

Ю. А. Аникин^{1,2}, И. С. Ануфриев¹, Д. В. Красинский¹, В. В. Саломатов^{1,2}
Е. Ю. Шадрин², О. В. Шарыпов^{1,2}

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

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

ФИЗИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ С РАССРЕДОТОЧЕННЫМ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ ВВОДОМ ГОРЕЛОЧНЫХ СТРУЙ *

Работа посвящена экспериментальному и численному моделированию внутренней аэродинамики нового типа топки парогенератора ТЭС с вихревой технологией сжигания распыленного угля. Измерения аэродинамических характеристик потока в лабораторной «холодной» модели топки выполнены с помощью двухкомпонентной лазерной доплеровской измерительной системы. Проведено численное моделирование трехмерного турбулентного изотермического течения в лабораторной модели с использованием CFD-пакета FLUENT. Получена детальная трехмерная структура течения в исследуемой модели. Показано соответствие результатов расчетов и измерений распределения осредненной скорости потока.

Ключевые слова: многофазные вихревые потоки, вихревая топка, тангенциальный ввод горелочных струй, метод лазерной доплеровской анемометрии, численное моделирование, перспективное оборудование теплоэнергетики.

Введение

Потребности в создании новых технологий и оборудования для энергоэффективного и экологически безопасного сжигания угля обусловлены перспективами дальнейшего развития твердотопливной энергетики. Проблемы масштабного расширения топливно-сырьевой базы российской энергетики определяют высокий интерес к широкому использованию прежде всего низкосортных углей, что означает существенное повышение требований к характеристикам парогенераторов и определяет необходимость применения новых подходов

при разработке топочных устройств. Одной из наиболее перспективных технологий улучшения эффективности и экологичности котельных установок для ТЭС является факельное сжигание пылеугольного топлива в вихревом потоке [1]. Вихревой перенос является аэродинамической основой всего процесса сжигания. Достижение заданных технических и экологических показателей при сжигании топлива в вихревом потоке в основном обеспечивается совершенством внутренней аэродинамики топочного устройства. Оптимальной организацией аэродинамики течения можно повлиять на равномерность распределения температуры и

* Работа проведена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-31004-мол а), Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 8193, ГК № 14.518.11.7015) и Стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-987.2012.1.

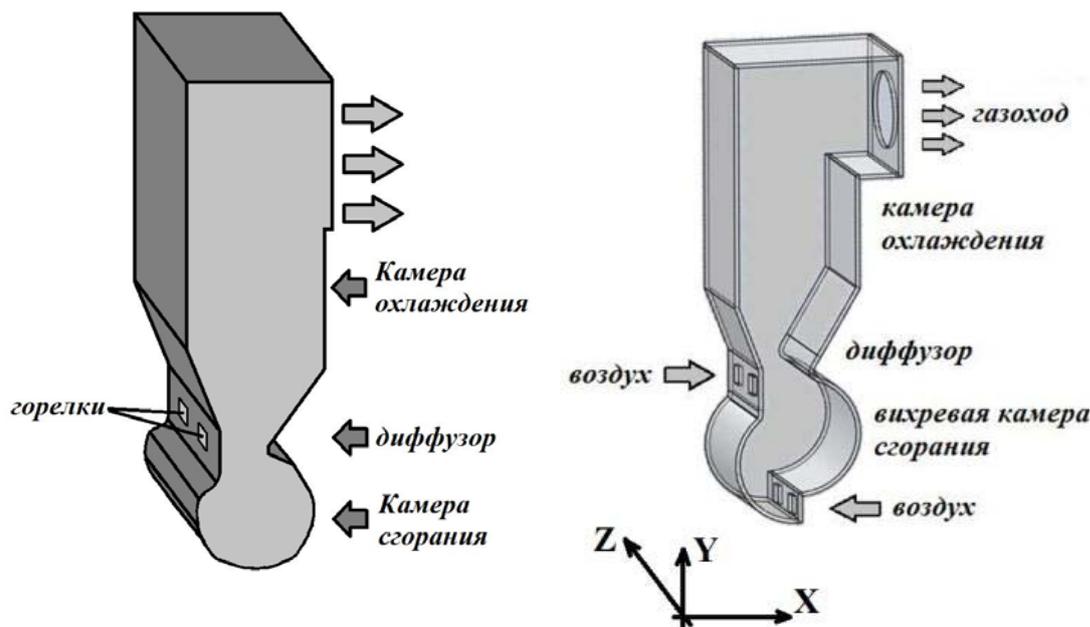


Рис. 1. Схема вихревой топki: схема Н. В. Голованова (слева), новая схема (справа)

тепловых потоков, увеличить время пребывания топливной частицы в камере горения, а следовательно, и полноту выгорания топлива, увеличить шлакоулавливание, снизить уровень выброса токсичных ингредиентов и тем самым повысить энергоэффективность и экологическую безопасность парогенератора.

