



*Тринадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 29 июня— 03 июля 2015 г.*

УДК 536.461

М.П. Токарев<sup>1,2</sup>, Л.А. Козинкин<sup>1</sup>, Д.К. Шараборин<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, Россия, 630090,  
Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, E-mail: l.chikishev@gmail.com*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Россия, 630090,  
Новосибирск, Пирогова ул., 2.*

**АНАЛИЗ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ЗАКРУЧЕННОМ ПЛАМЕНИ НА ОСНОВЕ  
ИЗМЕРЕНИЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИМ PIV МЕТОДОМ**

**АННОТАЦИЯ**

Общепринято, что спиральные вихревые структуры, формирующиеся в закрученных потоках интенсифицируют процессы смешения по сравнению с прямоточными струями. Однако, влияние этих структур (включая прецессирующее вихревое ядро) на стабилизацию пламени является открытым вопросом. В настоящее время методы измерения поля скорости в объеме потока позволяют существенно продвинуться в ответе на этот вопрос. Целью настоящей работы является прямое экспериментальное исследование трехмерной структуры потока в открытой закрученной турбулентной струе и предварительно-перемешанном метано-воздушном пламени при помощи томографического PIV метода.

**ОПТИЧЕСКАЯ МАЛОРАКУРСНАЯ ТОМОГРАФИЯ, КРУПНОМАСШТАБНЫЕ  
ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ, ПРЕЦЕССИРУЮЩЕЕ ВИХРЕВОЕ ЯДРО, ЗАКРУЧЕННОЕ  
ПЛАМЯ**

**ВВЕДЕНИЕ**

Закрутка потока часто используется для стабилизации пламени, в особенности при таких неблагоприятных условиях как ультра-бедная смесь вблизи предела погасания. Сильная закрутка приводит к распаду вихря и формированию центральной зоны рециркуляции для  $S > 0,6$ , где  $S$  – параметр закрутки, определенный согласно [1].

Спиральные вихри доминируют в слое смешения струи при достаточно большой степени закрутки потока [6, 7]. Дальнейшее увеличение числа закрутки приводит к распаду вихревого ядра струи [1, 8, 9], который часто сопровождается прецессией вихревого ядра. Так как распад и прецессия вихревого ядра являются доминирующими в потоке, структура потока сильно-закрученных струй с пузырьковым типом распада вихря обладает общими чертами, даже для сопел различной геометрии. Основываясь на результатах PIV экспериментов, а также численном моделировании авторы работ [10] и [11] заключили, что прецессия вихревого ядра в сильно-закрученной струе является результатом роста глобальной спиральной моды неустойчивости  $|m| = 1$  в абсолютно неустойчивой струе с изначально симметричной зоной рециркуляции, которая возникает вследствие центробежной неустойчивости закрученной струи после внезапного расширения. Они также обнаружили, что установившийся пузырьковый тип распада вихря сопровождается наличием двух

вихревых спиралей во внешнем и внутреннем слоях смещения вниз по потоку. Эти два противоположно-направленно вращающихся вихря образуют двойную прецессирующую спиральную структуру. Также, основываясь на фазовом осреднении сильно-закрученной турбулентной струи авторы [12] идентифицировали трехмерные когерентные структуры, состоящие из пары вторичных спиральных вихрей, вызванных прецессией вихревого ядра. Один спиральный вихрь располагался внутри вихревого ядра, другой был индуцирован во внешнем слое смещения. Авторы работы [13] использовали метод главных компонент [14] при анализе PIV данных, чтобы восстановить фазовый портрет квазипериодического прецессирующего вихревого ядра и когерентных спиральных вихрей во внешнем и внутреннем слоях смещения закрученной турбулентной струи. В работе [15] было обнаружено совпадение низкоразмерной реконструкции по первым двум главным компонентам с результатами линейного анализа устойчивости осредненного по времени распределения поля скорости. Эти результаты важны для более глубокого понимания и предсказания таких нежелательных явлений в энергетике и транспортных системах, как срыв и проскок пламени в камерах сгорания, термо-акустический резонанс.

