

УДК 544.452.42+544.536.46

## О СТРУКТУРЕ ИМПАКТНОЙ СТРУИ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА И ГОРЕНИЕМ

Д. К. Шараборин<sup>1,2</sup>, Р. В. Толстогузов<sup>1,2</sup>, В. М. Дулин<sup>1,2</sup>, Д. М. Маркович<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, sharaborin.d@gmail.com

Методами PIV и PLIF ОН проведено экспериментальное исследование структуры струи, натекающей на плоскую преграду, с закруткой и горением пропановоздушной смеси с коэффициентом избытка топлива 0.7 при расстояниях между соплом и преградой  $H/d = 1$  и 3, а также в отсутствие преграды. Степень закрутки равна 0.41 и 1.0, число Рейнольдса составляло 5 000. Сделан вывод, что при обоих значениях степени закрутки наличие импактной поверхности приводит к формированию протяженной центральной зоны рециркуляции в форме конуса. При  $H/d = 3$  и 2 интенсивность флуоресценции ОН вблизи импактной поверхности и внутри зоны рециркуляции значительно снижена. Данный эффект предположительно вызван уменьшением температуры продуктов горения в зоне рециркуляции, в том числе в окрестности фронта пламени.

Ключевые слова: закрученная струя, горение в вихревом потоке, импактная струя, пристенное горение.

DOI 10.15372/FGV20200202

### ВВЕДЕНИЕ

Струи, натекающие на преграды (импактные струи), реализуются во множестве технических устройств различных масштабов: от самолетов с вертикальным взлетом и посадкой до микроскопических струй, охлаждающих лопатки турбин или компоненты систем микроэлектроники. Импактные струи с горением используют для быстрого нагрева твердых материалов, в частности для их плавления. В некоторых приложениях эффективность теплообмена подразумевает достижение максимальных тепловых потоков, в других — наибольшую равномерность теплоотвода/нагрева. При этом условия конвективного теплообмена определяются аэродинамикой потока. Для стабилизации пламени предварительно перемешанной смеси в струях организуется закрутка потока, обеспечивающая устойчивое горение в компактном объеме в широком диапазоне значений соотношения топливо/окислитель [1–3]. Стабилизация пламени обеспечивается формированием следа на оси струи, в котором при больших степенях закрутки (соотношении момента импульса к импульсу струи) образуется возврат-

ное течение.

В среднем закрутка потока увеличивает угол раскрытия струи и скорость смешения с окружающей средой. При этом эффект монотонно возрастает с увеличением степени закрутки до критического значения, после которого угол раскрытия струи (как и интенсивность тепло- и массообмена) на начальном участке резко возрастает. Этот процесс сопряжен с изменением структуры потока вследствие распада вихревого ядра струи и, как правило, с возникновением центральной зоны рециркуляции [4]. С увеличением степени закрутки потока центральная зона рециркуляции сначала возникает кратковременно, а по превышении критической степени закрутки присутствует в потоке постоянно [5].

Наибольшее количество опубликованных работ посвящено исследованию свободных закрученных струй и в меньшей мере — анализу влияния горения на структуру потока [6, 7]. Работы по исследованию закрученных струй, натекающих на преграду, носят единичный характер [8, 9]. При этом известно, что наличие преграды и, как следствие, положительный градиент давления способствуют распаду вихревого ядра [10]. Большинство опубликованных исследований импактных струй с закруткой и горением содержат информацию лишь о распределении температуры или теплового по-

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

© Шараборин Д. К., Толстогузов Р. В., Дулин В. М., Маркович Д. М., 2020.

тока на поверхности [11–15]. При этом работы, описывающие структуру течения импактных струй с закруткой и горением, в литературе практически не представлены.