Важным этапом разработки новых вихревых топok является исследование их внутренней аэродинамики на лабораторных моделях. Основными элементами конструкции парогенератора с вихревой топкой являются: камера горения с тангенциальным подводом струи аэросмеси, создающей вихревой факел с горизонтально расположенной осью вращения, диффузор и камера охлаждения, заканчивающаяся выпускным газоходом (рис. 1).

Ранее авторами были выполнены исследования [2–4] структуры течения и процессов переноса в модели вихревой топki, геометрически подобной одной из секций опытно-промышленного котла ТПЕ-427 (конструкция Н. В. Голованова, разработанная в Центральном котлотурбинном институте) Новосибирской ТЭЦ-3 (см. рис. 1), в результате которых выявлен ряд негативных факторов в структуре потока, таких как эффект Коанда в камере охлаждения, вынос части несгоревшего топлива из камеры горения, наличие возвратных течений и ре-

циркуляционных зон, прецессия вихревого ядра и др. Причиной этих эффектов являются некоторые конструктивные особенности данной топki. С целью усовершенствования конструкции был предложен новый тип топчного устройства с горизонтальным вихревым факелом (патент РФ № 2042084). Отличительными особенностями новой схемы вихревой топki (по сравнению с конструкцией Н. В. Голованова) являются: ввод пылевоздушных струй в верхнюю и нижнюю точки периметра камеры горения; отношение ширины горловины диффузора к удвоенному радиусу камеры горения составляет $H = 0,4$; центры дуг окружностей фронтальной и задней стенок модели в поперечном сечении смещены друг относительно друга строго по вертикали (см. рис. 1). Достоинствами данной конструкции являются рациональные габаритные характеристики, а распределенный тангенциальный ввод аэросмеси и горизонтальная ось вращения увеличивают полноту выгорания топлива. Наличие в исследуемой конструкции вихревой топki рассредоточенных по периметру горелочных струй, направленных навстречу друг другу, обеспечивает гибкость управления структурой течения и режимными параметрами.

Данная работа посвящена комплексному экспериментальному и численному исследованию аэродинамики в предложенной новой

конструкции вихревой топки (см. рис. 1). Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик пространственного турбулентного течения проводилось в изотермической лабораторной модели новой вихревой топки, созданной в масштабе 1 : 20. Для этой же геометрии проведено численное моделирование течения в изотермической постановке.

Экспериментальный стенд и методика измерений

Экспериментальные исследования внутренней аэродинамики новой схемы вихревой топки проводились на изотермической модели, изготовленной из гладкого оптически прозрачного оргстекла толщиной 10 мм, что позволяет использовать оптические методы диагностики потоков, такие как лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА), Particle Image Velocimetry (PIV). Внутренние размеры модели: $D_0 = x_{\max} = 300$ мм, $y_{\max} = 1200$ мм, $z_{\max} = 300$ мм. Здесь D_0 – характерный диаметр вихревой камеры, полученный как сумма радиусов составляющих ее контур двух полуокружностей. В экспериментах задавались следующие входные условия: рабочая среда – сжатый воздух; число Рейнольдса, рассчитанное по D_0 , составило $Re = 3 \cdot 10^5$ (при этом значение модуля среднерасходной скорости на срезе нижней горелки составило $U_{\text{ниж}} = 15,5$ м/с, а на срезе верхней – $U_{\text{верх}} = 16,5$ м/с; плотность воздуха при температуре 20 °С $\rho_0 = 1,2$ кг/м³; динами-



Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования аэродинамики в модели вихревой топки

ческая вязкость воздуха при температуре 20 °С $\mu_0 = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Па·с). Размер каждой амбразуры на входе в камеру горения: 40 × 50 мм. Угол наклона оси верхней горелки к горизонту (плоскости XZ) составляет $\beta = 15^\circ$, а ось нижней горелки расположена горизонтально. Отношение расходов через амбразуры верхних и нижних горелок $\sim 1 : 1$. Исследования проводились на экспериментальном стенде, представленном на рис. 2. Основными элементами установки являются: 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.

