

УДК 536.46

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ПЛАМЕНИ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ ЗАКРУЧЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ МЕТОДОМ НСНО PLIF

А. С. Лобасов<sup>1,2</sup>, С. С. Абдуракипов<sup>1,2</sup>, Л. М. Чикишев<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, Alexey.Lobasov@gmail.com

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования пространственной структуры зоны химического реагирования в турбулентном потоке закрученной струи методом панорамной лазерно-индуцированной флуоресценции формальдегида. Рассмотрено горение метановоздушной смеси при атмосферном давлении и различных значениях коэффициента избытка топлива  $\phi$ : горение пламени в виде обращенного конуса при  $\phi = 0.7$  и  $1.4$  и горение поднятого пламени при  $\phi = 2.5$ . Помимо мелкомасштабных деформаций, изменение формы области химического реагирования сопряжено с двумя типами крупномасштабных когерентных структур, а именно: практически осесимметричная мода деформации фронта пламени, предположительно обусловленная действием сил Архимеда на продукты горения, и вращение асимметричной моды вследствие прецессии закрученного потока.

Ключевые слова: форма пламени в закрученной струе, когерентные структуры, панорамная лазерно-индуцированная флуоресценция, флуоресценция формальдегида, метод главных компонент.

DOI 10.15372/FGV20180602

### ВВЕДЕНИЕ

Стабилизация факела пламени в камерах сгорания газовых турбин, как правило, реализуется путем организации закрученных струй, обеспечивающих благоприятные условия для устойчивого горения [1, 2]. Исследованию структуры турбулентных течений с закруткой и горением в литературе уделяется большое внимание [3–5]. Известно, что для струйных течений с сильной закруткой характерны такие явления, как прецессия вихревого ядра струи, распад вихревого ядра, образование центральной зоны рециркуляции, формирование вторичных винтовых вихрей. В недавних работах [6–10] с использованием современных методов оптической диагностики при фазовом (условном) осреднении мгновенных распределений скорости и давления проведено исследование крупномасштабных вихревых структур в закрученной струе, измерена частота прецессии вихревого ядра. При этом роль крупномасштабных вихревых структур при возникнове-

нии нестационарных режимов горения в закрученных потоках к настоящему времени изучена недостаточно [11, 12].

Крупномасштабные вихри вызывают деформации фронта пламени, влияют на скорость тепловыделения и могут приводить к локальному погасанию пламени. Эти особенности недавно исследовались с применением комбинации метода панорамной анемометрии по изображениям частиц (particle image velocimetry, PIV) и метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (planar laser-induced fluorescence, PLIF) гидроксил-радикала [13, 14], образующегося во фронте пламени и присутствующего в продуктах горения. Для анализа данных PIV с целью идентификации когерентных структур был использован метод главных компонент [15], по аналогии с [7, 8] для изотермических и реагирующих струй с сильной закруткой и распадом вихревого ядра соответственно. В работе [13] сделан вывод, что крупномасштабные вихри способствуют перемешиванию продуктов горения с поступающей из сопла свежей смесью. С другой стороны, в работе [14] наблюдалось локальное погасание пламени в процессе его взаимодействия с крупномасштаб-

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

© Лобасов А. С., Абдуракипов С. С., Чикишев Л. М., Дулин В. М., Маркович Д. М., 2018.

ными вихрями, формирующимися в сильно закрученном потоке. Для более глубокого анализа причин возникновения нестационарных режимов горения и их динамики необходим детальный анализ деформаций зоны химического реагирования, в том числе под воздействием когерентных структур потока.

Формальдегид является интермедиатом, образующимся в низкотемпературной области фронта пламени при горении углеводородов. Его образование является первым этапом в реакции окисления  $\text{НСНО} \rightarrow \text{НСО} \rightarrow \text{СО}$  углеводородов [16]. Высокая концентрация  $\text{НСНО}$  служит хорошим маркером зоны подогрева для углеводородных пламен. Формальдегид играет важную роль в таких процессах, как окисление и самовоспламенение. Фотохимические свойства формальдегида изучены достаточно хорошо [17]. Одной из наиболее предпочтительных стратегий для проведения измерений методом  $\text{НСНО}$  PLIF является возбуждение перехода с использованием третьей гармоники Nd:YAG-лазера на длине волны 355 нм [18, 19]. Несмотря на низкую интенсивность этого перехода, энергии доступных импульсных Nd:YAG-лазеров достаточно для регистрации сигнала флуоресценции без использования специфичных перестраиваемых лазеров.

