

03

Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации

© И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов, Е.Ю. Шадрин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН),
Новосибирск
E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 14 января 2013 г.

Исследована внутренняя аэродинамика модели вихревой топки парогенератора с горизонтальной осью вращения потока и распределенным тангенциальным вводом топливовоздушных струй. С помощью метода цифровой трассерной визуализации измерены осредненные характеристики поля скорости в ряде сечений. Результаты сопоставлены с данными, полученными методом лазерной доплеровской анемометрии.

Важным этапом при решении задач технологической модернизации в области производства энергии из органического сырья, расширения топливной базы теплоэнергетики является проведение научно-исследовательских работ с целью научного обоснования задач для опытно-конструкторских и опытно-технологических работ, направленных на создание энергоэффективных и безопасных теплоэнергетических технологий и аппаратов нового поколения. Научное обоснование выбора конструктивных и режимных параметров новых парогенераторов с вихревыми топками основывается на результатах физического моделирования их внутренней аэродинамики. Изучение особенностей сложной пространственной структуры закрученных турбулентных потоков в топочных устройствах необходимо для совершенствования конструкции топков, анализа распределения температуры и скорости, оценки интенсивности перемешивания и тепловых напряжений внутри топки, определения уровня токсичных выбросов, механического недожога и др. Управляя потоком, можно контролировать процессы переноса в объеме камеры сгорания, а значит, распределение температуры и теплообмен, концентрацию газовых компонентов и содержание вредных веществ

на выходе из топки. В данной работе исследуется вихревое топочное устройство нового типа с горизонтальной осью вращения потока и рассредоточенным по периметру тангенциальным вводом топливно-воздушных струй (патент РФ № 2042084). Основными отличительными особенностями новой вихревой топки (по сравнению с известной конструкцией Н.В. Голованова [1]) являются: дополнительный тангенциальный подвод топлива, расположенный в нижней части камеры горения, и увеличенная ширина горловины диффузора. Наличие в исследуемой конструкции вихревой топки рассредоточенных по периметру горелочных струй, направленных навстречу друг другу, обеспечивает гибкость управления структурой течения и режимными параметрами, а горизонтальная ось вращения потока увеличивает полноту выгорания топлива.

Целью данной работы является экспериментальное исследование структуры закрученного течения в новой конструкции вихревой топки, описанной в работе [2]. Измерение аэродинамических характеристик пространственного турбулентного течения проводилось в изотермической лабораторной модели ($300 \times 1200 \times 300$ mm), изготовленной из оргстекла толщиной 10 mm. Основными элементами экспериментального стенда являются: автоматизированный комплекс регулирования подачи сжатого воздуха; изотермическая лабораторная модель вихревой топки; контролирующие приборы; стенд подключен к сети сжатого воздуха и системе вентиляции, оснащен устройством засева потока трассерами (генератор тумана Martin Magnum 1800). Установка позволяет проводить исследования режимов течения при числе Рейнольдса 10^4 – 10^6 , что обеспечивает применимость полученных результатов для анализа аэродинамики камеры горения парогенератора реального масштаба [3]. Принцип работы экспериментального стенда описан в работе [2], посвященной изучению внутренней аэродинамики рассматриваемой конструкции вихревой топки парогенератора на основе метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА).

В данной работе диагностика вихревого течения осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV). Метод PIV — полевой оптический метод измерения полей скорости жидкости и газа. Для измерения полей скорости в интересующих сечениях модели применялась PIV-система „Полис“, разработанная в ИТ СО РАН. Система позволяет измерять две компоненты вектора скорости одновременно во всем заданном сечении (320×320 mm). Из-

