

04;07;12

Исследование структуры закрученного потока в модели вихревой камеры сгорания методом лазерной доплеровской анемометрии

© И.С. Ануфриев, Ю.А. Аникин, А.И. Фильков, Е.Л. Лобода,
М.В. Агафонцева, Д.П. Касымов, А.С. Тизилов,
А.В. Астанин, А.В. Пестерев, Е.В. Евтюшкин

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

Поступило в Редакцию 30 июля 2012 г.

Экспериментально исследована структура изотермического закрученного потока в модели вихревой камеры сгорания с горизонтальной осью вращения и распределенным вводом топливовоздушных струй. С помощью метода лазерной доплеровской анемометрии измерены осредненные и пульсационные характеристики поля скорости в разных сечениях модели. Проанализированы особенности внутренней аэродинамики новой конструкции топки парогенератора.

Необходимым этапом разработки нового теплоэнергетического оборудования является лабораторное (физическое) моделирование, которое позволяет получить достоверные данные о процессах переноса для выбора оптимальных режимных и конструктивных параметров сложных устройств, а также для верификации математических моделей процессов сжигания топлива. Вихревые технологии сжигания пылеугольного топлива имеют ряд важных преимуществ, особенно при использовании низкосортных углей. Оптимальная организация внутренней аэродинамики вихревого топочного устройства обеспечивает высокую полноту выгорания топлива и снижение количества вредных выбросов, определяя энергоэффективность и экологическую безопасность оборудования [1]. Результаты изучения достоинств и недостатков вихревой топки опытно-промышленного парогенератора [2] позволили усовершенствовать конструкцию камеры сгорания [3], см. рис. 1, а. Ее особенностями служат распределенный тангенциальный ввод топливовоздушных струй и увеличенная ширина горловины диффузора. Наличие нижних сопел

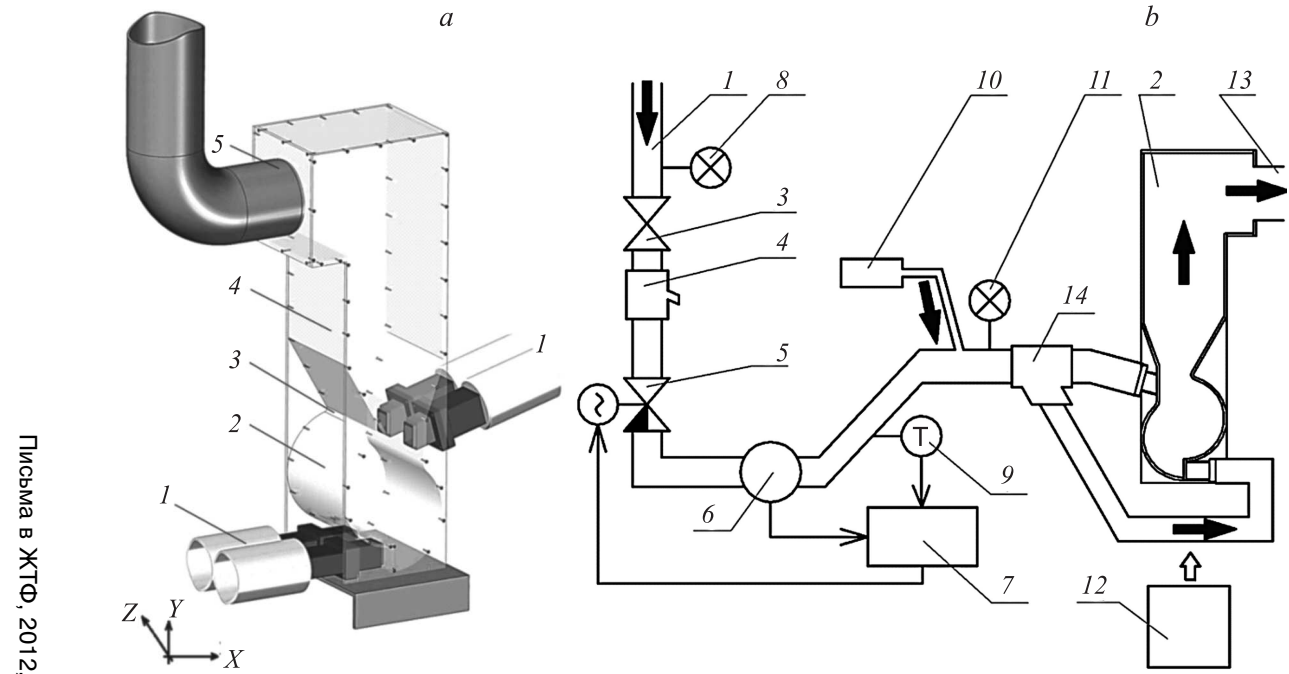


Рис. 1. Установка для исследования аэродинамики модели вихревой топки: *a*) модель вихревой топки: 1 — верхние и нижние сопла, 2 — вихревая камера сгорания, 3 — диффузор, 4 — камера охлаждения, 5 — горизонтальный газоход; *b*) схема установки: 1 — магистраль подачи сжатого воздуха, 2 — модель вихревой топки, 3 — шаровой кран, 4 — фильтр, 5 — запорно-регулирующий клапан, 6 — преобразователь расхода, 7 — блок автоматики, 8, 11 — манометры, 9 — датчик температуры, 10 — дымогенератор, 12 — измерительная система ЛАД-06, 13 — вентиляционная шахта, 14 — распределитель потока.