В данной работе представлены результаты исследования методом  $\text{НСНО}$  PLIF пространственной структуры области химического реагирования метановоздушного пламени в турбулентной струе с сильной закруткой потока в условиях распада вихревого ядра и наличия центральной зоны рециркуляции [8]. Акцент сделан на анализе крупномасштабных деформаций зоны химического реагирования методом главных компонент.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Изучались пламена в открытом горелочном устройстве (см. детали в [1]), которым являлось осесимметричное сужающееся сопло (с выходным диаметром  $d = 15$  мм) с расположенным внутри лопастным завихрителем. Степень закрутки, согласно определению из [1], равнялась 1.0, что существенно превышало критическое значение 0.6 для распада вихревого ядра (см. [8, 20]). Эксперименты проводились при значениях коэффициента избытка топлива в метановоздушной смеси  $\phi = 0.7, 1.4$  и 2.5. Число Рейнольдса струи, построенное по

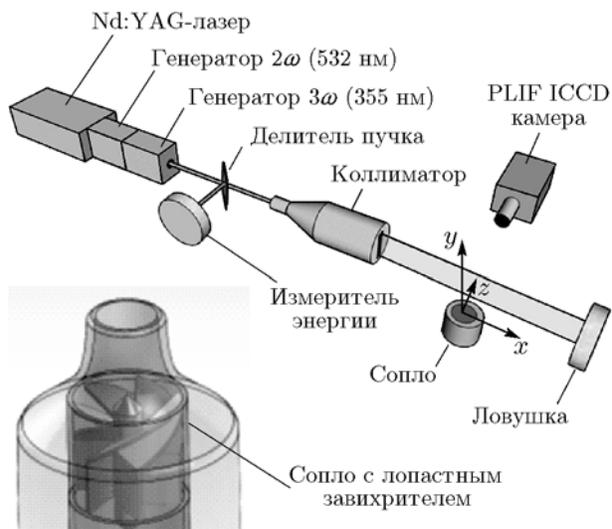


Рис. 1. Схема измерительной системы и соплового блока

среднему расходу и вязкости воздуха, составляло 5 000. Среднерасходная скорость струи без подачи топлива —  $U_0 = 5$  м/с.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Измерения методом PLIF проводились как в продольном осевом сечении, так и в поперечных сечениях потока на различных расстояниях от среза сопла (соответственно параллельно и перпендикулярно оси струи). Расстояние от среза сопла до измерительной плоскости варьировалось с помощью моторизованного координатного устройства, перемещавшего сопло вдоль вертикальной оси. Точность позиционирования составляла 100 мкм.

Для возбуждения флуоресценции  $\text{НСНО}$  использовалось излучение третьей гармоники (355 нм) импульсного Nd:YAG-лазера (Quantel Brilliant В с энергией каждого импульса 45 мДж). Возбуждался переход в полосе А–Х. Среднеквадратичное отклонение энергии лазера не превышало 5 %. Для создания лазерного ножа толщиной менее 0.8 мм в измерительной области применялась коллимирующая оптика. Сигнал флуоресценции  $\text{НСНО}$  регистрировался sCMOS-камерой (LaVision Imager Pro X, динамический диапазон 16 бит), оснащенной усилителем яркости на основе электронно-оптического преобразователя (LaVision IRO), кварцевым объективом (f# 2.8) и оптическим фильтром  $\text{НСНО}$  PLIF (LaVision). Длительность вспышки лазера составляла приблизительно 10 нс. Частота регистрации изображе-

