

**В. В. Саломатов^{1,2}, О. В. Шарыпов^{1,2}, И. С. Ануфриев¹,
Ю. А. Аникин¹, Х. Энхжаргал³**

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

³ Университет науки и технологии
Улан-Батор, 210646, Монголия

E-mail: vvs@itp.nsc.ru

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

Работа посвящена экспериментальному исследованию внутренней аэродинамики топки парогенератора вихревого типа с применением метода лазерной доплеровской анемометрии. Измерения поля скорости потока выполнены на изотермической модели, геометрически подобной одной из секций опытно-промышленного котла ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3 (масштаб 1 : 15). Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами термоанемометрических измерений и численных расчетов.

Ключевые слова: структура вихревого потока, метод лазерной доплеровской анемометрии, физическое моделирование, вихревая топка.

Введение

В настоящее время одно из наиболее актуальных направлений развития теплоэнергетических технологий сжигания низкосортных топлив связано с созданием оборудования, позволяющего свести к минимуму выбросы в окружающую среду таких отходов, как летучая зола, оксиды серы и азота, других токсичных продуктов сгорания. Существует два пути решения данной проблемы: 1) совершенствование технологий очистки; 2) разработка новых топочных устройств, обеспечивающих экологически безопасное сжигание топлива. Анализ современного мирового состояния и перспектив развития топочной техники для газификации и сжигания различных топлив, особенно низкокачественных углей, демонстрирует закономерный возврат к форсиро-

ванным вихревым технологиям [1]. Применение вихревой технологии сжигания позволяет решать задачи уменьшения размера и повышения теплонапряженности топочно-го устройства, улучшения экологических показателей. Вихревой перенос является аэродинамической основой всего процесса сжигания в таких топочных устройствах. Соответствующей организацией аэродинамики топочных устройств можно повлиять на равномерность распределения температуры и тепловых потоков, увеличить шлакоулавливание, а также снизить уровень выброса токсичных отходов. Аэродинамическая структура потока должна обеспечивать совершенное смесеобразование газифицирующегося топлива и окислителя, без чего невозможно достигнуть ни требуемой интенсивности процесса, ни допустимых показателей по вредным выбросам, ни вы-

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы»), РФФИ (проекты № 10-08-01093-а, 09-08-90200-а, 10-08-90032-Бел_а), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры Инновационной России» на 2009–2013 годы.

сокого уровня экономичности сжигания. Главным достоинством сжигания топлива в вихревом потоке является возможность создания устойчивого высокотурбулентного течения, обеспечивающего интенсивный массообмен в реагирующей двухфазной смеси.

Перечисленные требования реализованы в парогенераторе вихревого типа (ПВТ) конструкции Н. В. Голованова (НПО ЦКТИ, Санкт-Петербург) [2], который был выбран в качестве объекта исследования в данной работе. Принципиальная особенность выбранной конструкции котла – топка, состоящая из вихревой камеры сгорания (КС) с высоким теплонапряжением и камеры охлаждения (КО) (рис. 1). Достоинствами конструкции являются рациональные массогабаритные характеристики топки, однофронтальное расположение горелок, маневренные характеристики. Процесс сжигания протекает при повышенных объемных теплонапряжениях, что обеспечивает жидкотекучее состояние шлака. В таких топках интенсивный процесс ассимиляции оплавленных золовых частиц гарнисажным слоем шлака увеличивает шлакоулавливание в топке и уменьшает унос из нее «летучей» золы. В верхней части топки (камера охлаждения), где располагаются топочные экраны открытого типа, газы и зола интенсивно охлаждаются, что позволяет избежать зашлаковывания поверхностей.