обеспечивает гибкость управления структурой течения и режимными параметрами. Целью работы является экспериментальное исследование структуры турбулентного закрученного потока в изотермической модели новой конструкции топки пылеугольного парогенератора.

Модель вихревой топки (см. рис. 1, *a*), выполненная в масштабе 1 : 20 (400 × 1200 × 300 mm), изготовлена из оргстекла толщиной 10 mm, что позволяло проводить бесконтактную оптическую диагностику параметров течения с использованием метода лазерной доплеровской анемометрии (высокоточный точечный метод измерения перемещений взвешенных в потоке частиц — трассеров). На фронтальной стенке модели под углом 15° к горизонту расположены два прямоугольных сопла (40 × 50 mm), соответствующие горелочным амбразурам; дополнительные сопла расположены горизонтально в нижней части топочной камеры. Основные элементы установки (см. рис. 1, *b*): автоматизированный комплекс контроля и регулирования подачи сжатого воздуха; модель вихревой топки; устройство засева потока трассерами (генератор дыма Martin Magnum 1800); контрольно-измерительные приборы; вентиляционный газоход. Экспериментальная установка позволяет проводить исследования в широком диапазоне режимов течения при числе Рейнольдса 10^4 – 10^6 , что обеспечивает применимость полученных результатов для анализа аэродинамики камеры сгорания парогенератора реального масштаба [4,5].

Методика проведения экспериментов заключается в следующем, см. рис. 1, *b*. Поток сжатого воздуха 1 из магистрали по системе трубопроводов подается в модель вихревой топки 2 через шаровый кран 3 с сетчатым фильтром 4 и запорно-регулирующий клапан с электроприводом 5, сигнал от преобразователя расхода вихревого типа 6 поступает в блок автоматики 7, управляющий клапаном 5 и обеспечивающий автоматическое поддержание заданного расхода воздуха (с погрешностью не более 0.5%). Давление в системе контролируется манометрами 8, 11, а температура — датчиком 9. До входа в модель через отверстие в трубопроводе, к основному потоку воздуха примешиваются трассеры (микрокапли специальной жидкости на основе глицерина), создаваемые дымогенератором 10. Из модели поток направляется в вентиляционную шахту 13. Разделение потока к верхним и нижним соплам осуществляется распределителем 14. Диагностика потока осуществляется с позиции 12 через плоскую, оптически прозрачную торцевую стенку модели 2. Бесконтактные

измерения распределений скорости потока в интересующих сечениях производятся с помощью лазерно-доплеровской измерительной системы (автоматизированный измерительный комплекс ЛАД-06), разработанной в ИТ СО РАН [6]. Система включает: оптоэлектронный модуль, координатно-перемещающее устройство, компьютер со специализированным программным обеспечением. Измерительный комплекс ЛАД-06 измеряет две компоненты скорости потока, лежащие в плоскости, перпендикулярной к оптической оси оптоэлектронного блока. Методика проведения ЛДА-измерений аналогична описанной [2], там же приведено обоснование оценки погрешности измерений. Концентрация трассеров позволяет регистрировать сигналы от 300–500 трассеров в секунду. Малая инерционность микрокапель (характерный размер 1–5 μm) обеспечивает соответствие их траекторий линиям тока.

Была проведена серия измерений поля скорости в разных сечениях XOY модели в узлах сетки с пространственным шагом 10 mm. В каждой точке измерение длилось 10 s, при этом суммарная погрешность измерения средней скорости не превышала 1.5%. Характерное значение числа Рейнольдса составляло $Re \sim 3 \cdot 10^5$ (рассчитанное по диаметру вихревой топки 0.3 m для воздуха при нормальных условиях и среднерасходной скорости потока 15.5 m/s и 16.5 m/s на срезе нижнего и верхнего сопла соответственно). Отношение расходов через верхние и нижние сопла $\sim 1 : 1$.

На рис. 2 показана структура стационарного закрученного потока в исследуемой модели в разных сечениях (проекция осредненной скорости на плоскость XOY при различных значениях координаты z). Из анализа представленных данных следует, что осредненный поток имеет сложную, существенно пространственную структуру. Истекающая из верхнего сопла струя подпирается снизу дополнительно тангенциально вдуваемым потоком (рис. 2, *b*). За счет этого она несущественно отклоняется вверх от своего первоначального направления и натекает на противоположную стенку камеры сгорания. После чего струя растекается вдоль вогнутой стенки вниз и, пресекаясь со струей, выходящей из нижнего сопла, создает интенсивно закрученное течение. Поток выходит из камеры сгорания через диффузор в виде струи в плоскости симметрии между соплами, а также вблизи торцевой стенки модели (см. рис. 2, *a*). В области над верхним соплом присутствуют возвратные течения и рециркуляционные зоны (см. рис. 2, *b*), в то же время в нижней части камеры сгорания имеются застойные зоны