Целью данной работы являлось исследование структуры потока и формы пламени при взаимодействии закрученной струи с импактной поверхностью с использованием современных бесконтактных методов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальный стенд включал в себя горелочное устройство с профилированным соплом с внутренним диаметром выходного сечения  $d = 15$  мм, внутри которого был установлен лопастной завихритель. Степень закрутки, определенная как отношение момента импульса к произведению импульса струи и радиуса сопла, составляла  $S = 0.41$  и 1 (определено на основе геометрических параметров лопаточного завихрителя согласно работе [1] в предположении равномерности распределения скорости потока в межлопастных каналах и соответствия направления вектора скорости углу наклона лопаток). Критическое значение степени закрутки для распада вихревого ядра равно 0.6. Через сопло подавалась предварительно перемешанная смесь воздуха и пропана, расход компонентов контролировался массовыми расходомерами Bronkhorst: воздух — 52.8 л/мин, пропан — 1.71 л/мин, что соответствует коэффициенту избытка топлива  $\phi = 0.7$ . Число Рейнольдса, определенное по диаметру сопла, среднерасходной скорости  $u_0 = 5$  м/с и вязкости воздуха, составляло  $Re = 5000$ . Импактной поверхностью являлась нижняя часть стальной цилиндрической емкости, расположенной над соплом, температура которой поддерживалась постоянной циркулирующей водой при температуре 96 °С. Диаметр поверхности 300 мм. Перемещение сопла относительно импактной поверхности осуществлялось координатным устройством с точностью позиционирования 0.1 мм.

Для проведения PIV-измерений в потоке смеси использовалась взвесь частиц  $TiO_2$  размером приблизительно 0.5 мкм, создаваемая в питателе, представляющем собой сосуд, заполненный частицами, с механическим миксером внутри и подключенный по байпасной схеме. Для измерения поля скорости использовалась PIV-система в стереоскопической конфигурации (рис. 1), включающая в себя две

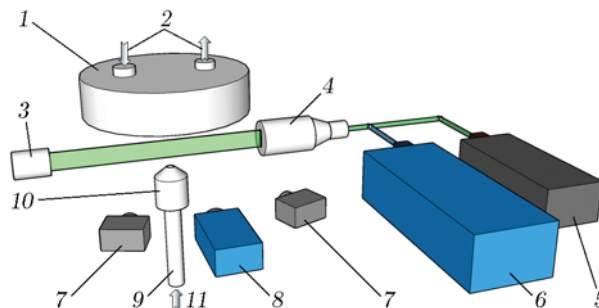


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — импактная поверхность, 2 — система охлаждения импактной поверхности, 3 — ловушка для лазерного излучения, 4 — коллиматор, 5 — PIV-лазер, 6 — PLIF-лазер, 7 — PIV-камеры, 8 — PLIF OH камера, 9 — труба смешения, 10 — сопло с завихрителем, 11 — подача воздуха и пропана

ПЗС-камеры (16Mpx Bobcat ImperX) для регистрации изображений и двойной импульсный Nd:YAG-лазер (Beamtch Vlite 200) для освещения трассерных частиц. На камерах были размещены объективы (Sigma 50mm DG MACRO) и узкополосные оптические фильтры ( $532 \pm 5$  нм), которые блокировали фоновый сигнал от излучения пламени. Межкадровая задержка, определяющая смещение частиц между двумя кадрами в зависимости от степени закрутки, устанавливалась в диапазоне  $20 \div 35$  мкс. Угол, под которым были ориентированы камеры, составлял  $30^\circ$  к нормали плоскости измерения. Размер измерительной области  $65 \times 60$  мм. Система работала в двухкадровом режиме с частотой съемки 1.4 Гц. Для синхронизации PIV-системы применялся синхронизатор (ПОЛИС). Управление PIV-системой осуществлялось с использованием программного пакета ActualFlow. Анализ погрешности PIV-измерений в потоке с горением вследствие конечного пространственного и временного разрешения, в том числе вызванного инерционностью частиц, приведен в работах [16–19].