К настоящему времени выполнен значительный объем НИОКР применительно к вихревым топочным устройствам такого типа [1; 3–4]. Работы проводились на различных установках: от гидравлических до воздушных изотермических моделей, от пилотных топок до промышленных котлов. Параллельно осуществлялось численное моделирование топочных процессов [5]. Однако анализ полученных результатов свидетельствует о недостаточной изученности сложной структуры закрученного газодисперсного потока, характеристик межфазного теплового и силового взаимодействия, закономерностей физико-химических превращений в органической и минеральной частях топлива. Как следствие, существующие инженерные методы расчета вихревых топочных устройств нуждаются в дальнейшем научном обосновании в целях создания перспективных вихревых аппаратов и технологий теплоэнергетики.

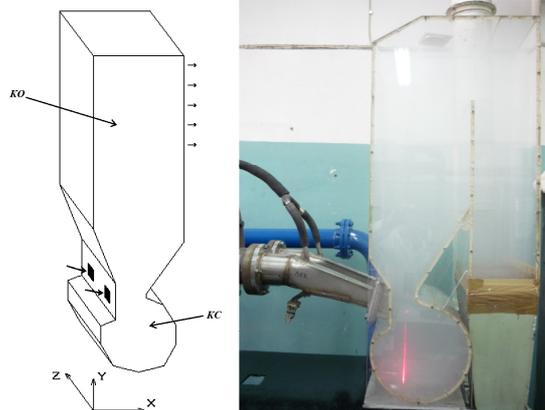


Рис. 1. Модель вихревой топки

Научное обоснование выбора конструктивных и режимных параметров новых парогенераторов с вихревыми топками основывается на результатах физического и математического моделирования, целью которого является оптимизация геометрии вихревых топок, анализ распределения температуры и скорости, оценка интенсивности перемешивания и тепловых напряжений внутри топки, определение уровня токсичных выбросов и др. Моделирование является также ключевым этапом в модернизации действующего котельного оборудования, которое на данном этапе не удовлетворяет экологическим и / или технико-экономическим требованиям. Настоящая работа посвящена физическому моделированию аэродинамики вихревой топки в изотермических условиях. Обоснование данного подхода, включая вопросы выбора критериев подобия, представлено в предыдущих работах [6] в соответствии с общими принципами [7–8].

Воздушная модель вихревой топки

Физическое моделирование внутренней аэродинамики исследуемой вихревой топки проводилось на модели, геометрически подобной (в масштабе 1 : 15) одной из секций опытно-промышленного котла ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3 (см. рис. 1).

Модель изготовлена из оргстекла, характерные размеры: $x_{\max} = 0,3$ м, $y_{\max} = 1,3$ м, $z_{\max} = 0,33$ м, отношение ширины горловины диффузора к диаметру вихревой камеры сгорания составляет $H_x = 0,24$. На фронталь-

ной стенке под углом 15° к горизонту симметрично расположены два прямоугольных сопла (соответствующие горелкам), через которые поступает сжатый воздух.

При физическом моделировании выбран геометрический параметр подобия Σ_f/F_T , являющийся постоянным для данного типа ПВТ, где Σ_f – сумма площадей сечения горелок, F_T – площадь диаметрального сечения камеры сгорания.

Число Рейнольдса (Re) в лабораторных условиях на порядок ниже, чем в промышленных. Данное различие при моделировании оправдано благодаря автомодельности режима течения относительно числа Рейнольдса в диапазоне $Re = 10^4 \div 10^6$ [7].

Экспериментальная техника и методика измерений

Исследования проводились на экспериментальном стенде, представленном на рис. 2. Поток сжатого воздуха из магистрали

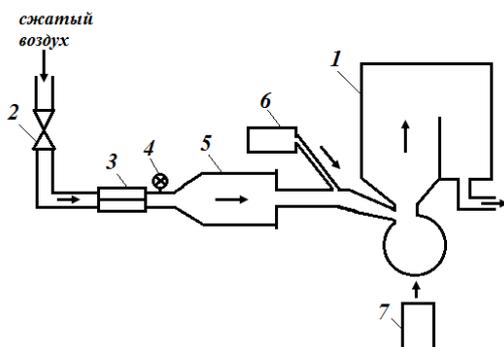


Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования аэродинамики модели топки ПВТ: 1 – модель вихревой топки; 2 – клапан; 3 – регулятор давления (редуктор); 4 – манометр; 5 – ресивер (для сглаживания пульсаций давления); 6 – дымогенератор XLINE FOG 800; 7 – автоматизированный измерительный комплекс ЛАД-05

подавался в модель вихревой топки (1) через регулятор давления (3) и ресивер (5) с целью стабилизации расхода. Давление после регулятора контролировалось при помощи образцового манометра (4).