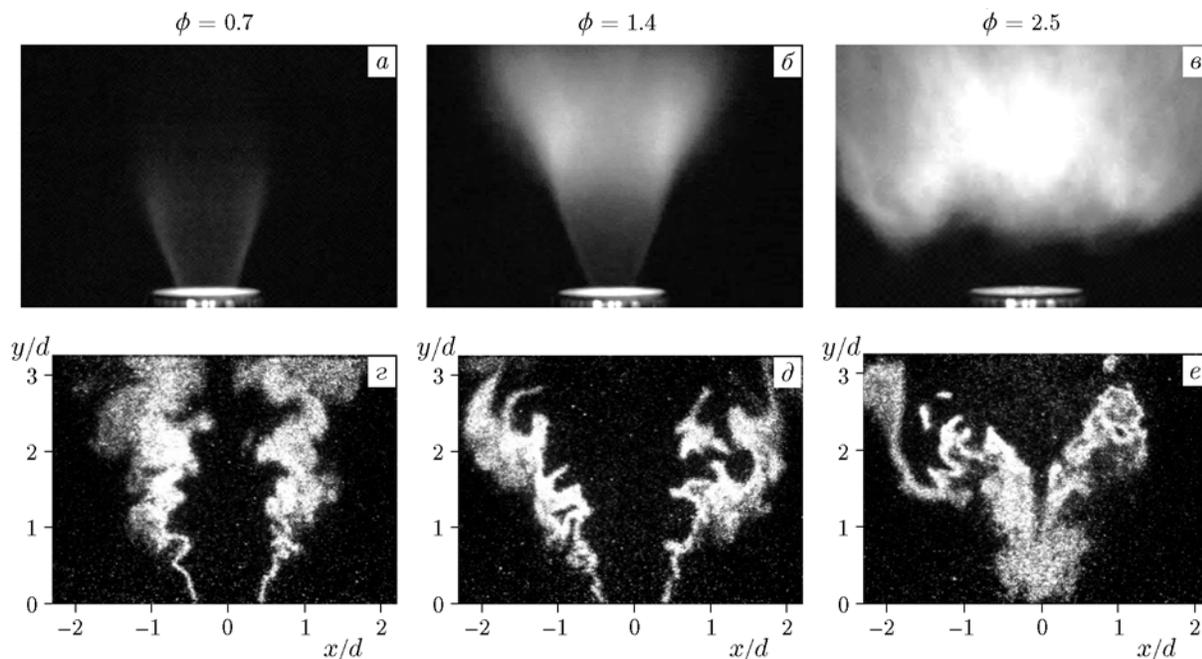


Рис. 2. Фотографии (а–в) и примеры «мгновенных» изображений флуоресценции формальдегида (г–е) в закрученном метановоздушном пламени при  $\phi = 0.7$  (а, г), 1.4 (б, д), 2.5 (в, е)

ний составляла 10 Гц, длительность экспозиции каждого кадра — 200 нс. С использованием программного обеспечения FlameMaster из полученных изображений был вычтен фоновый сигнал с последующей коррекцией неравномерности интенсивности лазерного излучения в ноже и изменений энергии лазера от импульса к импульсу, а также неоднородной пространственной чувствительности сенсора камеры.

С целью определения наиболее интенсивных когерентных структур к ансамблю из тысячи изображений для каждого типа пламени применялся метод разложения по главным компонентам. Метод реализован в виде сингулярного разложения [21]:

$$c'(X, Y, t_k) = \sum_{q=1}^{N-1} \alpha_q(t_k) \sigma_q \varphi_q(X, Y), \quad (1)$$

где

$$\int_{\Omega_{XY}} \varphi_i \varphi_j dX dY = \delta_{ij}$$

$$\text{и } \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \alpha_i(t_k) \alpha_j(t_k) = \delta_{ij}. \quad (2)$$

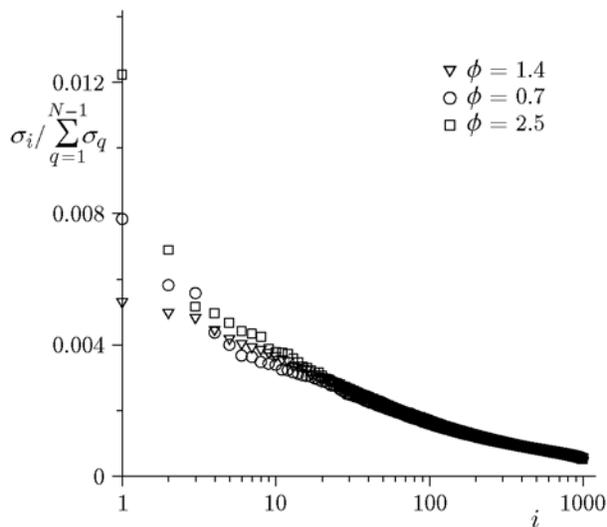


Рис. 3. Спектр главных компонент данных PLIF в аксиальной плоскости закрученного метановоздушного пламени

Здесь  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера;  $\sigma$  — сингулярные значения, квадраты которых являются собственными значениями ковариационной матрицы для анализируемых PLIF-реализаций;  $\varphi$  — пространственные распределения (моды) векторов главных компонент, являющиеся собственными векторами ковариации