Однако, эта концепция тройной вихревой структуры требует подтверждения без привлечения дополнительных гипотез. Фундаментальная проблема связана с необходимостью измерения трехмерных полей мгновенной скорости в объеме, захватывающем всю область течения, включающую спиральные вихри. С 2006 года начали появляться работы по развитию и применению 3D расширения метода PIV при использовании нескольких камер и восстановлении трехмерного изображения методом малоракурсной оптической томографии, которые в настоящее время получают широкое распространение. Целью настоящей работы является исследование трехмерной вихревой структуры в открытой закрученной турбулентной струе и пламени томографическим методом измерения скорости в объеме потока.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Изотермический поток и пламя были организованы соплом с выходным диаметром 15 мм. Среднерасходная скорость воздуха составляла 5 м/с. Внутри сопла располагался завихритель лопаточного типа. Степень закрутки определялась согласно [1] исходя из геометрии завихрителя. Для проведения измерений в поток добавлялись твердые частицы  $Al_2O_3$  средним диаметром 4 мкм. В случае реагирующего течения коэффициент стехиометрии метано-воздушной смеси составлял  $\phi = 0,7$ . Для достижения приемлемой точности и пространственного разрешения при измерениях в пламени использовался набор из 8 камер (фото на рис. 1).

Камеры нижнего ряда (ImperX IGV-B2020) располагались горизонтально под углами  $-35^\circ$ ,  $-11^\circ$ ,  $11^\circ$  и  $35^\circ$ . Камеры верхнего ряда (ImperX IGV-B4820), располагавшиеся в верхнем ряду наблюдали поток под теми же углами в горизонтальной плоскости, но ненулевыми углами в вертикальной плоскости ( $-18^\circ$  и  $-22^\circ$  для центральных и боковых камер соответственно). Камеры были оснащены объективами (SIGMA AF 50 mm F2,8 EX DG Macro) и узкополосными оптическими фильтрами (532 нм, Edmund Optics). Поток освещался второй гармоникой двойного импульсного Nd:YAG лазера (Quantel EverGreen 200) с энергией каждого импульса в 200 мДж. Для увеличения интенсивности засветки измерительного объема использовалась многопроходная схема для лазерного пучка [2, 3] Глубина объема засветки составляла 45 мм, однако трассеры поступали только из сопла. Для каждого объектива устанавливалась минимальная апертура диафрагмы (#32), чтобы обеспечить достаточно большую глубину резкости в измерительном объеме размером  $35 \times 35 \times 40$  мм без применения коррекции Шеймпфлюга. Разрешение каждого изображения составляло 4 Мпикс.