Для бесконтактного измерения стационарного распределения скорости потока в интересующих сечениях модели применялась лазерно-доплеровская прецизионная измерительная система (автоматизированный измерительный комплекс ЛАД-05), разработанная в ИТ СО РАН [9]. Система включает: оптоэлектронный модуль, координатно-перемещающее устройство (КПУ), компьютер со специализированным программным обеспечением. В оптоэлектронном модуле реализована оптическая схема с рассеянием назад, которая отличается использованием полупроводникового лазера. Лазерный пучок расщепляется акустооптическим модулятором на два пучка, которые, пересекаясь в потоке, формируют интерференционное поле с известной периодической структурой. Его изображение в рассеянном назад свете формируется оптическими элементами на светочувствительной поверхности фотоприемника.

В основе метода лежит измерение перемещений взвешенных в потоке частиц (трассеров). Пересекая интерференционное поле, частицы генерируют оптический сигнал, частота изменения интенсивности которого прямо пропорциональна скорости трассеров. В качестве трассеров в данном эксперименте использовались микрокапли специальной жидкости на основе глицерина, создаваемые дымогенератором (см. рис. 2). Трассеры примешивались к потоку воздуха и засеивали весь объем модели топки. Их концентрация позволяла измерительной системе регистрировать 300–500 частиц в секунду.

Автоматизированный измерительный комплекс ЛАД-05 измеряет две компоненты скорости потока, лежащие в плоскости, перпендикулярной к оптической оси оптоэлектронного блока. Система была установлена так, что оптическая ось совпадала с осью цилиндрической части модели топки. Таким образом, измеряемые компоненты скорости лежали в плоскости XU (плоскость, перпендикулярная оси z), далее они обозначаются U и V (проекции на оси x и y соответственно).

КПУ перемещает оптоэлектронный блок по трем осям, что позволяет позиционировать измерительный объем системы в любой точке внутри модели топки. Минимальный шаг перемещений – 0,01 мм, точность позиционирования ограничивалась точностью привязки к началу координат и была не хуже 1 мм. Диапазон перемещений КПУ по каждой оси ограничен 250 мм. Размеры интересующей области модели топки составляли $300 \times 500 \times 200$ мм. Чтобы охватить измерениями всю интересующую область, потребовалось провести несколько отдельных измерений и объединить результаты с учетом приведения координат в единую систему отсчета.

Основной вклад в ошибку измерения среднего значения дают пульсации скорости. Пульсации были оценены для каждой точки эксперимента как отношение стандартного отклонения к локальной средней скорости и составили в среднем 35 %. Среднеквадратичные отклонения по всем точкам не превышали 1,2 м/с. Ошибку измерения средней скорости, зависящую от пульсаций, можно оценить как отношение стандартного отклонения к локальной скорости, разделенную на $N^{1/2}$, где N – количество измерений компоненты скорости в данной точке. Автоматизированный эксперимент был спланирован так, чтобы в каждой точке эксперимента для получения среднего значения скорости было произведено не менее $N = 1\,000$ измерений (по 500 для каждой компоненты скорости). Таким образом, погрешность измерения среднего значения скорости не превышала 1,5 %, а с учетом погрешности измерения ЛАД-05 суммарная погрешность не превышала 2 %.

Результаты исследования

Исследуемая конструкция модели вихревой топки имеет плоскость симметрии посередине между соплами (см. рис. 1). Это позволяет предположить наличие симметрии структуры течения относительно данной плоскости. Измерения двух компонент скорости потока проводились в плоскостях XU (при различных значениях координаты z) в узлах сетки 28×47 с пространственным шагом 1 см (для сопоставления с численными расчетами).