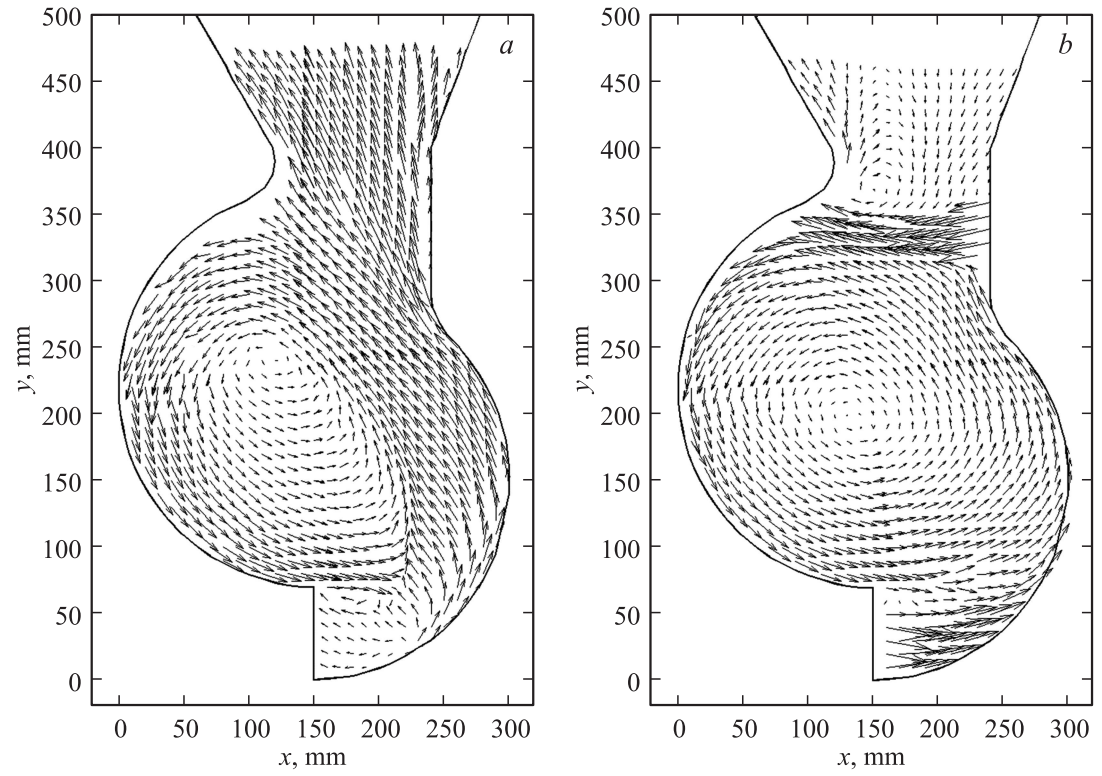


Рис. 2. Структура течения в модели вихревой топки: *a* — сечение XOY вблизи торцевой стенки модели ($z = 15 \text{ mm}$); *b* — сечение XOY по центру сопла ($z = 80 \text{ mm}$).

(см. рис. 2, *a*), в которых проекция скорости близка к нулю. На рис. 2, *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 (z) и свидетельствует о трехмерном характере аэродинамики исследуемой вихревой топки. В центральной части камеры сгорания четко выражена область центра вихря, положение которой зависит от координаты z , что указывает на наличие прецессии вихревого ядра.

Указанные особенности структуры течения позволяют сделать вывод о том, что аэродинамические характеристики исследуемой конструкции вихревой топки обеспечивают более благоприятные условия по сравнению с конструкцией Н.В. Голованов [3]. В частности, отсутствует эффект Коанда (присоединение струи к одной из стенок камеры охлаждения), приводящий на практике к негативным последствиям. Благодаря наличию дополнительного ввода через нижние сопла обеспечивается возможность управления структурой потока (варьирование расположения рециркуляционных и застойных зон, распределения параметров газозвеси в объеме камеры сгорания и др.). Созданная установка и реализованная методика измерений позволяют в дальнейшем получить информацию о пульсационных составляющих скорости потока и распределении характеристик нестационарного течения, влияющих на топочные процессы (кинетическая энергия турбулентности и др.). Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для тестирования математических моделей и алгоритмов при проектировании парогенераторов нового типа.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 12-08-90706-моб_ст), Министерства образования и науки РФ и мэрии города Новосибирска.

Список литературы

- [1] Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростациях. Новосибирск: изд-во НГТУ, 2006. 464 с.
- [2] 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.

- [3] Голованов Н.В., Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Саломатов В.В., Дорожков А.А. Авторское свидетельство на изобретение № 2042084, 20.08.1995.
- [4] Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск, 1982.
- [5] Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. М.: Энергия, 1966. 350 с.
- [6] Меледин В.Г., Наумов И.В., Бакакин Г.В., Павлов В.А., Аникин Ю.А., Главный В.Г., Двойнишников С.В. и др. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для диагностики газожидких потоков ЛАД-05М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Р5 123 00 00 ТО и ТЭ. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск, 2007. 69 с.