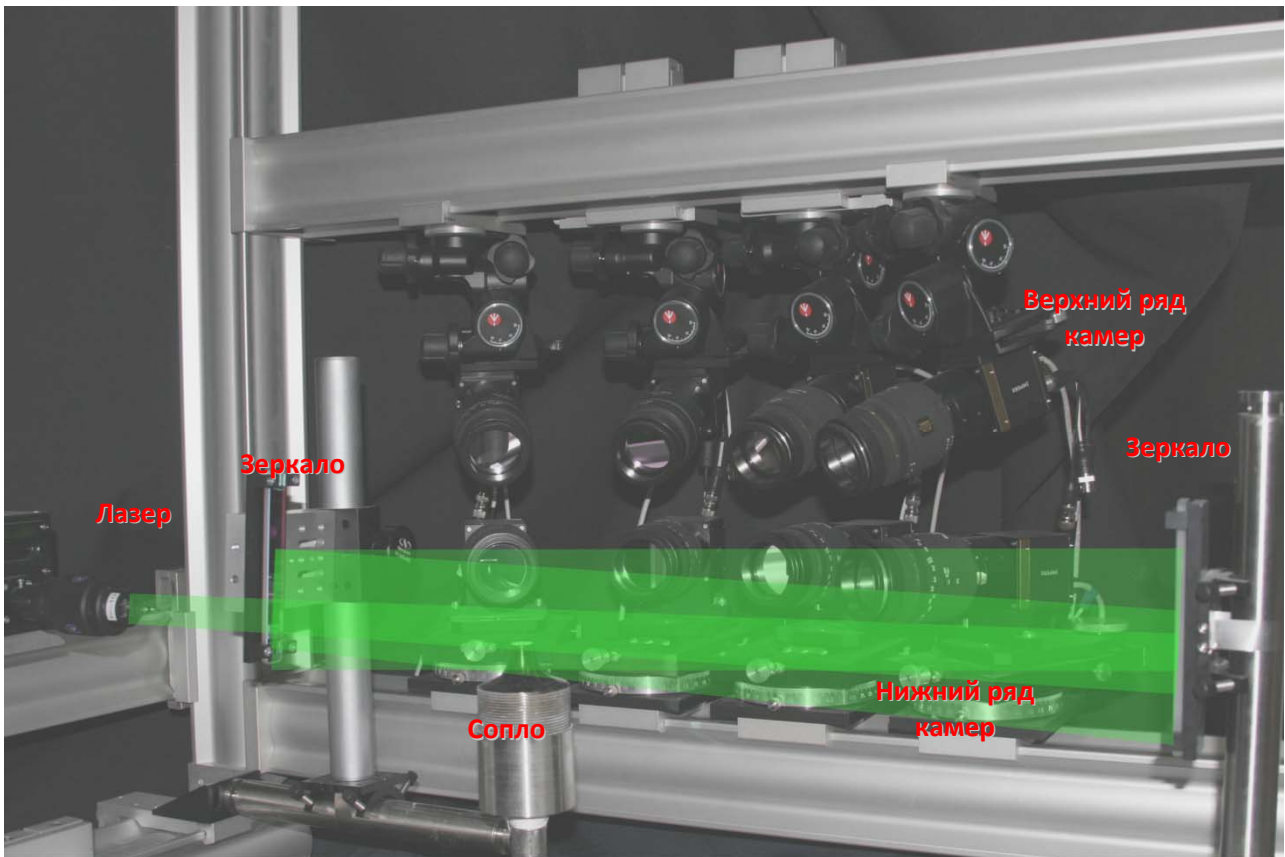


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки и схема прохождения лазерного пучка

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ

3D изображения реконструировались и обрабатывались при помощи гибридной CPU-GPU реализации алгоритмов реконструкции MLOS-SMART (15 итераций) и MTE [4]. Для вычислений использовалась серверная станция с двумя процессорами (AMD Opteron processors 6274, 2200 МГц, всего 32 ядра) и графическим процессором NVIDIA Tesla C2075. На рис. 2 показана интенсивность 3D изображения осредненная по направлениям  $z$  и  $x$  для изотермической струи. Максимум интенсивности соответствует первому прохождению лазерного пучка через измерительный объем и расположен вне струйного течения. Как можно видеть контраст существенно улучшается, когда для реконструкции используются все 8 камер. Нормированные отклонения интенсивности [5] 3D изображения для этого случая составляют 18,5 и 12 для 8 и 4 камер соответственно.

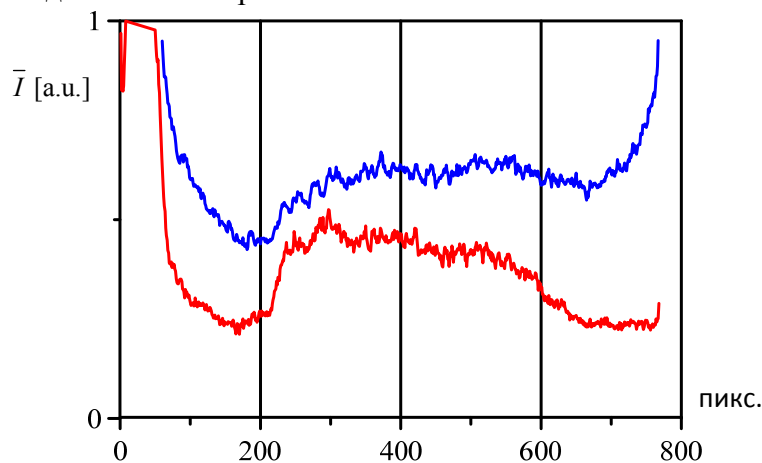


Рис. 2. Интенсивность 3D изображений осредненная по осям  $z$  и  $x$  для реконструкции по 8 (красная линия) и 4 камерам (синяя линия)

