутке потока на оси присутствовала зона рециркуляции и концентрация CO_2 была практически в два

раза больше, чем в струе с умеренной закруткой. Противоположная ситуация имела место для O_2 .

Авторы признательны проф. Кемалу Ханьяличу за поддержку и плодотворные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N.** Swirl Flows. — Kent, U. K.: Abacus Press, 1984.
2. **Syred N., Beer J. M.** Combustion in swirling flows: a review // *Combust. Flame.* — 1974. — V. 23. — P. 143–201.
3. **Weber R., Dugué J.** Combustion accelerated swirling flows in high confinements // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1992. — V. 18. — P. 349–367.
4. **Cheng R. K.** Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl // *Combust. Flame.* — 1995. — V. 101. — P. 1–14.
5. **Yegian D. T., Cheng R. K.** Development of a lean premixed low-swirl burner for low NO_x practical applications // *Combust. Sci. Technol.* — 1998. — V. 139. — P. 207–227.
6. **Cheng R. K.** Low swirl combustion // *The Gas Turbine Handbook* / R. Dennis (Ed.). — Washington, DC: Department of Energy, 2006. — P. 241–255.
7. **Johnson M. R., Littlejohn D., Nazeer W. A., Smith K. O., Cheng R. K.** A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30. — P. 2867–2874.
8. **Зельдович Я. Б., Садовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А.** Окисление азота при горении. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
9. **Dunn-Rankin D.** Lean Combustion: Technology and Control. — Academic Press, Elsevier, 2008.
10. **Lieuwen T., Torres H., Johnson C., Zinn B. T.** A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors // *J. Eng. Gas Turbines Power.* — 2001. — V. 123. — P. 182–189.
11. **Edwards C. F., Fornaciari N. R., Dunskey C. M., Marx K. D., Ashurst W. T.** Spatial structure of a confined swirling flow using planar elastic scatter imaging and laser Doppler velocimetry // *Fuel.* — 1993. — V. 72. — P. 1151–1159.
12. **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.* — 2001. — V. 30. — P. 167–180.
13. **Cheng R. K., Littlejohn D., Nazeer W. A., Smith K.** Laboratory studies of the flow field characteristics of low-swirl injectors for adaptation

- to fuel-flexible turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2008. — V. 130. — 021501.
14. **Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Маркович Д. М., Дулин В. М., Шараборин Д. К.** Пространственное и временное разрешение метода PIV при измерении скорости в пламени // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 5. — С. 13–21.
 15. **Kohse-Höinghaus K.** Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems // Prog. Energy Combust. Sci. — 1994. — V. 20. — P. 203–279.
 16. **Hassel E. P., Linow S.** Laser diagnostics for studies of turbulent combustion // Meas. Sci. Technol. — 2000. — V. 11. — P. R37–R57.
 17. **Miles R. B., Lempert W. R., Forkey J. N.** Laser Rayleigh scattering // Meas. Sci. Technol. — 2001. — V. 12. — P. R33–R51.
 18. **Devillers R., Bruneaux G., Schulz C.** Development of a two-line OH-laser-induced fluorescence thermometry diagnostics strategy for gas-phase temperature measurements in engines // Appl. Opt. — 2008. — V. 47. — P. 5871–5885.
 19. **Lee M. P., McMillin B. K., Hanson R. K.** Temperature measurements in gases by use of planar laser-induced fluorescence imaging of NO // Appl. Opt. — 1993. — V. 32. — P. 5379–5396.
 20. **Rabenstein F., Leipertz A.** One-dimensional, time-resolved Raman measurements in a sooting flame made with 355-nm excitation // Appl. Opt. — 1998. — V. 37. — P. 4937–4943.
 21. **Schefer R. W.** Three-dimensional structure of lifted, turbulent-jet flames // Combust. Sci. Technol. — 1997. — V. 125. — P. 371–394.
 22. **Alekseenko S. V., Dulin V. M., Kozorezov Y. S., Markovich D. M., Shtork S. I., Tokarev M. P.** Flow structure of swirling turbulent propane flames // Flow Turbul. Combust. — 2011. — V. 87. — P. 569–595.
 23. **Sharaborin D. K., Dulin V. M., Lobasov A. S., Markovich D. M.** Measurements of density field in a swirling flame by 2D spontaneous Raman scattering // AIP Conf. Proc. — 2016. — V. 1770. — 030027.
 24. **Gregor M. A., Seffrin F., Fuest F., Geyer D., Dreizler A.** Multi-scalar measurements in a premixed swirl burner using 1D Raman/Rayleigh scattering // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32. — P. 1739–1746.

Поступила в редакцию 1/IX 2017 г.