В системе плоскостной регистрации лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) OH (см. рис. 1) в качестве источника излучения использовался перестраиваемый лазер на красителях Sirah Precision Scan (с длиной волны  $\approx 283$  нм) с лазером накачки Nd:YAG QuantaRay (532 нм, 1 Дж,  $\approx 10$  нс). Возбуждение OH происходило на линии Q1(8) перехода ( $v' = 1 \leftarrow v'' = 0, A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ ), которая имеет слабую зависимость от температуры. Сред-

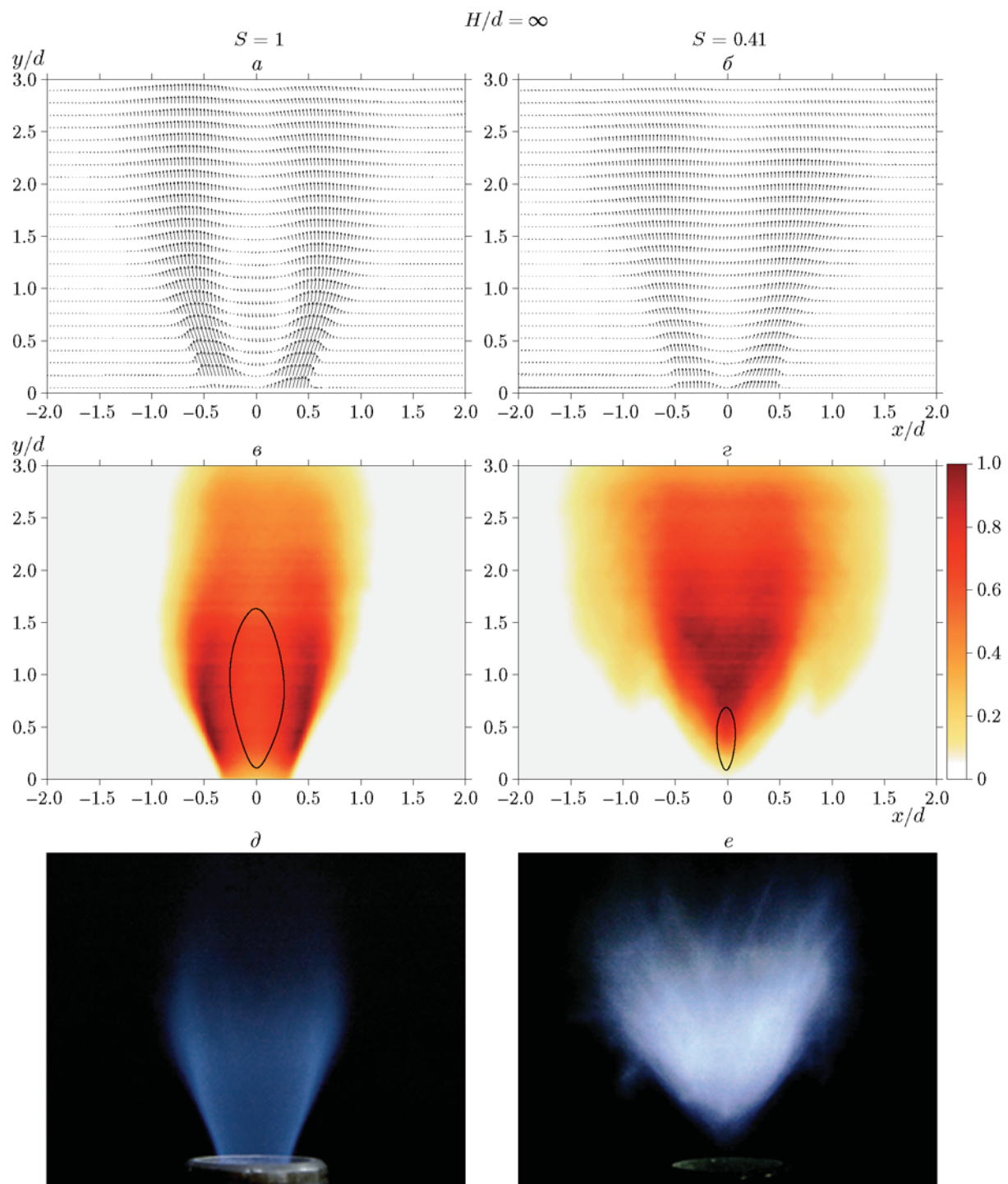


Рис. 2. Поле средней скорости (*a*, *b*), распределение интенсивности сигнала флуоресценции радикала OH в продольном сечении (*в*, *г*, центральная зона рециркуляции обведена сплошной линией) и фотография закрученного пламени (*д*, *е*) без импактной поверхности