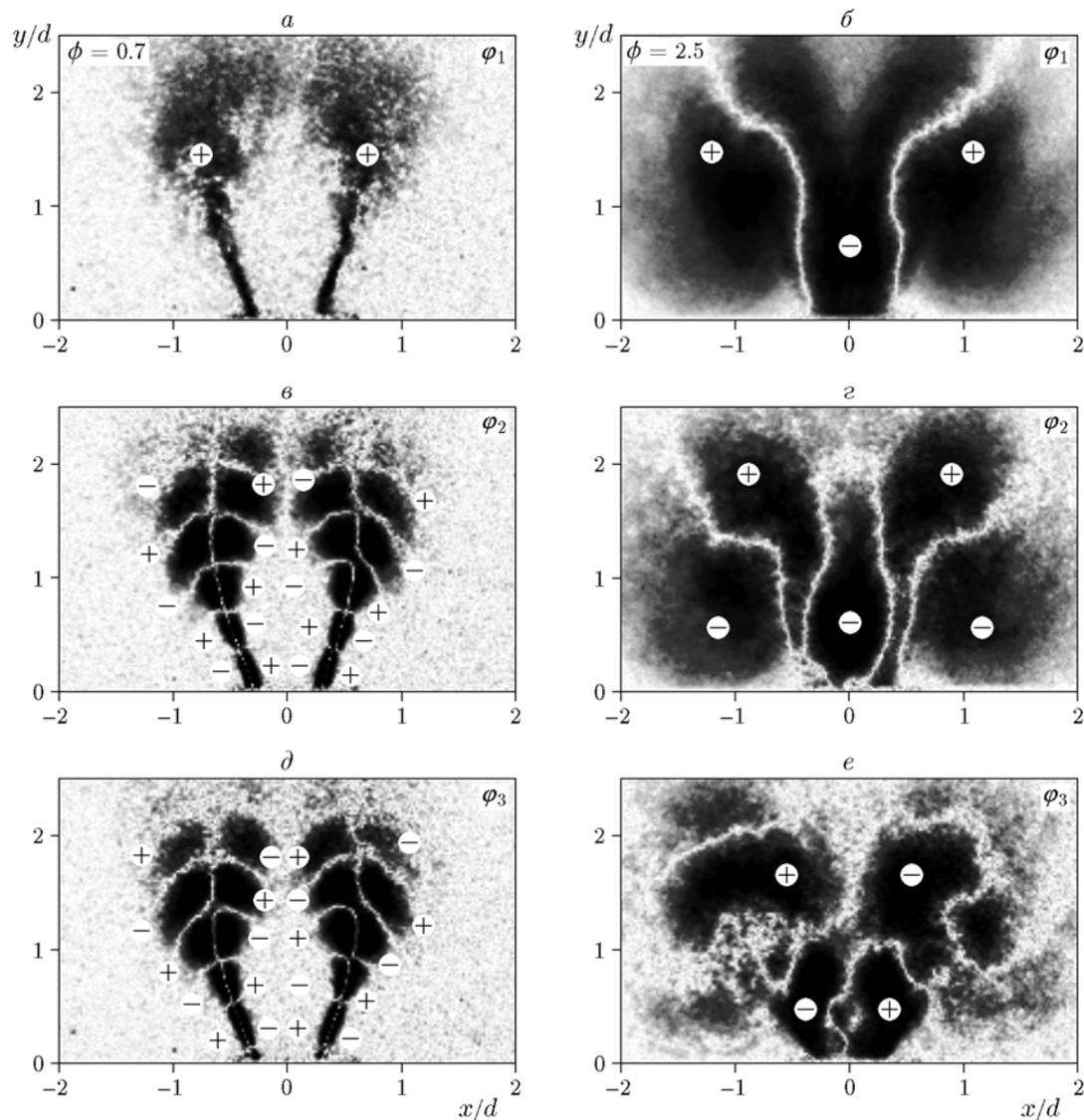


Рис. 4. Пространственные распределения первых трех мод главных компонент  $\varphi_1$  (а, б),  $\varphi_2$  (в, з),  $\varphi_3$  (д, е) данных НСНО PLIF в аксиальной плоскости закрученного метановоздушного пламени при  $\phi = 0.7$  (а, в, д) и 2.5 (б, з, е)

ционной матрицы;  $\alpha_i(t_k)$  — временные коэффициенты  $i$ -й моды, где  $t_k$  — время регистрации  $k$ -го изображения;  $X, Y$  — координаты пикселей на изображении.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены фотографии пламени (длительность экспозиции 1/15 с) и примеры «мгновенных» изображений флуоресценции формальдегида (зарегистрированные с экспозицией 200 нс). Изображения флуоресценции НСНО несут информацию о пространственной форме зоны химического реагирова-

ния в продольном сечении пламени, в то время как фотография, соответствующая проекции хемилюминесценции, демонстрирует внешний вид пламени. Шкала уровня серого фиксирована для всех PLIF-изображений.