Структура течения в модели вихревой топки, полученная в экспериментах при

$Re = 3 \cdot 10^5$, показана на рис. 3, б и 4, б, соответствующие результаты численных расчетов [5] при $Re = 5 \cdot 10^5$ представлены на рис. 3, а и 4, а. На рис. 3 представлено распределение проекции скорости потока на плоскость XU при $z = 0,23$ (по центру сопла), а на рис. 4 – при $z = 0,5$ (посередине между соплами). Из анализа экспериментальных данных следует, что закрученный поток в камере сгорания имеет пространственную структуру, для которой положение центра вихря не зависит от координаты z . Расчетные данные предсказывают значительные изменения положения центра вихря в направлении оси z , что может быть связано с отличием в значениях числа Рейнольдса.

Как расчетные, так и экспериментальные данные (см. рис. 4), демонстрируют существенную пространственную неоднородность структуры восходящего потока в камере

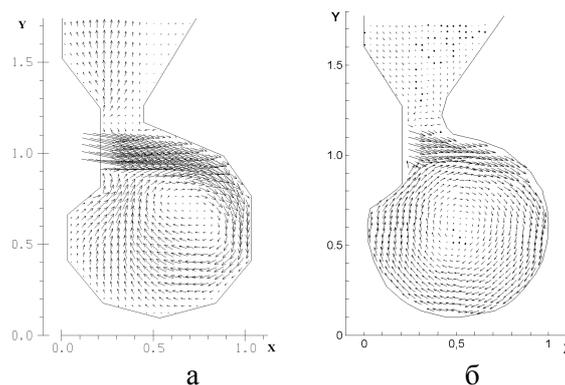


Рис. 3. Поле скорости в модели вихревой топки при $z = 0,23$: результаты численного моделирования [5] (а); данные эксперимента (б)

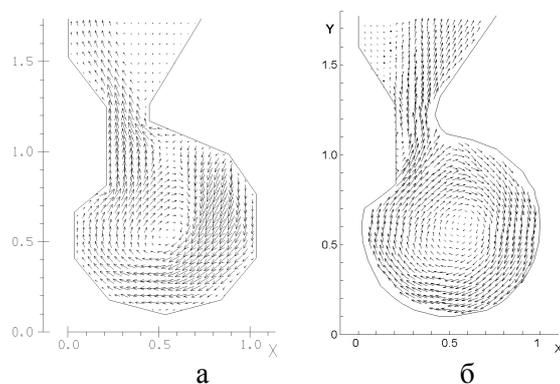


Рис. 4. Поле скорости в модели вихревой топки при $z = 0,5$: результаты численного моделирования [5] (а); данные эксперимента (б)

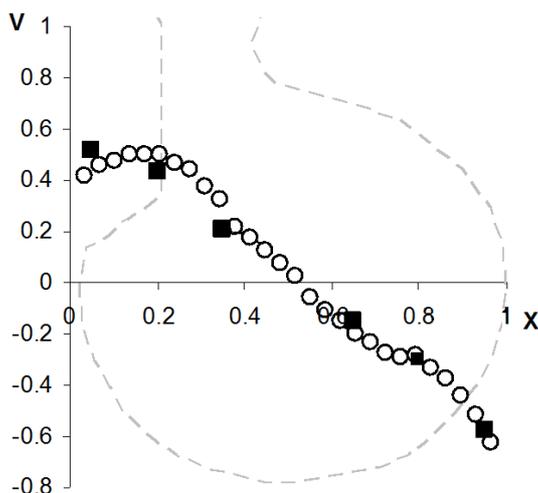


Рис. 5. Распределение вертикальной компоненты скорости при $y = 0,6$ $z = 0,23$: ■ – результаты термоанемометрических измерений [6], ○ – результаты лазерно-доплеровской анемометрии

охлаждения. Поток выходит через диффузор камеры сгорания в виде струи, расположенной между соплами, которая «прилипает» к стенкам камеры охлаждения (эффект Коанда). Данное явление на практике может приводить к негативным последствиям. Оно обусловлено конструкцией вихревой топки, в частности низким относительным значением ширины горловины диффузора камеры сгорания ($H_x = 0,24$) и ее близким расположением к фронтальной стенке камеры охлаждения, что способствует проявлению эффекта Коанда.