ная энергия лазера, измеренная с помощью устройства Coherent LabMax Top, составляла 20 мДж. Сигнал регистрировался чувствительной в УФ-диапазоне интенсифицированной ПЗС-камерой с электронно-оптическим преобразователем (Princeton instruments PI-MAX-4, 16-bit) с фотокатодом S20 (multialkali). На камеру были установлены кварцевый объектив (LaVision 100 мм) и оптический фильтр, пропускающий излучение в диапазоне  $310 \pm 10$  нм. Оптический фильтр позволил избавиться от нежелательного фона, обусловленного рассеянием лазерного излучения на элементах стенда и собственным излучением пламени.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данном параграфе представлены фотографии пламени, распределения средней скорости и интенсивности флуоресценции ОН в экспериментах без импактной поверхности при расстояниях между соплом и поверхностью  $H/d = 1$  и 3. Распределения нормированы на диаметр сопла. На рис. 2, *a, б* приведены результаты для пламени в отсутствие преграды. При

обеих степенях закрутки ( $S = 0.41$  и  $1.0$ ) на оси струи присутствует след, в котором в случае  $S = 1.0$  осевая компонента скорости принимает отрицательные значения. При умеренной закрутке  $S = 0.41$  средние значения осевой скорости принимают отрицательные значения, но их абсолютная величина соответствует погрешности измерений. Из этого сделан вывод, что зона рециркуляции для пламени с умеренной закруткой отсутствует. Фотографии пламени представлены на рис. 2, *д, е*. Видно, что в случае  $S = 0.41$  фронт пламени стабилизирован на некотором расстоянии от среза сопла, в то время как в случае  $S = 1.0$  он проникает в сопло. Распределение интенсивности флуоресценции ОН, присутствовавшего в области продуктов горения, свидетельствует о том, что горячие газы сконцентрированы в окрестности зоны следа/рециркуляции.

На рис. 3 представлены результаты для пламени при наличии преграды на расстоянии  $H/d = 1$ . В случае сильной закрутки потока ( $S = 1.0$ ) наличие преграды приводит к изменению формы зоны рециркуляции с пузырьковой на конусную и к увеличению угла раскрытия конусообразного фронта пламени. В случае