Бесконтактные измерения распределений скорости потока в интересующих сечениях производятся с помощью лазерно-доплеровской измерительной системы, разработанной в ИТ СО РАН (автоматизированный измерительный комплекс ЛАД-06). Система включает: оптоэлектронный модуль, координатно-перемещающее устройство, компьютер со специализированным программным обеспечением. ЛАД-06 измеряет две компоненты скорости потока, лежащие в плоскости, перпендикулярной к оптической оси оптоэлектронного блока. Методика проведения ЛДА-измерений аналогична описанной в работе [3], там же приведено обоснование оценки погрешности измерений. Концентрация трассеров (микрокапель специальной жидкости на основе глицерина) позволяет регистрировать сигналы от 300–500 трассеров в секунду. Малая инерционность микрокапель (характерный размер 1–5 мкм) обеспечивает соответствие их скорости параметрам потока воздуха.

Измерения поля скорости проводились в разных сечениях XY модели в узлах сетки с пространственным шагом 10 мм. В каждой точке измерение длилось 10 с, при этом суммарная погрешность измерения средней скорости не превышала 1,5 %.

Численное моделирование

Течение в изотермической модели усовершенствованной вихревой топки полагается стационарным, дозвуковым, турбулентным и имеет существенно пространственный характер, обусловленный конструктивной схемой топки. Аэродинамика такого

течения определяется осредненными по Рейнольдсу уравнениями неразрывности и количества движения, для замыкания которых выбрана «реализуемая» модификация k - ε модели турбулентности [5]. Конструкция вихревой топки имеет плоскость симметрии S_{XY} между двумя горелками, расположенными последовательно в направлении оси z (см. рис. 1). Течение предполагается симметричным относительно этой плоскости, поэтому с целью экономии вычислительных ресурсов рассчитывалась только половина объема топki, т. е. полусекция, имеющая ширину $z_{\max}/2$ по трансверсальной координате z и содержащая одну нижнюю и одну верхнюю горелку. На плоскости S_{XY} задаются условия зеркальной симметрии для всех величин. Построенная для конечнообъемной дискретизации уравнений расчетная неструктурированная сетка состоит из 351 784 гексаэдрических ячеек, ее вид на граничной поверхности моделируемого объема топki представлен на рис. 3. Для компонент скорости на стенках задаются граничные условия прилипания, описание методики моделирования турбулентности в пристеночной области приведено в [4]. В качестве граничных условий во входных сечениях каждого прямоугольного канала горелок задается равномерный профиль среднерасходной скорости, величина которой для верхней $U_{\text{верх}}$ и нижней $U_{\text{ниж}}$ горелок соответствует данным эксперимента, указанным выше, а параметры турбулентности k_0 и ε_0 в этих сечениях определяются через заданную величину интенсивности турбулентных пульсаций, полагаемую равной 5 %.

Для численной аппроксимации конвективных членов осредненных уравнений количества движения использовалась схема [6] второго порядка точности против потока, а для уравнений переноса k и ε – схема «пятой степени» Патанкара [7], обеспечивающая монотонность решения для скалярных величин. Для расщепления нелинейной связи между компонентами скорости и давлением применялся высокоэффективный алгоритм PISO [8].

Результаты исследований и их анализ

Структура течения в модели вихревой топki в виде векторных полей осредненной

скорости в различных сечениях показана на рис. 4–6. Видны следующие особенности аэродинамической картины в новой схеме вихревой топki. Истекающая из верхней амбразуры горелки струя, подпираемая снизу закрученным потоком из камеры горения, присоединяется к противоположной стенке и далее распространяется вниз как пристенная струя вдоль вогнутой поверхности камеры. От точки присоединения струи вверх (между струей и верхней частью противоположной стенки) до горловины камеры может располагаться область рециркуляции, причем вдоль стенки у горловины может происходить частичный вынос потока в камеру охлаждения. В нижней части камеры горения за вертикальным уступом стенки имеет место застойная область. Далее располагается зона смешения пристенной струи и струи, истекающей из нижней горелки. Вблизи центра вихревой камеры четко выражена область вихревого ядра, положение которой зависит от координаты z , что может указывать на наличие прецессии вихревого ядра. Это свидетельствует о том, что закрученный поток в камере горения имеет сложную пространственную структуру. Поток выходит из вихревой камеры горения в виде струи в плоскости симметрии S_{XY} между двумя горелками, а также вблизи торцевой стенки, т. е. структура течения в диффузорной части топki носит «перчаточный» характер. В области над верхней горелкой присутствуют возвратные течения и рециркуляционные зоны. Как расчетные, так и экспериментальные данные демонстрируют существенную пространственную неоднородность