В среднем, пламя обедненной смеси с  $\phi = 0.7$  и богатой смеси с  $\phi = 1.4$  имеет форму обращенного конуса. В соответствии с «мгновенными» кадрами, зона реакции претерпевает деформации, которые увеличиваются вниз по потоку. Более того, видны отдельные островки на некоторых «мгновенных» реализациях. Причин появления таких островков может

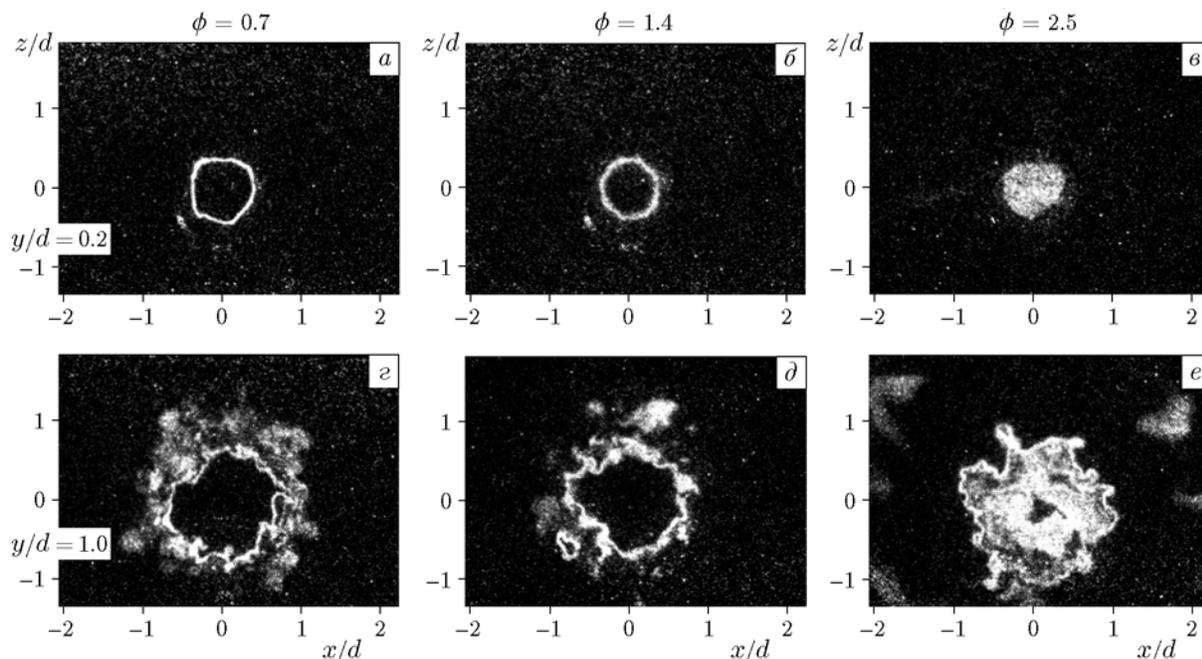


Рис. 5. Примеры «мгновенных» изображений сигнала НСНО PLIF в поперечных сечениях  $y/d = 0.2$  (а–в), 1.0 (з–е) закрученного метановоздушного пламени при  $\phi = 0.7$  (а, з), 1.4 (б, д), 2.5 (в, е)

быть две: замыкание области химического реагирования вне плоскости измерений или горение в изолированных областях, в том числе в захваченных крупномасштабными вихрями. Форма зоны химического реагирования в случае поднятого пламени (стабилизированного над кромкой сопла) богатой смеси с  $\phi = 2.5$  отличается от двух предыдущих случаев. В частности, можно наблюдать флуоресценцию формальдегида вблизи оси струи при  $y/d < 1$ . Рис. 3 демонстрирует спектр главных компонент данных PLIF в аксиальной плоскости. Для поднятого пламени богатой смеси амплитуда первой моды существенно превышает амплитуду всех остальных мод (более чем в два раза для моды  $i > 2$ ).