мерительный комплекс „Полис“ включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG-лазер QuantelEVG с энергией в импульсе 145 мДж; объектив для формирования лазерного ножа; цифровую кросс-корреляционную камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей; широкоугольный объектив Nikon 28 mm F/2.8 D; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow. Принцип метода PIV состоит в следующем [4]. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие частицы (трассеры), взвешенные в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Локальная скорость потока определяется расчетом перемещений частиц за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные подобласти. Варьирование времени задержки между лазерными вспышками позволяет измерять скорость в диапазоне от долей миллиметра в секунду до сверхзвуковых значений. В качестве трассеров в экспериментах использовались микрокапли специальной жидкости на основе глицерина, создаваемые дымогенератором. Подача трассеров осуществлялась через трубу Вентури, установленную в канал основного потока до входа в модель. Их концентрация регулировалась уровнем мощности дымогенератора. Малая инерционность микрокапель (характерный размер $1-5 \mu\text{m}$) обеспечивает соответствие их скорости параметрам потока воздуха.

Экспериментальные исследования поля скорости течения в модели вихревой топки нового типа проводились при следующих условиях: рабочая среда — сжатый воздух; число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру вихревой топки (300 mm), $\sim 10^5$. Сечение горелочных амбразур 40×50 mm. Угол наклона оси верхней горелки к горизонту составляет 15° , а ось нижней горелки — горизонтальна. Измерения проводились в трех сечениях XOY : при $z = 15, 80, 150$ mm (см. рис. 1 в [2]). Поля средней скорости получены в результате статистической обработки 500 мгновенных распределений.

На рис. 1 показана структура течения в трех сечениях XOY : a — вблизи торцевой стенки модели; b — по центру горелок; c — в плоскости симметрии между горелками. Полученные результаты (так же как и полученные ранее данные лазерной доплеровской анемометрии [2]) демонстрируют следующие аэродинамические особенности закрученного

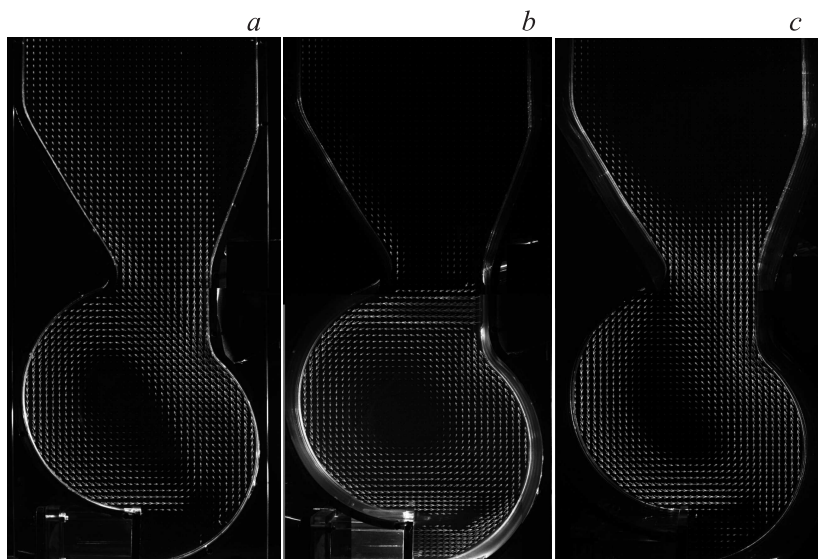


Рис. 1. Поле скорости ($Re = 3 \cdot 10^5$): *a* — $z = 15$ mm; *b* — $z = 80$ mm; *c* — $z = 150$ mm.

потока в исследуемой конструкции вихревой топки. Струя, истекающая из верхней горелки, подпирается снизу дополнительно тангенциально вдуваемым потоком (рис. 1, *b*). За счет этого она несущественно отклоняется вверх от своего первоначального направления и натекает на противоположную стенку камеры горения, после чего растекается вдоль вогнутой стенки вниз и, пересекаясь со струей, выходящей из нижней горелки, создает интенсивно закрученное течение. Причем за счет отклонения верхней струи от первоначального направления может происходить частичный вынос потока в камеру охлаждения и образовываться область рециркуляции. На практике данный эффект приводит к увеличению механического недожога топлива. (В экспериментах было показано, что этого можно избежать за счет выбора определенного соотношения расходов через верхние и нижние горелки). Течение в диффузорной части носит „перчаточный“ характер, поток выходит из камеры горения через диффузор в виде струи в плоскости симметрии между соплами, а также вблизи торцевой стенки модели