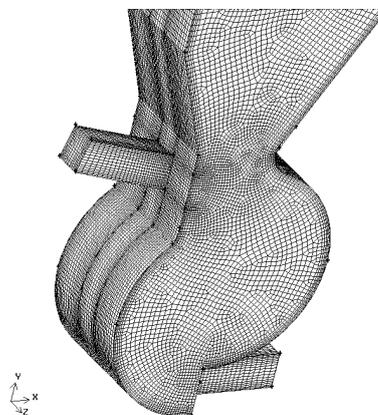


Рис. 3. Вид расчетной сетки на поверхности усовершенствованной вихревой топki (показана нижняя часть топki)

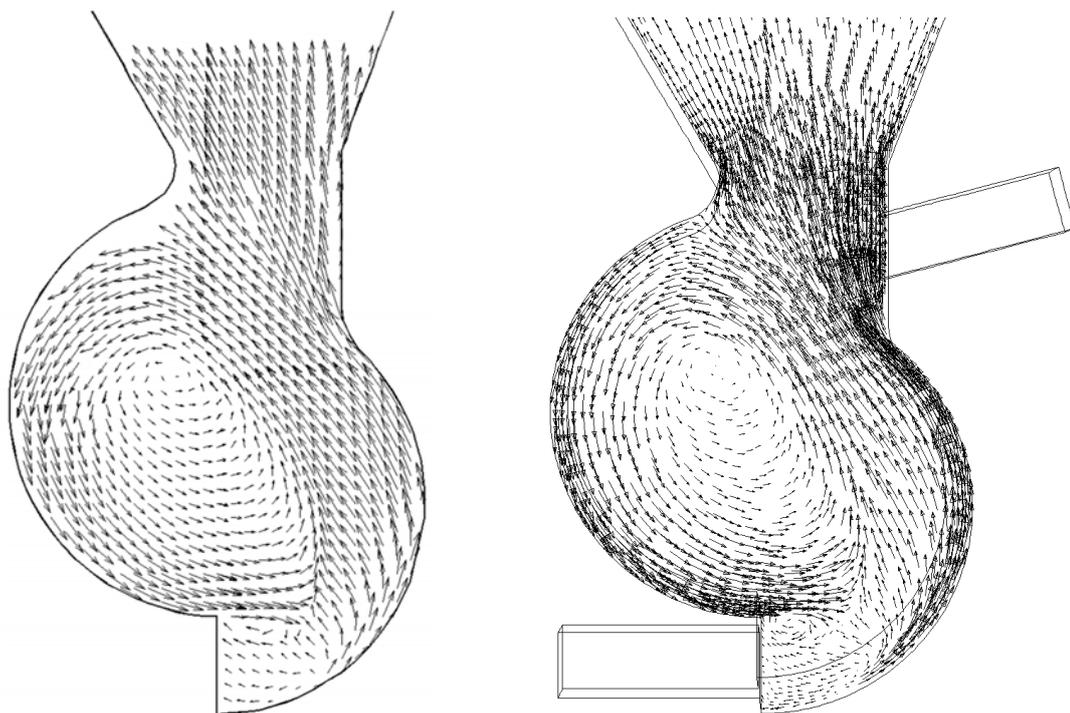


Рис. 4. Векторное поле скорости в сечении вблизи торцевой стенки ($z = 15$ мм): эксперимент (слева), численное моделирование (справа)