Пространственные распределения первых трех мод представлены на рис. 4. Для пламени бедной смеси с  $\phi = 0.7$  первая мода соответствует осцилляциям интенсивности флуоресценции в слое смещения. Форма первой моды практически симметрична относительно оси  $y$ . Вторая и третья моды соответствуют деформациям в виде волн, распространяющихся вдоль фронта пламени. В обоих случаях пространственные структуры данных мод имеют асимметричную относительно оси  $y$  форму и схожи между собой с учетом сдвига на фазовый угол

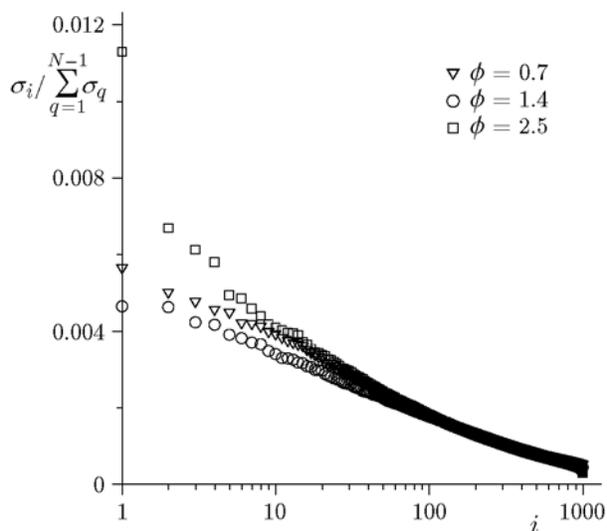


Рис. 6. Спектр главных компонент данных PLIF в поперечном сечении  $y/d = 1.5$  закрученного метановоздушного пламени

$\pi/2$ . Моды для богатого пламени с  $\phi = 1.4$  также соответствовали симметричным и асимметричным деформациям зоны реакции, нарастающим вниз по потоку, как и в случае с  $\phi = 0.7$ .