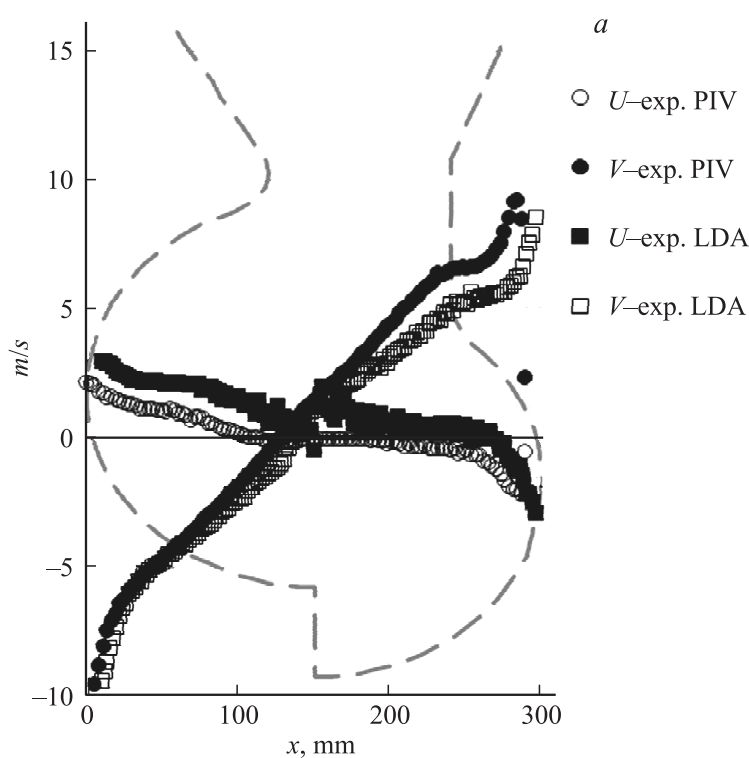


Рис. 2. Профили горизонтальной U и вертикальной V компонент вектора средней скорости вдоль горизонтальной линии ($y = 185$ mm), проходящей через центр камеры горения: $a - z = 80$ mm; $b - z = 150$ mm.

(рис. 1, a, c). В области над верхней горелкой присутствуют возвратные течения (рис. 1, b), в то же время в нижней части камеры сгорания имеются застойные зоны, в которых проекция скорости близка к нулю (рис. 1, a, c). На рис. 1, a видно, что в нижней части топки имеются локальные области, в которых векторы скорости направлены навстречу друг другу. Это говорит о движении в поперечном направлении и свидетельствует о трехмерном характере течения в исследуемой вихревой топке. На рисунках четко выражена область центра вихря, положение