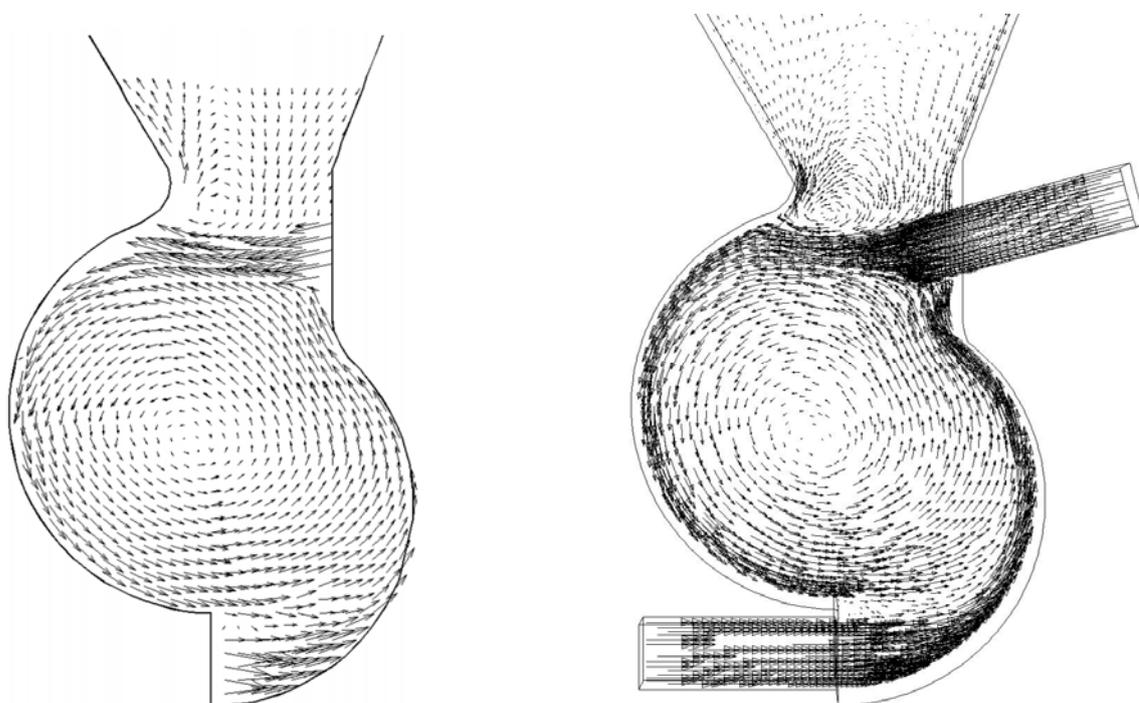


Рис. 5. Векторное поле скорости в сечении по центру горелки ($z = 80$ мм): эксперимент (слева), численное моделирование (справа)

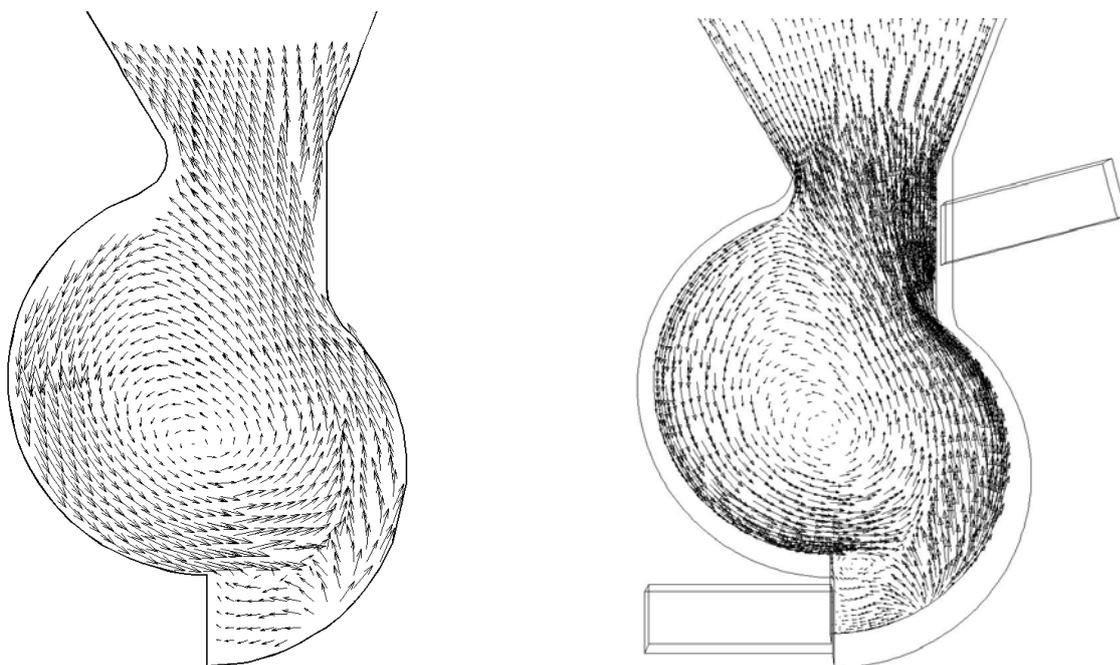


Рис. 6. Векторное поле скорости в сечении посередине между горелками ($z = 150$ мм): эксперимент (слева), численное моделирование (справа)