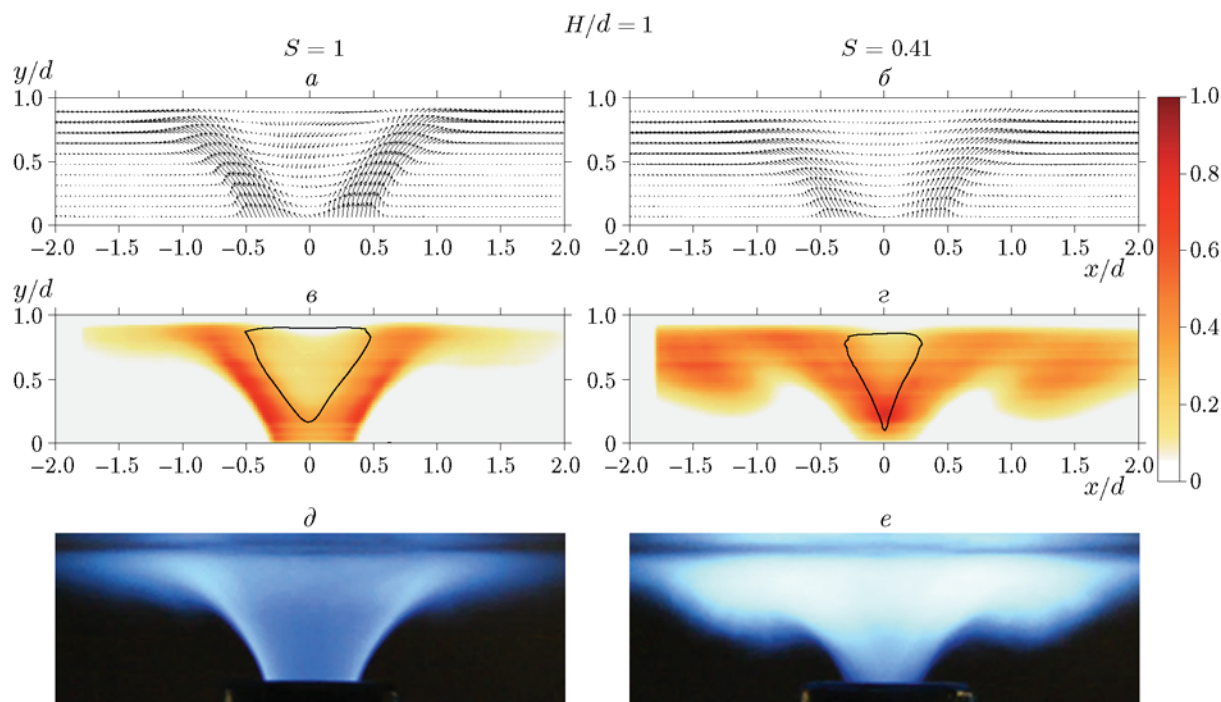


Рис. 3. Поле средней скорости (*a, б*), распределение интенсивности сигнала флуоресценции радикала ОН в продольном сечении (*в, г*, центральная зона рециркуляции обведена сплошной линией) и фотография импактного закрученного пламени (*д, е*) при наличии преграды на расстоянии  $H/d = 1$