Для определения трехмерного поля скорости использовалась процедура с деформацией и непрерывным смещением расчетной области. Конечный размер расчетного объема составлял  $40^3$  с перекрытием 75 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Осредненные по 35 снимкам и мгновенные 3D поля скорости для сильно-закрученной изотермической струи представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Представлены данные, полученные с применением всех восьми камер. Вертикальное сечение и центральная зона рециркуляции (область отрицательных значений  $U_z$  ограничена светло-голубой поверхностью) показаны на рис. 3, а. На рис. 3, б представлены горизонтальные сечения и две изоповерхности положительных значений  $Q$ -критерия (оттенки серого) и квадрат аксиальной компоненты завихренности  $\Omega_z^2$  (светло-красный).

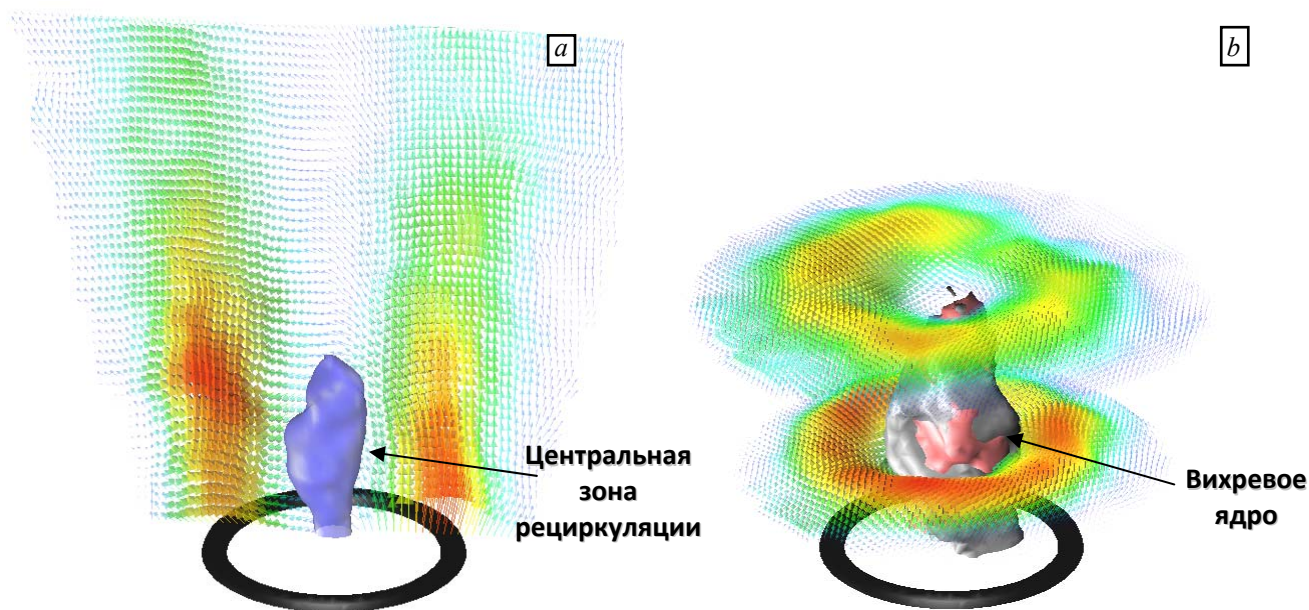


Рис. 3 Осредненное 3D поле скорости в изотермической сильно-закрученной струе ( $Re = 5000$ ,  $S = 1.0$ ). (a) Центральная зона рециркуляции показана изоповерхностью  $U_z = 0$ . (b) Вихревое ядро визуализировано положительным  $Q$ -критерием и  $\Omega_z^2$

Данные, полученные в результате дифференцирования, сглажены Гауссовым фильтром  $5 \times 5 \times 5$  с полной шириной 40 вокселей на полувысоте.  $Q$ -критерий, предложенный в работе [16], весьма полезен для визуализации крупномасштабных трехмерных вихревых структур на полях мгновенной скорости, в то время как компонента завихренности необходима для обозначения вихревого ядра закрученной струи. Горизонтальные сечения показывают, что во всем измерительном объеме томографический метод хорошо разрешает направление вращения потока, а именно, кольцевое закрученное течение вокруг зоны рециркуляции.