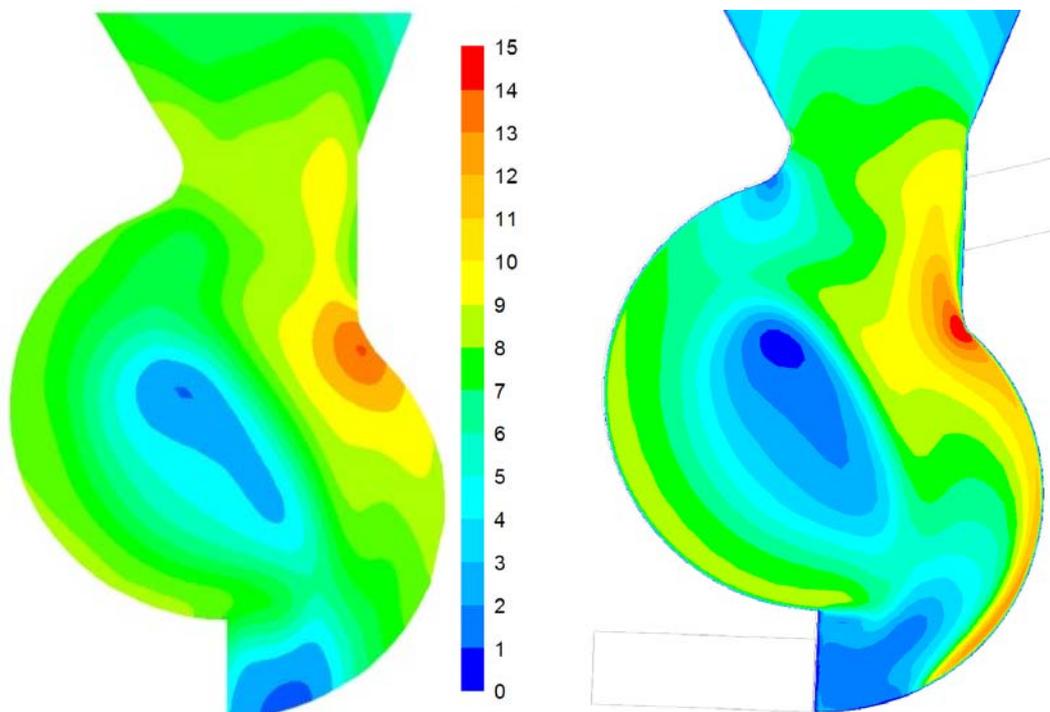


Рис. 7. Поле модуля скорости (м/с) в сечении вблизи торцевой стенки ($z = 15$ мм): эксперимент (слева); численное моделирование (справа)

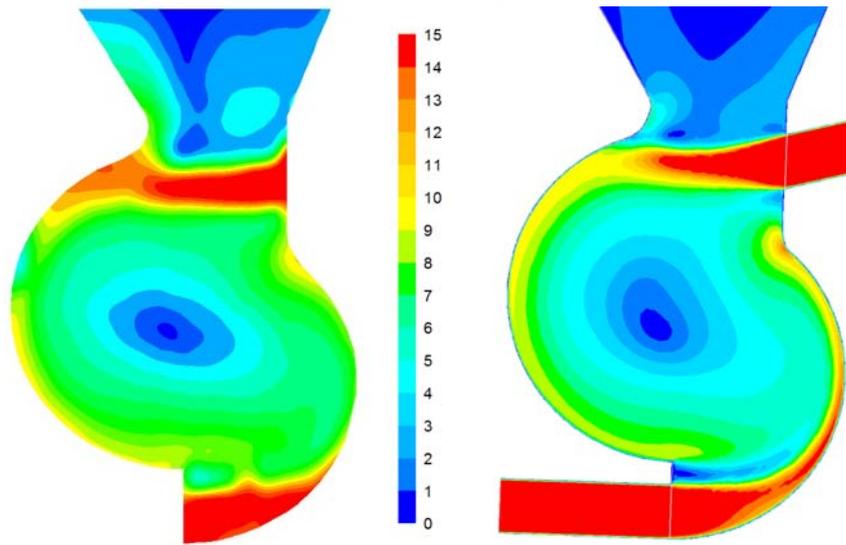


Рис. 8. Поле модуля скорости (м/с) в сечении по центру горелки ($z = 80$ мм): эксперимент (слева); численное моделирование (справа)

