



УДК 534.413: 536.46

*В.М. Дулин, Ю.С. Козорезов, Д.М. Маркович*

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

## **STEREO PIV ДИАГНОСТИКА ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАМЕН**

*Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния крупномасштабных вихрей на турбулентную структуру потока в предварительно перемешанных пропано-воздушных прямооточных и закрученных пламенах при помощи бесконтактного оптического метода Stereo PIV (Particle Image Velocimetry). Для характерных режимов горения измерены ансамбли полей мгновенной скорости, по которым рассчитаны пространственные распределения мгновенной завихренности, средней скорости и компонент кинетической энергии турбулентности.*

### **PIV, ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЛАМЯ, КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ**

**1. ВВЕДЕНИЕ.** Турбулентные струйные течения, в том числе с наложенной закруткой потока, широко распространены во множестве технических приложений, в частности, применение закрутки является одним из наиболее эффективных способов повышения устойчивости горения пламени. Однако даже изотермические закрученные струи имеют сложную структуру: в слое смешения слабозакрученных струй возникают осесимметричные и спиралевидные вихри [1]; для сильнозакрученных струй, после превышения некоторого критического числа крутки, характерно возникновение распада вихревого ядра [2], имеющего сложную пространственную структуру. Очевидно, что наличие горения в турбулентной закрученной струе еще больше усложняет характер течения и приводит к возникновению большого разнообразия режимов. Данная работа представляет результаты экспериментального исследования роли крупномасштабных вихревых структур в турбулентных прямооточных и закрученных пламенах при горении предварительно перемешанных компонент топлива и воздуха.

**2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Объектами исследования являлись прямооточные и закрученные пламена при горении предварительно перемешанных компонент топлива (пропана) и воздуха. Для создания закрученного потока во внутреннюю область профилированного сопла был помещён завихритель. Число закрутки  $S$  определялось на основе геометрических параметров завих-

рителя с некоторым углом наклона лопастей и равнялось  $S = 0,41$  и  $1,0$ . Для измерений мгновенной скорости потока использовалась Stereo PIV система «ПОЛИС», состоящая из сдвоенного импульсного лазера Nd:YAG, двух CCD камер и синхронизирующего процессора. Для анализа формы и положения фронта пламени использовалась Intensified CCD камера. Управление системой, сбор, хранение и обработка данных осуществлялись при помощи компьютера с программным обеспечением «ActualFlow». Поток засеивался частицами оксида алюминия (средний диаметр 3 мкм) и освещался лазерным ножом в центральном сечении. Для формирования лазерного ножа использовались фокусирующая и цилиндрическая линзы. Для регистрации частиц, рассеивающих лазерное излучение (532 нм), использовались узкополосные оптические фильтры.

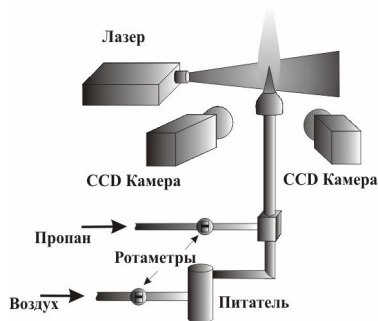
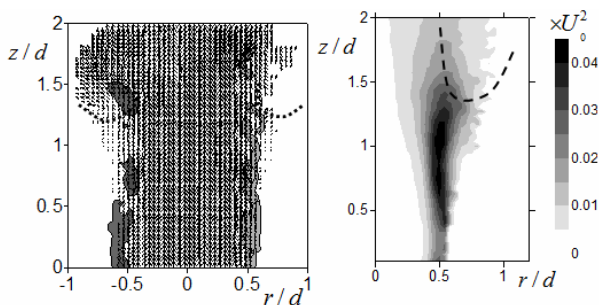


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

**3. РЕЗУЛЬТАТЫ.** На рис. 2 представлен пример мгновенного поля скорости и пространственное распределение аксиальной компоненты кинетической энергии турбулентности для подвешенного прямооточного пламени ( $\Phi = 2,0$ ) при  $Re = 4100$ . Фронт пламени (пунктирная линия на рис. 2, а) определялся на базе анализа изображений химической люминесценции радикала  $\text{CN}^*$  с экспозицией в 100 мкс. Для данного режима фронт представляет собой нижнюю часть тора и колеблется на расстоянии  $z/d = 1,3$  от среза сопла.

Рис. 2. Поля мгновенной скорости и завихренности (а) и пространственное распределение аксиальной компоненты КЭТ (б) для подвешенного пламени при  $S = 0$ ;  $Re = 4100$ ;  $\Phi = 2,0$



Было установлено, что величина турбулентных пульсаций, определяющаяся в основном интенсивностью кольцевых вихрей, выше границы пламени значительно уменьшается вследствие термического расширения, в то

время как перед границей она больше по сравнению с изотермическим потоком при тех же условиях (не приведено в тезисах). На основе полученной информации был сделан вывод, что несколько большая интенсивность вихрей до фронта пламени является следствием воздействия акустических пульсаций давления, вызванных деформацией фронта пламени, на развитие неустойчивости в изотермическом слое смешения струи до зоны реакции.