При анализе мгновенных полей скорости и распределения  $Q$ -критерия для изотермического потока было обнаружено, что большинство реализаций включают три вытянутых участка крупномасштабных вихревых структур. Один спиральный вихрь присутствовал во внешнем слое смешения. Другой спиральный вихрь вокруг зоны обратного течения, т.е. во внутреннем слое смешения. Кроме того, присутствовал третий вихрь в области с отрицательным значением аксиальной скорости. Этот вихрь был идентифицирован как ядро закрученной струи.



Мгновенные поля скорости для реагирующего течения представлены на Рис. 5. Размер центральной зоны рециркуляции уменьшился и она сместилась вниз по потоку. Это возможно вызвано существенным эффектом сглаживания кольцевой закрученной струи вблизи выхода из сопла. Напротив, визуализация крупномасштабных вихревых структур при помощи  $Q$ -критерия показывает их наличие только вблизи выхода из сопла. Это объясняется тем, что дынные критерий не учитывает плотность среды. Таким образом фиксированный порог этого критерия приводит к систематической ошибке. Тем не менее, двойная вихревая структура, состоящая из двух спиральных вихрей (один во внутреннем сдвиговом слое, другой снаружи пламени) может быть разрешена.

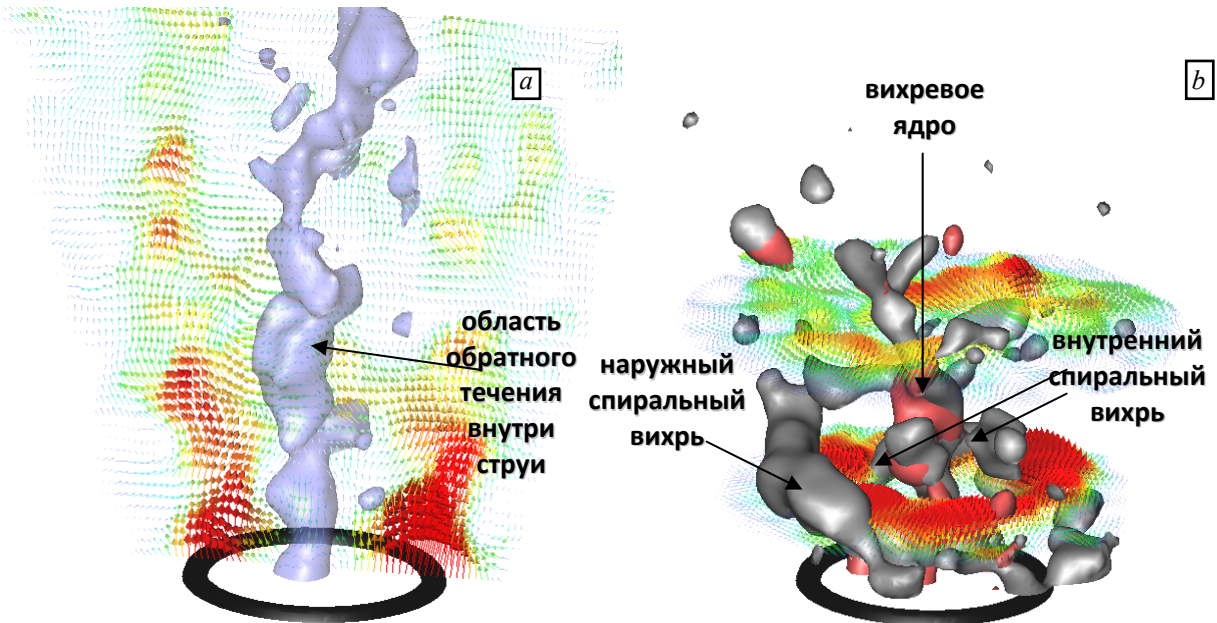


Рис. 4. Сечения 3D поля мгновенной скорости в изотермической сильно-закрученной струе ( $Re = 5000$ ,  $S = 1.0$ ). (a) Центральная зона рециркуляции показана поверхностью  $u_z = 0$ . (b) Вихри визуализированы положительным значением  $Q$ -критерия и  $\omega_z^2$