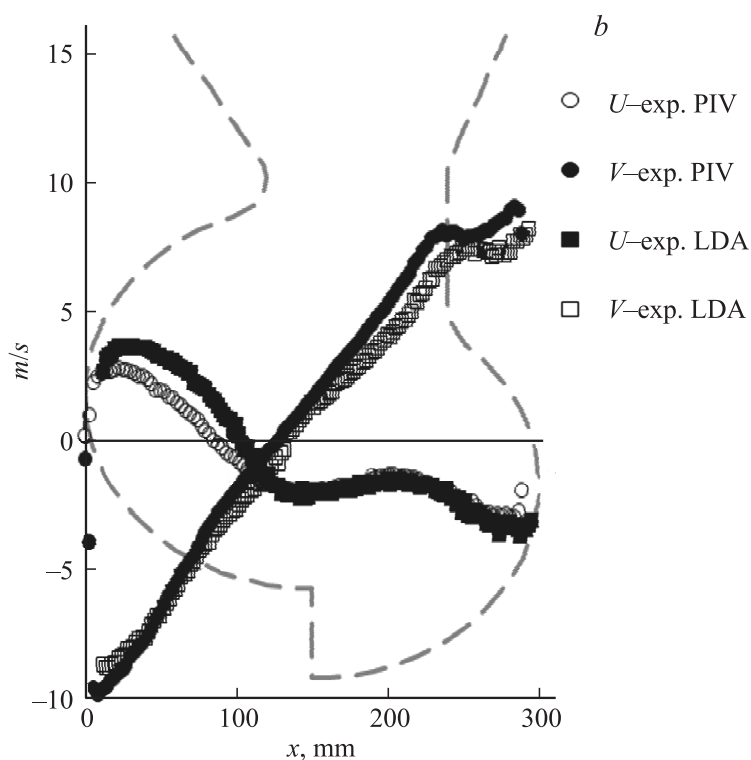


Рис. 2 (продолжение).

которой зависит от координаты z , что указывает на наличие прецессии вихревого ядра. На рис. 2 приведены профили горизонтальной U и вертикальной V компонент осредненной скорости, построенные вдоль центральной горизонтальной линии.

Известно, что основным преимуществом полевых методов является их высокая производительность за счет регистрации поля скорости одновременно во всей измерительной области. В то же время по точности измерения они уступают точечным методам. Основной вклад в погрешность PIV-измерений вносит обработка перемещений частиц, на которую влияет целый ряд факторов [4], что затрудняет количественную

оценку суммарной погрешности метода. Поэтому одной из основных задач в данной работе являлось обоснование применимости метода цифровой трассерной визуализации (и конкретной измерительной системы „ПОЛИС“) для диагностики закрученного турбулентного течения в исследуемом устройстве. Результаты измерений, полученные в работе, сопоставлены с данными ЛДА [2], погрешность которых не превышала 1.5%. Видно, что оба метода хорошо воспроизводят все качественные особенности распределений проекций скорости — характерные перегибы, экстремумы и т.п. (рис. 2). В то же время заметно количественное расхождение результатов, локально достигающее 20%. Сопоставление результатов измерений, полученных двумя независимыми современными оптическими методами диагностики потоков, показывает, что метод PIV обеспечивает приемлемое для инженерной практики соответствие и с указанной точностью может быть успешно применен для исследования внутренней аэродинамики вихревых топочных устройств.

Таким образом, с помощью бесконтактного PIV-метода экспериментально исследована структура вихревого течения в изотермической лабораторной модели нового топочного устройства с горизонтальной осью вращения и распределенным вводом топливовоздушных струй. Проанализировано поле скорости в различных сечениях топки, выявлены основные аэродинамические особенности течения. Показано, что наличие дополнительных нижних горелок обеспечивает большую гибкость управления аэродинамической структурой потока для создания более благоприятных режимов работы топки (по сравнению с конструкцией Н.В. Голованова). Сопоставление результатов PIV-измерений с данными ЛДА подтверждает применимость высокопроизводительного полевого метода для исследования структуры рассматриваемого класса течений. Полученная в результате физического моделирования количественная информация о структуре изотермического стационарного вихревого потока может быть использована при верификации математических моделей и численных алгоритмов, используемых для моделирования топочных процессов в реальных условиях, в том числе — при разработке новых типов парогенераторов с вихревыми топками.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 12-08-31004-мол_а), Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК 16.740.11.0691) и стипендии президента РФ для молодых ученых СП-987.2012.1.

Список литературы

- [1] Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 2. С. 266–276.
- [2] Ануфриев И.С., Аникин Ю.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 24. С. 39–45.
- [3] Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование тепло-энергетического оборудования. М.: Энергия, 1966. 350 с.
- [4] Алексеенко С.В., Бильский А.В., Маркович Д.М. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 145–153.