Полученные результаты сопоставлены с данными термоанемометрических измерений [6]. На рис. 5 приведены распределения вертикальной компоненты скорости по координате x на оси камеры сгорания при $y = 0,6$, $z = 0,23$ (значения V обезразмерены по среднерасходной скорости вдува). Результаты измерений, полученные различными методами, удовлетворительно согласуются. Это, в частности, свидетельствует о том, что инерционность трассеров, как и торможение потока датчиком термоанемометра, не оказывает существенного влияния на точность измерений.

Разработанная измерительная методика исследования внутренней аэродинамики воздушной (изотермической) модели топки ПВТ на основе современного бесконтактного

го метода диагностики структуры вихревого потока может быть рекомендована для физического моделирования «холодных» течений в энергетических установках. Созданный экспериментальный стенд и полученные результаты могут быть использованы в научно-образовательной деятельности при выполнении учебно-научных и научно-исследовательских работ студентами и аспирантами, в том числе – проходящими подготовку на базе НОЦ «Энергетика».

Список литературы

1. Саломатов В. В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 853 с.
2. Голованов Н. В. и др. Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ // Тр. ЦКТИ. Л., 1975. Вып. 132. С. 3–14.
3. Давыдов С. Ф., Навроцкий А. Д., Саломатов В. В., Семенова Г. П., Цветков П. В. Моделирование аэродинамики и лучистого теплообмена в парогенераторах с вихревой топкой // Сибирский физико-технический журнал. 1991. Вып. 5. С. 106–110.
4. Ицковский М. А. Создание и освоение опытно-промышленных и серийных котлов с вихревыми топками // Тр. ЦКТИ. СПб., 2002. Вып. 287. С. 127–138.
5. Красинский Д. В. Численное моделирование двухфазных турбулентных реагирующих течений при сжигании пылеугольного топлива в топочных камерах вихревого типа: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1999. 146 с.
6. Keyno A. W., Krasinsky D. V., Rychkov A. D., Salomatov V. V. Experimental and Numerical Modeling of the Vortex Furnace Aerodynamics // Russ. J. Eng. Thermophys. 1996. Vol. 6. P. 47–62.
7. Кутателадзе С. С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982. 280 с.
8. Кутателадзе С. С., Ляховский Д. Н., Пермьяков В. А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. М.: Энергия, 1966. 350 с.

9. Меледин В. Г., Аникин Ю. А., Бакакин Г. В. и др. Лазерная доплеровская измерительная система для 2D диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05 // Высокие технологии, фундаментальные и приклад-

ные исследования, образование. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. Т. 5. С. 343–344.

Материал поступил в редколлегию 20.10.2010

V. V. Salomatov, O. V. Sharypov, I. S. Anufriev, Yu. A. Anikin, Kh. Enkhjargal

**PHYSICAL MODELING OF INTERIOR AERODYNAMICS OF VORTEX FURNACE
OF ENERGY STEAM GENERATOR**

The work is devoted to experimental research of interior aerodynamics of steam generator vortex furnace with using of laser Doppler anemometry method. Measurements of flow velocity field have been carried out on the isothermal model, which is geometrically similar to one section of the experimental-industrial boiler TPE-427 of Novosibirsk TPS-3 (on a scale of 1:15). The obtained results have been compared with heat-loss anemometry and numerical calculation results.

Keywords: multiphase vortex flow structure, laser Doppler anemometry method, physical simulation, vortex furnace