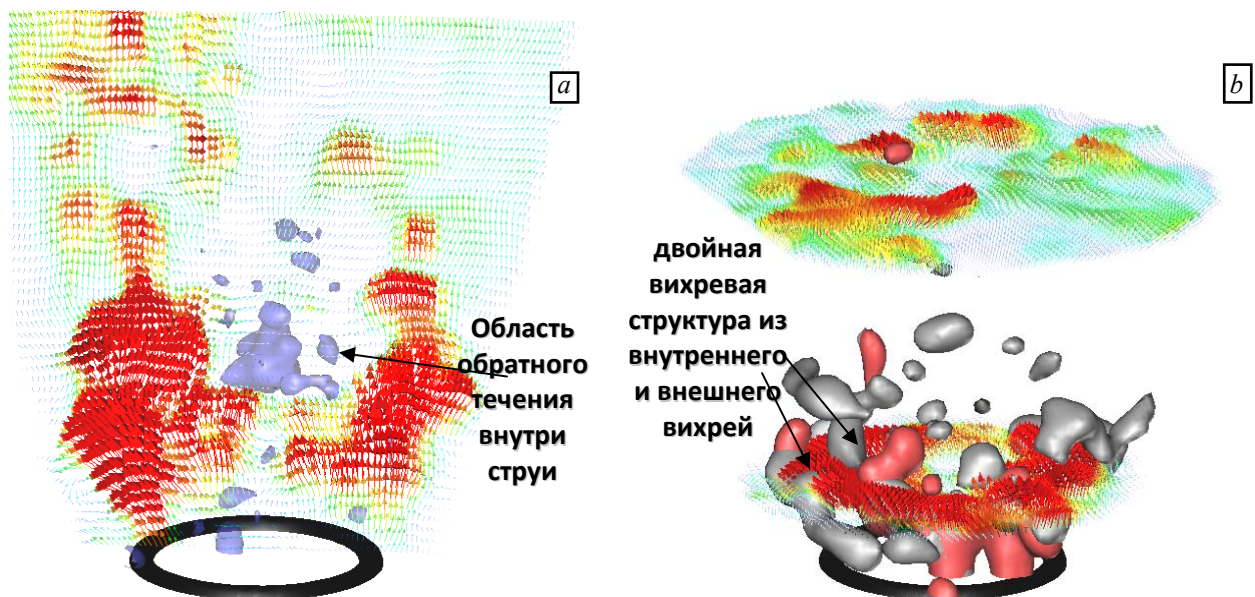


Рис. 5. Сечения мгновенных 3D распределений скорости в сильно-закрученном метано-воздушном пламени ( $Re = 5000$ ,  $\varphi = 0,7$ ,  $S = 1,0$ ). (a) Центральная зона рециркуляции показана поверхностью  $u_z = 0$ . (b) Вихри визуализированы положительным значением  $Q$ -критерия и  $\omega_z^2$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом томографического PIV с использованием системы из 8 камер была исследована структура течения изотермической закрученной струи с распадом вихревого ядра и пламени обедненной метано-воздушной смеси. Для каждого течения были измерены по 35 полей мгновенной скорости в объеме потока.

Измерения показали, что для сильно-закрученных изотермических потоков вихревое ядро совпадало с парой противоположно вращавшихся относительно друг друга спиральных вихрей. Направление завивки каждого спирального вихря в этой паре, а также завивки всей двойной спиральной вихревой структуры было противоположно направлению вращения потока. При этом вихри конвективно сносились потоком, и двойная спиральная структура вращалась в направлении закрутки струи. Двойная вихревая структура была также обнаружена и в случае закрученного пламени.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-29-00203 в НГУ, руководитель профессор Кемал Ханхялич)