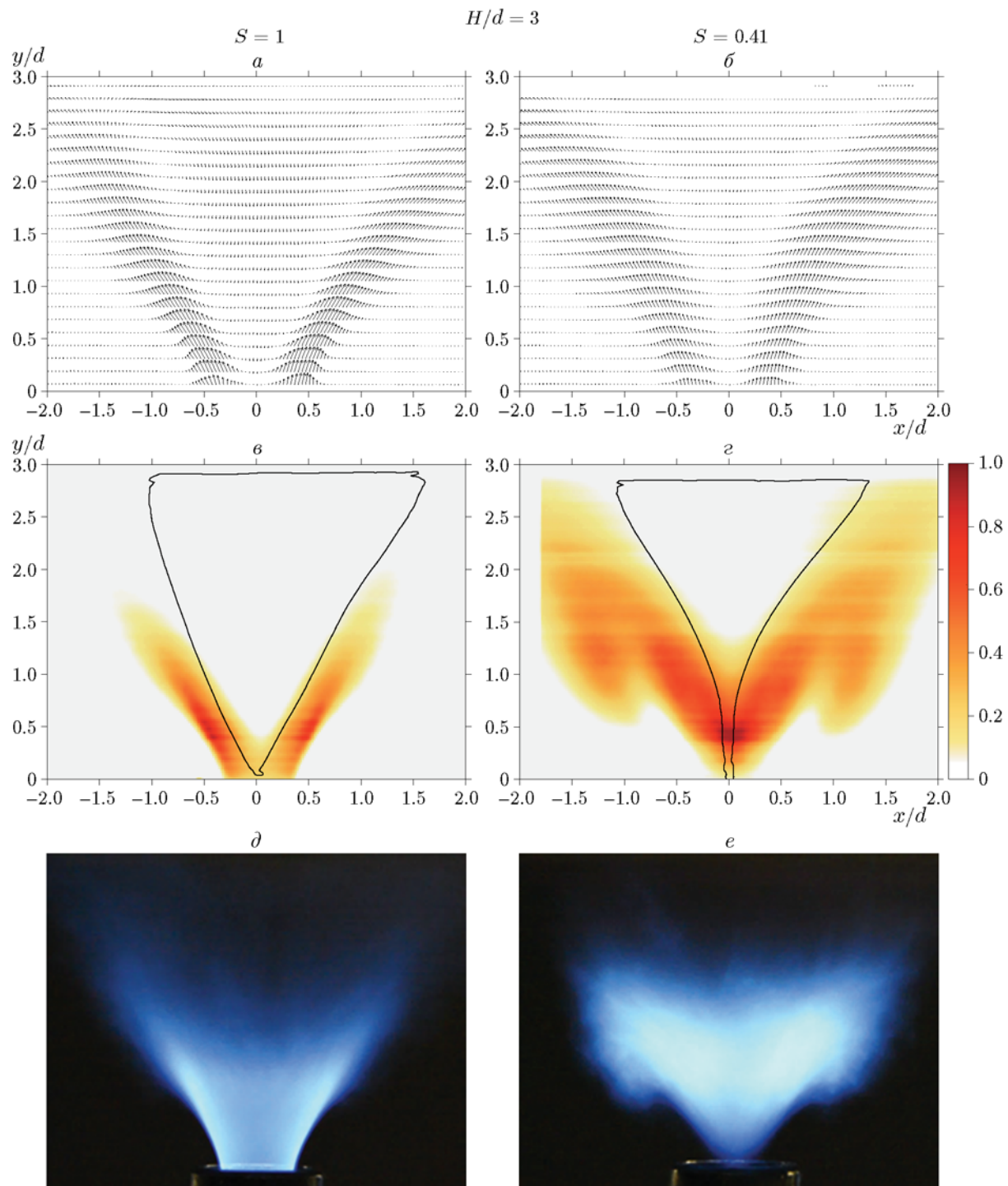


Рис. 4. Поле средней скорости ( $a$ ,  $b$ ), распределение интенсивности сигнала флуоресценции радикала ОН в продольном сечении ( $c$ ,  $d$ , центральная зона рециркуляции обведена сплошной линией) и фотография импактного закрученного пламени ( $d$ ,  $e$ ) при наличии преграды на расстоянии  $H/d = 3$

умеренной закрутки наличие преграды приводит к смещению фронта пламени выше по потоку и он частично проникает в сопло. Согласно распределению средней скорости данный эффект связан с возникновением центральной зоны рециркуляции в форме конуса. Данные в случае расстояния  $H/d = 3$  представлены на рис. 4. В целом эффект от присутствия преграды схож со случаем  $H/d = 1$ : увеличивается угол раскрытия струи, центральная зона рециркуляции имеет форму конуса. Однако результаты измерения демонстрируют важное отличие: возвратное течение в протяженной зоне рециркуляции является медленным, а интенсивность сигнала флуоресценции ОН внутри него очень слабая. Данный эффект может быть объяснен радикальным снижением равновесной концентрации ОН вследствие охлаждения продуктов горения преградой. На основании анализа данных в случае размещения преграды на расстоянии  $H/d = 2$  (не представлены в статье) также сделан вывод о значительном снижении температуры продуктов горения в конусообразной зоне рециркуляции между соплом и преградой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием методов PIV и PLIF ОН проведено экспериментальное исследование структуры струи, натекающей на плоскую преграду, с закруткой и горением пропановоздушной смеси с коэффициентом избытка топлива  $\phi = 0.7$  при расстояниях между соплом и преградой  $H/d = 1$  и  $3$ , а также в отсутствие преграды. Степень закрутки равна  $S = 0.41$  и  $1.0$ , число Рейнольдса составляло  $Re = 5000$ . Данные значения степени закрутки соответствовали двум различным режимам течения для свободной струи без горения: сильно закрученная струя с распадом вихревого ядра и центральной зоной рециркуляции ( $S = 1.0$ ) и умеренно закрученная струя ( $S = 0.41$ ), для которой центральная зона рециркуляции отсутствовала.