Первые две моды разложения по главным

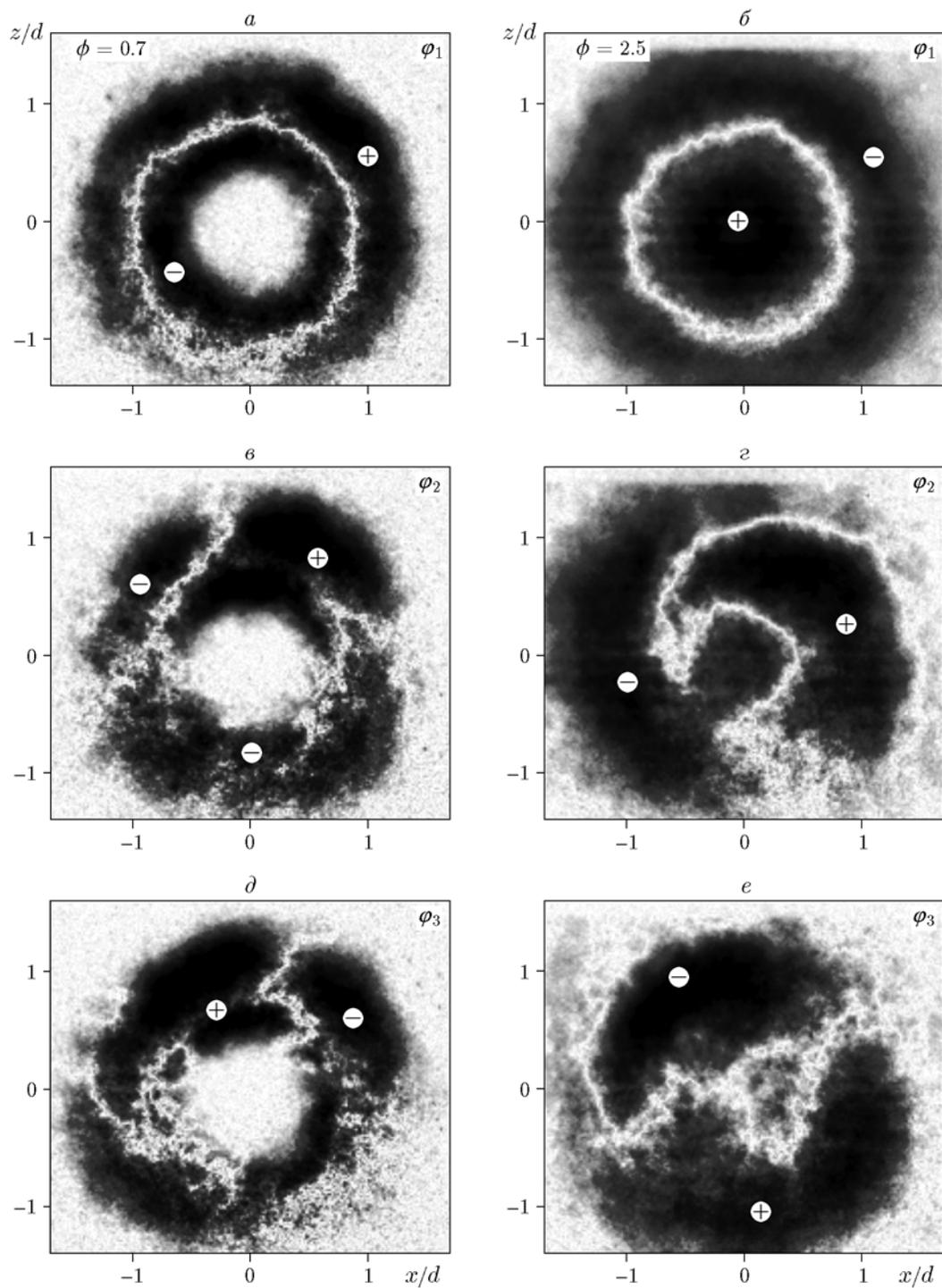


Рис. 7. Пространственное распределение первых трех мод главных компонент  $\varphi_1$  (а, б),  $\varphi_2$  (в, з),  $\varphi_3$  (д, е) данных PLIF в поперечном сечении  $y/d = 1.5$  закрученного метановоздушного пламени при  $\phi = 0.7$  (а, в, д) и 2.5 (б, з, е)

компонентам для поднятого пламени богатой смеси с  $\phi = 2.5$  соответствуют крупномасштабным, практически симметричным осцилляциям интенсивности флуоресценции вблизи оси  $y$  и в слое смещения между струей и окружающим воздухом. Третья и четвертая моды соответствуют возмущениям в виде распространяющихся вдоль струи волн, формы которых асимметричны относительно оси  $y$ .

Примеры «мгновенных» реализаций сигнала НСНО PLIF в поперечном сечении пламени на двух расстояниях от среза сопла представлены на рис. 5. Пример для поперечного сечения  $y/d = 0.2$  в случае  $\phi = 2.5$  подтверждает наличие зоны реакции на оси струи. В целом, во всех случаях поверхность зоны реакции не является осесимметричной из-за наличия деформаций. Деформации увеличиваются в размере вниз по потоку. С другой стороны, присутствуют изолированные островки областей химического реагирования, что можно наблюдать и в поперечном сечении.

Спектры главных компонент PLIF-изображений в поперечном сечении  $y/d = 1.5$  представлены на рис. 6. Наибольшая амплитуда соответствует первой моде разложения для поднятого пламени богатой смеси с  $\phi = 2.5$ . Согласно пространственному распределению, представленному на рис. 7, эта мода соответствует осесимметричной моде деформаций зоны реакции. Для смесей с  $\phi = 0.7$  и  $1.4$  первая мода разложения также соответствует осесимметричным осцилляциям зоны реакции. В случае  $\phi = 2.5$  вторая и третья моды соответствуют вращению когерентной структуры, наблюдавшейся также в работе [11]. Следует отметить, что вторая и третья моды главных компонент для каждого пламени (в рассматриваемой области) соответствует когерентной структуре, повернутой относительно оси  $y$  на  $90^\circ$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции формальдегида исследована форма области химического реагирования в пламени метановоздушных смесей в турбулентном потоке закрученной струи с распадом вихревого ядра и прецессией. Для определения когерентных структур, возникающих при деформации фронта пламени, измеренные наборы «мгновенных» реализаций были разложены по главным компонентам. Для исследо-