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Re – число Рейнольдса

$\phi$  – коэффициент стехиометрии топливо-воздушной смеси

S – степень закрутки потока

$u_z$  – мгновенная аксиальная скорость

$U_z$  – средняя аксиальная скорость

$\omega_z^2$  – квадрат мгновенной аксиальной компоненты завихренности

$\Omega_z^2$  – квадрат средней аксиальной компоненты завихренности

PIV – панорамная анемометрия по изображениям частиц

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N.** Swirl flows // Tunbridge Wells, Kent, England, Abacus Press, 1984, P. 488. – Vol. 1.
2. **Schröder A., Geisler R., Elsinga G. E., Scarano F., & Dierksheide U.** Investigation of a turbulent spot and a tripped turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV // Experiments in Fluids. – 2008. – Vol. 44. – No. 2. – P. 305-316.
3. **Ghaemi S., Scarano F.** Multi-pass light amplification for tomographic particle image velocimetry applications // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21. – No. 12. – P. 127002.
4. **Novara M., Batenburg K. J., Scarano F.** Motion tracking-enhanced MART for tomographic PIV // Measurement Science and Technology. – 2010. – T. 21. – No. 3. – C. 035401.
5. **Novara M., Scarano F.** Performances of motion tracking enhanced Tomo-PIV on turbulent shear flows // Experiments in fluids. – 2012. – Vol. 52. – No. 4. – P. 1027-1041.
6. **Gallaire F., Chomaz J.** Mode selection in swirling jet experiments: a linear stability analysis // Journal of Fluid Mechanics. – 2003. – Vol. 494. – P. 223-253.
7. **Loiseleux T., Chomaz J. M.** Breaking of rotational symmetry in a swirling jet experiment // Physics of Fluids (1994-present). – 2003. – Vol. 15. – No. 2. – P. 511-523.

8. **Leibovich S.** The structure of vortex breakdown // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1978. – Vol. 10. – No. 1. – P. 221-246.
9. **Lucca-Negro O., O'doherty T.** Vortex breakdown: a review // Progress in energy and combustion science. – 2001. – Vol. 27. – No. 4. – P. 431-481.
10. **Ruith M. R. et al.** Three-dimensional vortex breakdown in swirling jets and wakes: direct numerical simulation // Journal of Fluid Mechanics. – 2003. – Vol. 486. – P. 331-378.
11. **Liang H., Maxworthy T.** An experimental investigation of swirling jets // Journal of Fluid Mechanics. – 2005. – Vol. 525. – P. 115-159.
12. **Cala C. E. et al.** Coherent structures in unsteady swirling jet flow // Experiments in Fluids. – 2006. – Vol. 40. – No. 2. – P. 267-276.
13. **Legrand M. et al.** Atmospheric low swirl burner flow characterization with stereo PIV // Experiments in fluids. – 2010. – Vol. 48. – No. 5. – P. 901-913.
14. **Holmes P., Lumley J. L., Berkooz G.** Turbulence, coherent structures, dynamical systems and symmetry. – Cambridge university press, 1998.
15. **Oberleithner K. et al.** Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: stability analysis and empirical mode construction // Journal of Fluid Mechanics. – 2011. – Vol. 679. – P. 383-414.
16. **Jeong J., Hussain F.** On the identification of a vortex // J. Fluid Mech., 1995, Vol. 285, pp. 69–94

M.P. Tokarev<sup>1,2</sup>, L.A. Kozinkin<sup>1</sup>, D.K. Sharaborin<sup>1,2</sup>, L.M. Chikishev<sup>1,2</sup>, V.M. Dulin<sup>1,2</sup>, D.M. Markovich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Kutateladze Institute of Thermophysics, Russia, 630090,*

*Novosibirsk, Ak. Lavrentyev Avenue, 1, E-mail: l.chikishev@gmail.com*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University, Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova Street, 2.*

## VORTICAL STRUCTURES ANALYSIS IN SWIRLING FLAME USING TOMOGRAPHIC PIV

*It is recognized that helical vortices are formed in swirling jet flows and promote mixing in comparison to the jets without swirl. However, influence of these vortices (including precessing vortex core) on stabilization of flames is not completely understood. Developing nowadays volumetric velocimetry techniques can provide deeper insight into this issue. The aim of the present study is to directly investigate 3D vortex structure in an open swirling turbulent jet and premixed methane-air flame by using a tomographic PIV system.*

OPTICAL TOMOGRAPHY, LARGE-SCALE VORTICAL STRUCTURES, PRECESSING VORTEX CORE, SWIRLING FLAME