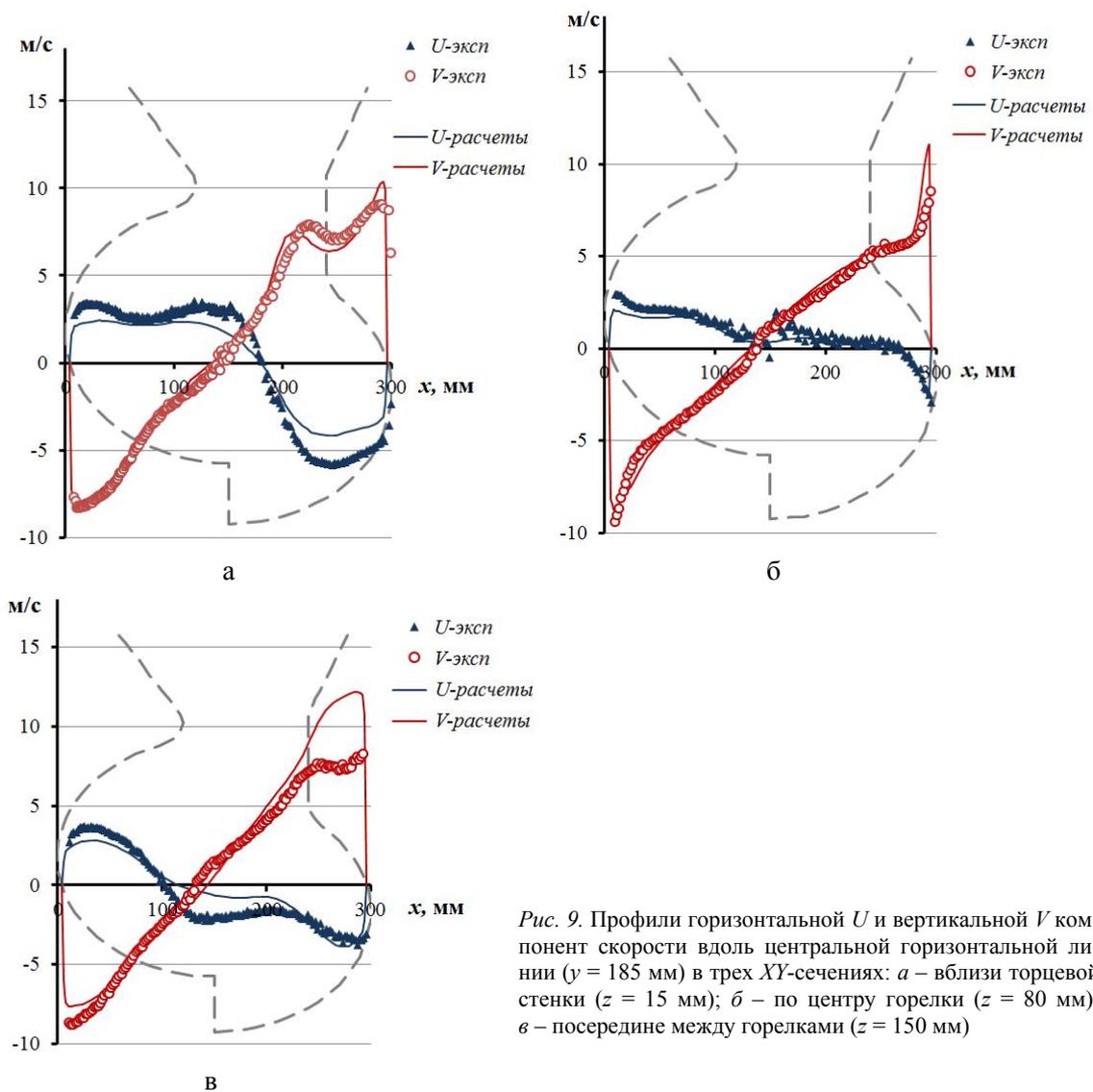


Рис. 9. Профили горизонтальной U и вертикальной V компонент скорости вдоль центральной горизонтальной линии ($y = 185$ мм) в трех XY -сечениях: a – вблизи торцевой стенки ($z = 15$ мм); $б$ – по центру горелки ($z = 80$ мм); $в$ – посередине между горелками ($z = 150$ мм)

родность структуры восходящего потока в камере охлаждения. Для векторных полей скорости наблюдается качественное соответствие структуры течения, полученной в эксперименте и в численном моделировании, см. рис. 4–6.

