

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.18, 533.6.08

**Изучение аэродинамической структуры потока
в модели вихревой топки стереоскопическим
методом цифровой трассерной визуализации***

**И.С. Ануфриев, П.А. Куйбин, Е.Ю. Шадрин, Д.К. Шараборин,
О.В. Шарыпов**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Исследована аэродинамическая структура потока в лабораторной модели перспективной вихревой топке парогенератора с горизонтальной осью вращения, распределенным тангенциальным вводом топливовоздушных струй и вертикально расположенными соплами вторичного дутья. С помощью стереоскопического метода цифровой трассерной визуализации получены трехкомпонентные поля скорости в ряде сечений в объеме вихревой камеры сгорания. На основе обработанных данных, с использованием критерия «минимума полного давления», визуализировано вихревое ядро потока. Полученные результаты хорошо согласуются с данными лазерной доплеровской анемометрии и численными расчетами.

Ключевые слова: вихревая топка, цифровая трассерная визуализация, структура вихревого ядра.

Перспективы развития угольной энергетики обуславливают необходимость создания новых способов эффективного и экологически безопасного сжигания низкосортных видов твердого топлива. Одной из перспективных технологий на сегодняшний день является факельное сжигание пылеугольного топлива в вихревом потоке. Вихревой перенос является основой всего процесса сжигания в вихревой топке. Закруткой потока можно добиться интенсификации процессов тепломассопереноса за счет усиления перемешивания и увеличения времени пребывания частиц топлива в топочной камере, лучшего заполнения реагирующей смесью объема камеры, а также стабилизации самого потока, что позволяет уменьшить габариты топки и котлоагрегата в целом. Научное обоснование конструктивных и режимных параметров при разработке или модернизации топочных устройств, использующих вихревую технологию сжигания, требует детального исследования их внутренней аэродинамики.

В настоящей работе, в продолжение предшествующих работ авторов [1–3], исследуется аэродинамика лабораторной модели перспективной вихревой топки с верхне-расположенным вторичным дутьем. Целью работы являлась визуализация трехмерной структуры закрученного потока в камере сгорания с применением высокопроизводительного полевого метода измерений — стереоскопического метода цифровой трассерной визуализации (Stereo PIV) — для сопоставления с результатами, полученными с помощью

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-19-00137).

трехмерного полупроводникового лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) [4] и численных расчетов [5]. Условия экспериментов соответствовали работе [4]: измерения проводились на изотермической лабораторной модели, выполненной из оптически прозрачного оргстекла с габаритными размерами модели $320 \times 1200 \times 256$ мм, в качестве рабочей среды использовался воздух, входные скорости на срезе каждого сопла (размер сопла 32×42 мм) были одинаковыми и задавались равными 15 м/с.

Известно, что основным преимуществом метода PIV является возможность регистрации мгновенных пространственных распределений скорости потока в заданном сечении. Метод Stereo PIV является расширением метода PIV и позволяет на основе измерения двухкомпонентных проекций векторов скорости восстанавливать трехкомпонентные поля скорости в выбранном сечении потока. Для этого одно и то же изображение трассеров регистрируется двумя камерами под углом относительно плоскости измерения (рис. 1а). Комбинация проекций изображений частиц на обе камеры позволяет провести реконструкцию «реального» трехкомпонентного смещения частиц в толщине лазерного ножа с использованием процедуры калибровки камер [6].

Для измерения полей скорости применялась PIV-система «Полис», которая использовалась в предыдущих работах авторов [2, 4] (рис. 1б), в настоящих экспериментах она была доукомплектована до Stereo PIV-конфигурации, включающей в себя двойной импульсный Nd:YAG-лазер QuanteLEVG с энергией в импульсе, равной 145 мДж, частотой импульсов до 15 Гц, длительностью импульса 10 нс; объектив для формирования лазерного ножа; две CCD-камеры (с разрешением 2048×2048 пикселей, частотой съемки до 1,25 Гц, временем экспозиции 128 мс) с широкоугольными объективами Nikon 28 mm F/2.8 D; два координатных механизма «маунт» для камер для обеспечения коррекции Шаймпфлюга; координатную мишень для калибровки камер; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow и пакетом Stereo PIV Kit; крепежный комплект на основе элементов Newport; устройство засева потока трассерами — генератор тумана. Для перемещения измерительной системы использовалось координатно-перемещающее устройство, позволяющее позиционировать измерительную плоскость внутри модели топки с пространственным шагом от 0,1 мм.