ванных режимов горения в форме обращенного конуса (пламя бедной и богатой смесей с коэффициентом избытка топлива  $\phi = 0.7$  и  $1.4$  соответственно) и в виде поднятого пламени ( $\phi = 2.5$ ) помимо неустойчивости фронта пламени обнаружены два типа крупномасштабных когерентных структур в процессе деформации области химического реагирования: практически осесимметричная мода деформации фронта пламени, предположительно обусловленная действием сил Архимеда на продукты горения [8, 22], и вращение асимметричной моды вследствие прецессии закрученного потока.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N.** Swirl Flows. — Tunbridge Wells, Kent, England: Abacus Press, 1984.
2. **Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н.** Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. — М.: Энергомаш, 2000.
3. **Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л.** Введение в теорию концентрированных вихрей. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003.
4. **Митрофанова О. В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями (аналитический обзор) // Теплофизика высоких температур. — 2003. — Т. 41, № 4. — С. 587–633.
5. **Вараксин А. Ю.** Воздушные и огненные концентрированные вихри: физическое моделирование (обзор) // Теплофизика высоких температур. — 2016. — Т. 54, № 3. — С. 430–452.
6. **Cala C. E., Fernandes E. C., Heitor M. V., Shtork S. I.** Coherent structures in unsteady swirling jet flow // Exp. Fluids. — 2006. — V. 40, N 2. — P. 267–276.
7. **Oberleithner K., Sieber M., Nayeri N., Paschereit C. O.** 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.
8. **Alekseenko S. V., Dulin V. M., Kozorezov Y. S., Markovich D. M.** Effect of high-amplitude forcing on turbulent combustion intensity and vortex core precession in a strongly swirling lifted propane/air flame // Combust. Sci. Technol. — 2012. — V. 184, N 10-11. — P. 1862–1890.
9. **Крашенинников С. Ю., Миронов А. К., Пудовиков Д. Е., Токталиев П. Д.** Исследование образования звуковых волн, создаваемых турбулентными струями // Изв. РАН. МЖГ. — 2015. — № 3. — С. 68–86.

10. **Литвинов И. В., Шараборин Д. К., Шторк С. И.** Определение параметров винтовой симметрии нестационарного вихревого течения на основе фазово-осредненных PIV измерений // Теплофизика и аэромеханика. — 2015. — Т. 22, № 5. — С. 673–677.
11. **Syred N. A.** Review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // Progr. Energy Combust. Sci. — 2006. — V. 32, N 2. — P. 93–161.
12. **Lieuwen T. C.** Unsteady combustor physics. — Cambridge University Press, 2012.
13. **Stöhr M., Sadanandan R., Meier W.** Phase-resolved characterization of vortex-flame interaction in a turbulent swirl flame // Exp. Fluids. — 2011. — V. 51, N 4. — P. 1153–1167.
14. **Boxx I., Stöhr M., Carter C., Meier W.** Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor // Combust. Flame. — 2010. — V. 157, N 8. — P. 1510–1525.
15. **Sirovich L.** Turbulence and the dynamics of coherent structures. I. Coherent structures // Quart. Appl. Math. — 1987. — V. 45, N 3. — P. 561–571.
16. **Glassman I.** Combustion. — 3rd ed. — San Diego: Academic Press, 1996.
17. **Brackmann C., Nygren J., Bai X., Li Z., Bladh H., Axelsson B., Denbratt I., Koopmans L., Bengtsson P.-E., Alden M.** Laser-induced fluorescence of formaldehyde in combustion using third harmonic Nd:YAG laser excitation // Spectrochim. Acta. A. — 2003. — V. 59, N 14. — P. 3347–3356.
18. **Harrington J. E., Smyth K. C.** Laser-induced fluorescence measurements of formaldehyde in methane/air diffusion flame // Chem. Phys. Lett. — 1993. — V. 202, N 3-4. — P. 196–202.
19. **Brackmann C., Li Z., Rupinski M., Docquier N., Pengloan G., Alden M.** Strategies for formaldehyde detection in flames in engines using a single-mode Nd:YAG/OPO laser system // Appl. Spectrosc. — 2005. — V. 59, N 6. — P. 763–768.
20. **Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M., Hanjalić K.** Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // Phys. Fluids. — 2014. — V. 26, N 6. — 065109.
21. **Kerschen G., Golinval J. C., Vakakis A. F., Bergman L. A.** The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: an overview // Nonlin. Dyn. — 2005. — V. 41, N 1. — P. 147–169.
22. **Abdurakipov S. S., Dulin V. M., Markovich D. M., Hanjalic K.** Determining instability modes in a gas flame // Tech. Phys. Lett. — 2013. — V. 39. — P. 308–311.

*Поступила в редакцию 16/VIII 2017 г.,  
в окончательном варианте — 6/III 2018 г.*