Изоконтур модуля скорости (в проекции на плоскость XU) в тех же сечениях лабораторной модели топки показаны на рис. 7–8, демонстрирующих удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных. При этом и в экспериментальных, и в расчетных картинах поля течения четко выражено изменение формы и местоположения центра вихревого ядра (как области минимума скорости внутри вихревой камеры) в зависимости от координаты сечения.

На рис. 9 приведены профили вертикальной и горизонтальной компонент осредненной скорости, построенные вдоль горизонтальной линии $y = 185$ мм (проходящей вблизи центра вихревой камеры) в трех сечениях лабораторной модели топки. Здесь представлены результаты численных расчетов и данные ЛДА-измерений (которые выполнены вдоль этой линии с более мелким пространственным шагом (до 1 мм) и большим временем (до 40 с) измерения в каждой точке). Профиль вертикальной компоненты скорости в вихревой камере является устойчивым и близким к осесимметричному для сечений по центру сопла и в плоскости симметрии (рис. 9 б, в), что соответствует распределению скорости в течении с потенциальным вихрем. В целом можно видеть, что результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с полученными экспериментальными данными.

Заключение

С помощью бесконтактного ЛДА-метода и численных расчетов проведено комплексное исследование поля скорости в вихревой топке нового типа с распределенным тангенциальным вводом топливных струй через верхние и нижние горелки. Сопоставление данных экспериментального и численного моделирования внутренней аэродинамики исследуемой вихревой топки показывает приемлемое для инженерной практики соответствие. Благодаря наличию дополнительной нижней горелки в новой

схеме топки (по сравнению с известной конструкцией Н. В. Голованова) обеспечивается гибкость управления аэродинамической структурой потока. Это является научной основой для проектирования новых угольных парогенераторов с вихревой технологией сжигания, а также для обоснования режимных и конструктивных параметров при реконструкции существующего парка котельных агрегатов. Созданный экспериментальный стенд и полученные результаты могут быть использованы в научно-образовательной деятельности при выполнении учебно-научных и научно-исследовательских работ магистрантами и аспирантами, в том числе проходящими подготовку на базе НОЦ «Энергетика» (НГУ и ИТ СО РАН).

Для проведения расчетов использовался CFD-пакет FLUENT версии 6.3, установленный на суперкомпьютерном кластере НКС-160 (ССКЦ СО РАН, Новосибирск).

Список литературы

1. Саломатов В. В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 853 с.
2. Ануфриев И. С., Аникин Ю. А., Саломатов В. В. и др. Экспериментальное исследование структуры закрученных потоков методом лазерной доплеровской анемометрии // Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика. 2011. Вып. 2 (14). С. 70–78.
3. Саломатов В. В., Шарытов О. В., Ануфриев И. С. и др. Физическое моделирование внутренней аэродинамики вихревой топки энергетического парогенератора // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2011. Т. 6, вып. 1. С. 60–65.
4. Саломатов В. В., Красинский Д. В., Аникин Ю. А. и др. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топке парогенератора // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 2. С. 266–276.
5. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A. et al. A New k - ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation // Computers & Fluids. 1995. Vol. 24 (3). P. 227–238.
6. FLUENT 6.3 User's Guide. Fluent Inc., 2006.

7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

8. Issa R. I. Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting // J. Comput. Phys. 1986. Vol. 62. P. 40–65.

Материал поступил в редколлегию 17.08.2012

**Yu. A. Anikin, I. S. Anufriev, D. V. Krasinsky, V. V. Salomatov
E. Yu. Shadrin, O. V. Sharypov**

**PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING OF INTERNAL AERODYNAMICS
OF THE VORTEX FURNACE WITH DISTRIBUTED TANGENTIAL INPUT
OF BURNER STREAMS**

The work is devoted to experimental and numerical modelling of internal aerodynamics of a new type furnace for the thermal power plant steam generator with technology of pulverized-coal combustion in vortex flow. Measurements of aerodynamic features of the flow in the laboratory air isothermal model of the furnace have been performed with two-component laser Doppler velocimeter. Numerical simulation of three-dimensional turbulent isothermal flow in the laboratory model has been carried out with the use of CFD package FLUENT. Detailed 3-D flow structure in the studied model has been obtained. The agreement between numerical predictions and measurements on mean flow velocity distributions has been shown.

Keywords: multiphase vortex flows, vortex furnace, tangential input of burner streams, laser Doppler anemometry, numerical modelling, prospective devices for thermal engineering.