Перед началом эксперимента была проведена процедура калибровки камер согласно [6]. Для этого в плоскости лазерного ножа устанавливалась калибровочная мишень — белая керамическая пластина 100×100 мм с нанесенными на ней калибровочными маркерами (небольшие круглые углубления, окрашенные в черный цвет). Диаметр маркеров составлял 2 мм, расстояние между центрами маркеров — 4 мм. Камеры были направлены на мишень под углами $\pm 30^\circ$ к оси, перпендикулярной к плоскости мишени. Для устранения размывания на краях изображения для каждой из камер была проведена корректировка Шаймпфлюга путем поворота матрицы относительно оптической оси

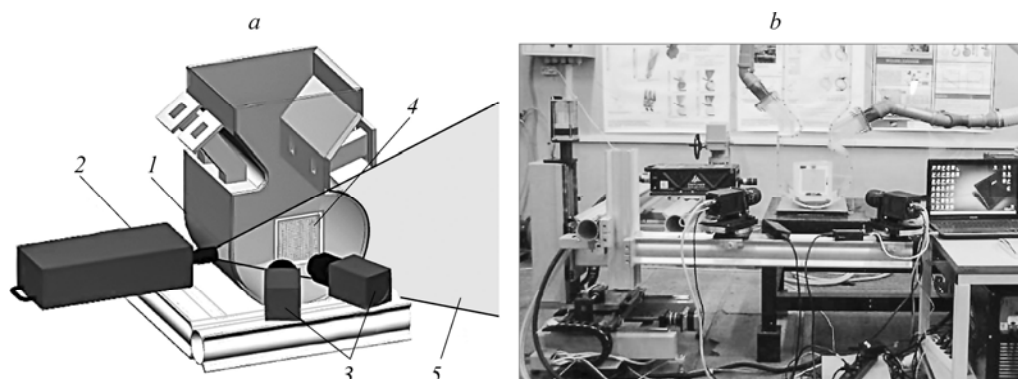


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и общий вид стенда, оснащенного Stereo-PIV-системой (б).
1 — модель вихревой топки, 2 — лазер, 3 — CCD камеры, 4 — калибровочная мишень, 5 — лазерный нож.

объектива на 5° . Для компенсации нелинейных искажений в качестве калибровочного преобразования использовалось прямое линейное преобразование (DLT). Для этого мишень располагалась в трех положениях относительно измерительной плоскости (± 1 и 0 мм). Для обработки данных Stereo PIV эксперимента использовался встроенный в программном обеспечении ActualFlow алгоритм 3D калибровки [6].

В качестве измерительного объема была выбрана область локализации вихревого ядра потока, определенная по предварительным 3D-ЛДА и PIV-экспериментам [4]. Измерения регистрировалась в области $100 \times 100 \times 111$ мм с шагом 3 мм по оси z (т.е. в половине топочной камеры в поперечном направлении до плоскости симметрии). В каждом сечении регистрировалась серия из 1000 пар кадров для каждой камеры с частотой 1 Гц, временем экспозиции кадра 128 мс и временем задержки между первым и вторым кадром в паре кадров 100 мкс. Для обработки данных использовался итерационный кросс-корреляционный алгоритм расчёта полей скорости с разбиением расчетной области на ячейки размером 64×64 пикселей с пространственным перекрытием 50%. Для подавления фоновой засветки, образованной отражением от элементов стенда, использовался алгоритм цифровой фильтрации изображения («вычитание фона»). Полученные после кросс-корреляционного алгоритма пары двухкомпонентных полей скорости были восстановлены при помощи алгоритма стерео-реконструкции (с использованием информации, полученной при калибровке камер) до трехкомпонентного поля скорости в измерительной плоскости (плоскости лазерного ножа).

Представленное на рис. 2 поле средней скорости демонстрирует сложную трехмерную пространственную структуру течения в центральной области камеры сгорания. Изолинии вертикальной компоненты скорости V_y , отвечают за W-форму потока, значения трижды меняют знак вблизи центра камеры горения вдоль оси z , что связано с искривлением оси вихря. Рисунок 3 иллюстрирует характерную структуру потока в сечении по центру сопла, в том числе, направление вращения вихря.

Для визуализации вихревых структур используются различные методы обработки данных [7–10]. В рассматриваемом случае на основе полученных результатов измерений трехмерного поля средней по времени скорости потока применялся критерий «минимума полного давления»: $p_0 = p - p_{\text{atm}} + p_{\text{dyn}}$, где p — статическое давление, p_{atm} — атмосферное давление, $p_{\text{dyn}} = \rho u^2 / 2$ — динамическое давление. При обработке экспериментальных данных предполагалось, что в области локализации вихревого ядра потока статическое давление изменяется слабо, а атмосферное давление является постоянным [3, 4, 8]. Поэтому минимум полного давления определяется минимумом динамического давления.