На основании измеренных полей скорости сделан вывод, что при обеих степенях закрутки наличие импактной поверхности приводит к формированию протяженной центральной зоны рециркуляции в форме конуса и к увеличению угла раскрытия конусообразного фронта пламени. Из распределений интенсивности сигнала флуоресценции ОН установлено, что при расстоянии между соплом и преградой  $H/d = 3$

(а также для случая  $H/d = 2$ , не представленного в статье) вблизи импактной поверхности и внутри зоны рециркуляции интенсивность сигнала флуоресценции снижена. Данный эффект может быть объяснен снижением равновесной концентрации ОН вследствие охлаждения продуктов горения преградой. Можно ожидать, что снижение температуры внутри зоны рециркуляции приведет к изменению концентрации вредных веществ в продуктах горения, но это предположение требует дальнейшего исследования.

### 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. **Billant P., Chomaz J. M., Huerre P.** Experimental study of vortex breakdown in swirling jet // *J. Fluid Mech.* — 1998. — V. 376. — P. 183–219.
5. **Oberleithner K., Sieber M., Nayeri C. N., Paschereit C. O., Petz C., Hege H.-C., Noack B. R., Wygnanski I.** Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: Stability analysis and empirical mode construction // *J. Fluid Mech.* — 2011. — V. 679. — P. 383–414.
6. **Liang H., Maxworthy T.** An experimental investigation of swirling jets // *J. Fluid Mech.* — 2005. — V. 525. — P. 115–159.
7. **Petersson P., Olofsson J., Brackman C., Seyfried H., Zetterberg J., Richter M., Aldén M., Linne M. A., Cheng R. K., Nauert A., Geyer D., Dreizler A.** Simultaneous PIV/OH-PLIF, Rayleigh thermometry/OH-PLIF and stereo PIV measurements in a low-swirl flame // *Appl. Opt.* — 2007. — V. 46. — P. 3928–3936.
8. **Alekseenko S. V., Bilsky A. V., Dulin V. M., Markovich D. M.** Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *Int. J. Heat Fluid Flow.* — 2007. — V. 28. — P. 1340–1359.
9. **Ianiro A., Cardone G.** Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets // *Appl. Therm. Eng.* — 2012. — V. 49. — P. 89–98.
10. **Pasche S., Gallaire F., Dreyer M., Farhat M.** Obstacle-induced spiral vortex breakdown // *Exp. Fluids.* — 2014. — V. 55. — Art. nr. 1784.

11. **Singh G., Chander S., Ray A.** Heat transfer characteristics of natural gas/air swirling flame impinging on a flat surface // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2012. — V. 41. — P. 165–176.
12. **Luo D. D., Zhen H. S., Leung C. W., Cheung C. S.** Premixed flame impingement heat transfer with induced swirl // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2010. — V. 53, N 19-20. — P. 4333–4336.
13. **Singh S., Chander S.** Heat transfer characteristics of dual flame with outer swirling and inner non-swirling flame impinging on a flat surface // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2014. — V. 77. — P. 995–1007.
14. **Chander S., Singh G.** Effect of helical vane swirler geometry on heat transfer characteristics for compressed natural gas/air swirling flame impinging on a flat surface // *ASME 2013 Int. Mech. Eng. Congress Expo.* — 2013. — Paper No: V08AT09A018.
15. **Singh G., Chander S.** Effect of swirl intensity on heat transfer characteristics of swirling flame impinging on a flat surface // *ASME 2013 Int. Mech. Eng. Congress Expo.* — 2013. — Paper No: V08AT09A021.
16. **Клочков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В., Соскин М. С.** Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия: справочник. — Киев: Наук. думка, 1985.
17. **Durst F., Melling A., Whitelaw J. H.** Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry. — London, U. K.: Acad. Press, 1981.
18. **Stella A., Guj G., Kompensans J., Raffel M., Richard H.** Application of particle image velocimetry to combustng flows: design considerations and uncertainty assessment // *Exp. Fluids.* — 2001. — V. 30, N 2. — P. 167–180.
19. **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.

*Поступила в редакцию 19.12.2018.*

*После доработки 29.04.2019.*

*Принята к публикации 28.08.2019.*

---