На рис. 3 в качестве примера представлены измеренные пространственные распределения мгновенной скорости и завихренности, а также аксиальной компоненты кинетической энергии турбулентности для закрученного ( $S = 1,0$ ) подвешенного пламени. Можно наблюдать, что для мгновенной картины течения характерно наличие крупномасштабных вихрей, создающих область высоких значений интенсивности турбулентных пульсаций как во внутреннем (за счет наличия зоны рециркуляции, характерной для распада вихревого ядра), так и во внешнем слоях смешения струи.

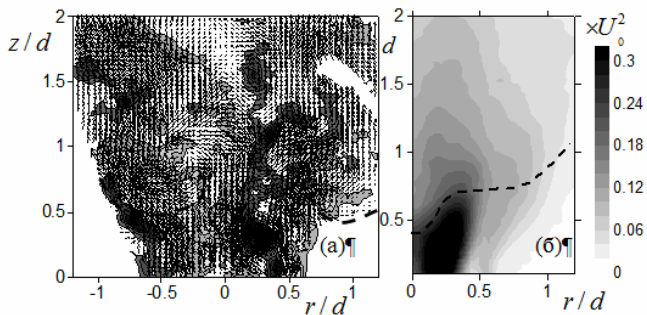


Рис. 3. Поля мгновенной скорости и завихренности (а), пространственное распределение аксиальной компоненты КЭТ (б) для подвешенного закрученного пламени при  $S = 1$ ;  $Re = 4100$ ;  $\Phi = 2,3$

Анализ структуры крупномасштабных вихрей показал, что она хорошо согласуется со структурой изотермической струи, описанной в работе [1], для той же геометрии сопла. Очевидно, помимо непрерывного множества мод турбулентных пульсаций, в потоке присутствует пара наиболее выраженных спиралевидных вихрей, вызванных прецессией вихревого ядра [3]. Один вихрь расположен во внешнем слое смешения, тогда как другой, имеющий противоположный знак, находится внутри зоны рециркуляции. В целом для сильнозакрученного подвешенного пламени, так же как и для незакрученного, наблюдалось резкое подавление вихрей при прохождении потока через фронт пламени. Таким образом, стабилизация фронта пламени в подвешенных режимах горения происходит вблизи областей наиболее интенсивных турбулентных пульсаций, вызванных прохождением крупномасштабных вихрей, развивающихся в «холодном» потоке до фронта и увеличивающих скорость распространения пламени, тем самым стабилизируя его. С другой стороны, взаимодействие крупномасштабных вихрей с фронтом пламени приводит к интенсивным акустическим пульсациям. В частности, в

радиусе одного метра уровень акустического шума составлял 83 и 93 дБ для незакрученного и закрученного подвешенных пламен соответственно. Для закрученных обедненных режимов горения область обратного течения гораздо менее выражена. Для таких пламен, кроме того, наблюдается низкий уровень пульсаций скорости внутри зоны рециркуляции, что указывает на подавление прецессии вихревого ядра струи.

**4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что крупномасштабные вихревые образования играют ключевую роль в формировании структуры турбулентных прямооточных и закрученных пламен. Для прямооточного подвешенного пламени взаимодействие фронта пламени с квазипериодическими вихрями соответствует нелинейному механизму стабилизации пламени за счет генерации акустических волн, приводящих к более интенсивному развитию турбулентных пульсаций на начальном участке струи и к повышению скорости распространения пламени. Как для закрученных, так и для прямооточных пламен при больших числах Рейнольдса показано, что фронт пламени локализуется в областях наибольших турбулентных пульсаций, вызванных наличием вихревых структур.

**5. БЛАГОДАРНОСТИ.** Работа поддержана интеграционными проектами РАН и СО РАН и грантами РФФИ (07-08-00213-а, 07-08-12254-офи).

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alekseenko, S.V., Dulin, V.M., Kozorezov, Yu.S., Markovich, D.M.** Effect of axisymmetric forcing on the structure of a swirling turbulent jet // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 2008. V. 29. P. 1699–1715.
2. **Billant, P., Chomaz, J.-M., Huerre, P.** Experimental study of vortex breakdown in swirling jets // *J. Fluid Mech.* 1998. V. 376. P. 183–219.
3. **Liang, H., Maxworthy, T.** An experimental investigation of swirling jets // *J. Fluid Mech.* 2005. V. 525. P. 115–159.

*V.M. Dulin, Yu.S. Kozorezov, D.M. Markovich*

Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk

## STEREO PIV DIAGNOSTICS OF FLAMES VORTEX STRUCTURE

*The present work is devoted to the experimental study of the large-scale vortices role in the turbulent structure of premixed propane swirling flames. On the basis of the instantaneous velocity fields, measured with Stereo PIV technique, the spatial distributions of the instantaneous vorticity, mean velocity and turbulent kinetic energy components were obtained.*

PIV, TURBULENT FLAME, LARGE-SCALE VORTICES