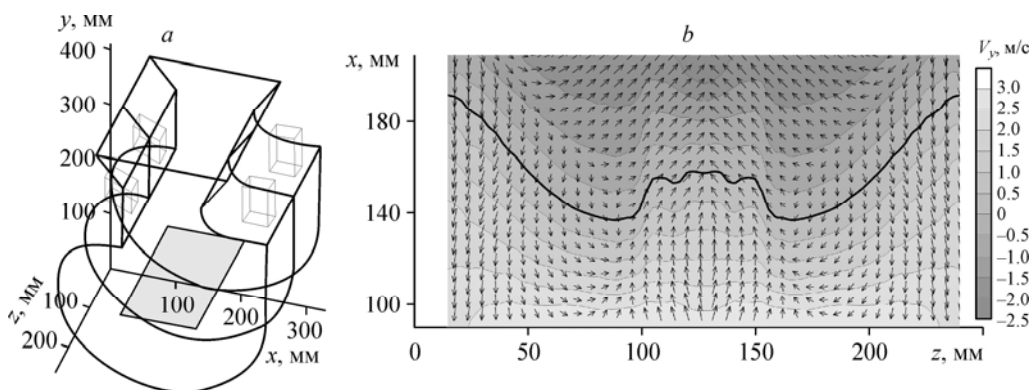


Рис. 2. Измерительная область в горизонтальном сечении xoz , $y = 110$ мм (а) и поле средней скорости в сечении, показанном на фрагменте а (b); выделенная черным изолиния соответствует $V_y = 0$.

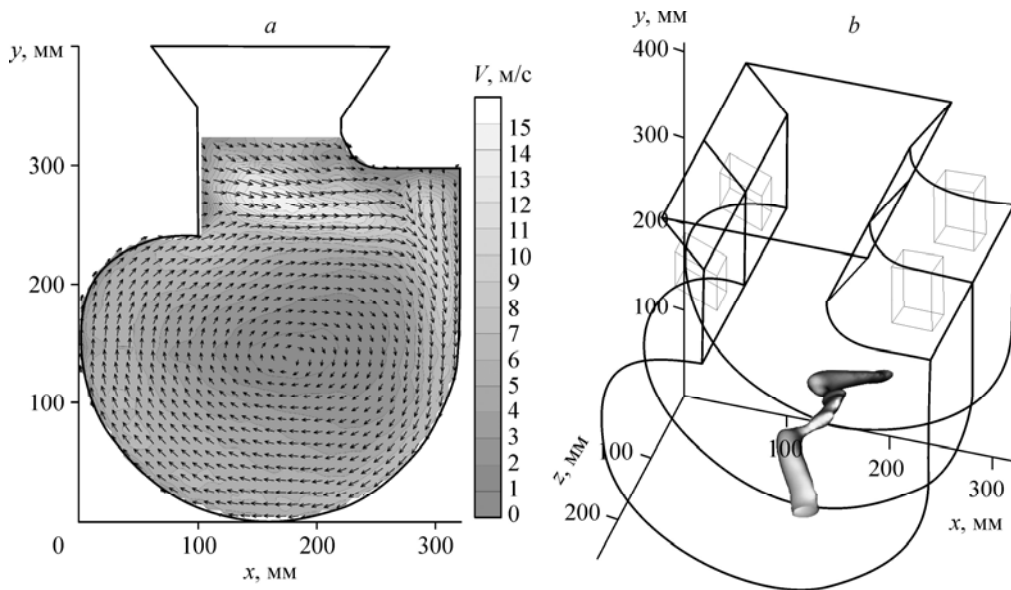


Рис. 3. Поле средней скорости в сечении по центру сопла при $z = 64$ мм (а) и визуализация вихревого ядра потока изоповерхностью динамического давления $p_{\text{dyn}} = 0,25$ Па (б).

На рис. 3б представлена изоповерхность динамического давления $p_{\text{dyn}} = 0,25$ Па, которая визуализирует вихревое ядро потока, имеющее W-образную форму. Полученная форма вихревого ядра потока и данные по распределению поля скорости хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными с использованием ЛДА [4], а также результатами численного моделирования [5].

Список литературы

1. Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Фильков А.А., Лобода Е.Л., Агафонцева М.В., Касымов Д.П., Тизлов А.С., Астанин А.В., Пестерев А.В., Евтюшкин Е.В. Исследование структуры закрученного потока в модели вихревой камеры сгорания методом лазерной доплеровской анемометрии // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, вып. 24. С. 39–45.
2. Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю. Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 10. С. 36–43.
3. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Визуализация структуры потока в вихревой топке // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 19. С. 104–110.
4. Ануфриев И.С., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 15. С. 25–32.
5. Krasinsky D.V., Sharypov O.V. Numerical modeling of pulverized coal combustion in the vortex furnace with dual upper-port loading // J. of Engng Thermophysics. 2015. Vol. 24, No. 4. P. 348–356.
6. Маркович Д.М., Токарев М.П. Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 311–326.
7. Dubief Y., Delcayre F. On coherent-vortex identification in turbulence // J. of Turbulence. 2000. Vol. 1, No. 11. P. 1–22.
8. Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Диагностика пространственной структуры закрученного потока в модели вихревой топки // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 815–818.
9. Наумов И.В., Миккельсен Р.Ф., Окулов В.Л. Формирование застойной зоны на оси замкнутого закрученного течения // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 807–810.
10. Винокуров А.П., Шторк С.И., Алексеенко С.В. Исследование влияния газовой фазы на характеристики прецессирующего вихревого ядра в осесимметричной гидродинамической камере // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 811–814.

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2015 г.,
после доработки — 17 февраля 2016 г.