

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ

Ю.А.Аникин<sup>1,2</sup>, И.С.Ануфриев<sup>1</sup>, Д.В.Красинский<sup>1</sup>, В.В.Саломатов<sup>1,2</sup>, О.В.Шарыпов<sup>1,2</sup>,  
Х.Энхжаргал<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>3</sup>Монгольский государственный университет науки и технологии, Улан-Батор

## MODELING OF FLOW STRUCTURE IN VORTEX FURNACE

Y.A.Anikin<sup>1,2</sup>, I.S.Anufriev<sup>1</sup>, D.V.Krasinsky<sup>1</sup>, V.V.Salomatov<sup>1,2</sup>, O.V.Sharypov<sup>1,2</sup>,  
Kh.Enkhjargal<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk

<sup>3</sup>Mongol State University of Science and Technology, Ulan-Bator

*The work is devoted to physical and mathematical modeling of isothermal interior aerodynamics of the model of vortex furnace of heat-and-power steam generator. The Laser Doppler Velocimeter LAD-05 was used for non-contact measurement of vortex flow characteristics. Numerical simulation of the 3D turbulent isothermal flow has been performed with the use of CFD package FLUENT. The distributions of main flow characteristics (pressure, velocity and vorticity fields, turbulent kinetic energy) were studied. The agreement of numerical calculation with experimental data was attained on high-level.*

### Введение

Технологии сжигания пылеугольного топлива в вихревом потоке относятся к наиболее перспективным и экологически безопасным технологиям сжигания низкокачественных углей [1]. Аэродинамика вихревой топki определяет характер процесса горения в целом. Она влияет на устойчивость распределения температуры и тепловых потоков, позволяет контролировать процессы зашлаковывания, а также уровень вредных выбросов. На протекание топочных процессов оказывают существенное влияние такие аэродинамические эффекты вихревого потока, как присоединение факела к одной из поверхностей нагрева (эффект Коанда), прецессия вихревого ядра, вторичные течения и рециркуляционные зоны. Это подтверждает актуальность проведения исследований аэродинамических характеристик закрученных потоков, целью которых является обоснование выбора конструктивных и режимных параметров новых парогенераторов с вихревыми топками, а также модернизации действующего котельного оборудования.

В качестве объекта исследований в данной работе выбрана вихревая топка опытно-промышленного котла ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3. Главными элементами конструкции вихревой топki являются: камера горения, в которой и происходит основное вихревое сжигание тангенциально вдуваемой пылеугольной смеси, диффузор и камера охлаждения, заканчивающаяся горизонтальным газоходом (рис. 1). Достоинствами конструкции являются рациональные массогабаритные характеристики топki, однофронтальное расположение горелок, маневренные характеристики. Процесс сжигания протекает при повышенных объемных теплонапряжениях, что обеспечивает жидкотекучее состояние шлаку. В таких топках интенсивный процесс ассимиляции оплавленных золовых частиц гарнисажным слоем шлака увеличивает коэффициент шлакоулавливания в топке и уменьшает унос из нее «летучей» золы.

Анализ фундаментальных работ применительно к вихревой топке такого типа свидетельствует о недостаточной изученности сложной структуры закрученных потоков, особенно трехмерных эффектов, что не позволяет перейти на новой научной основе к дальнейшей модернизации действующих и созданию новых перспективных котельных агрегатов с вихревой технологией сжигания. Поэтому целью данной работы является физическое и математическое моделирование внутренней аэродинамики вихревой топki теплоэнергетического парогенератора.

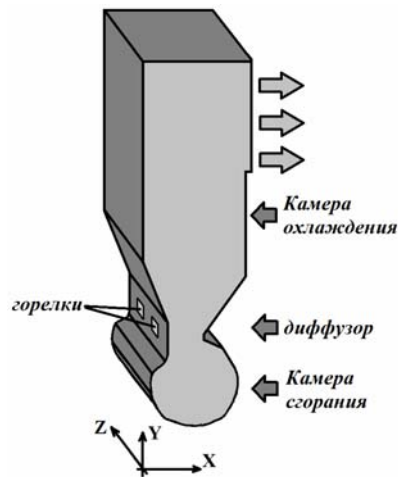


Рис. 1. Схема вихревой топки

### Экспериментальный стенд и методика измерений

Физическое моделирование внутренней аэродинамики исследуемой вихревой топки проводилось на изотермической модели, геометрически подобной (в масштабе 1:15) одной из секций опытно-промышленного котла ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3 (рис. 2). Модель изготовлена из оргстекла, характерные размеры:  $x_{\text{макс}} = 300$  мм,  $y_{\text{макс}} = 1300$  мм,  $z_{\text{макс}} = 330$  мм, отношение ширины горловины диффузора к диаметру вихревой камеры сгорания составляет  $H_x = 0,24$ . На фронтальной стенке под углом  $15^\circ$  к горизонту симметрично расположены два прямоугольных сопла (соответствующие горелочным амбразурам), через которые поступает сжатый воздух.

При физическом моделировании выбран геометрический параметр подобия  $\Sigma_f / F_T$ , являющийся постоянным для данного типа пылеугольной вихревой топки (ПВТ), где  $\Sigma_f$  – 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  $Re = 10^4 \div 10^6$  [2].

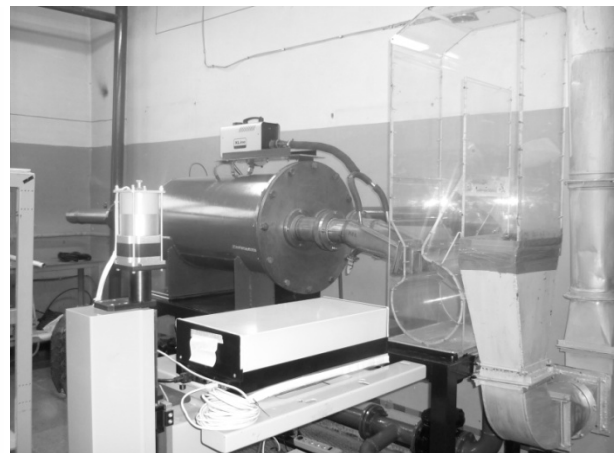
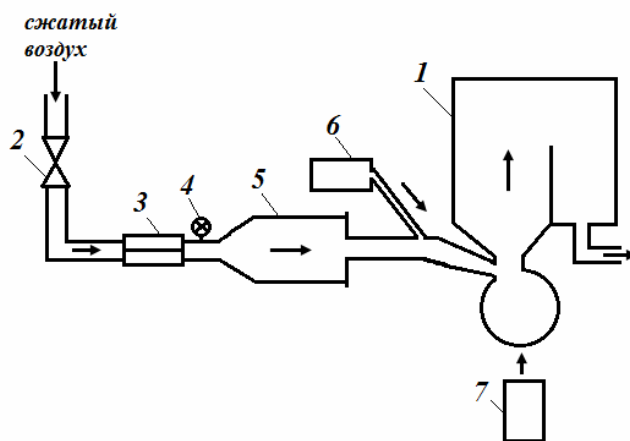


Рис. 2. Экспериментальный стенд по исследованию аэродинамики и процессов смешения в вихревой топке:

- 1 – модель вихревой топки; 2 – вентиль; 3 – регулятор давления (редуктор); 4 – манометр;
- 5 – ресивер (для сглаживания пульсаций давления); 6 – дымогенератор XLINE FOG 800;
- 7 – автоматизированный измерительный комплекс ЛАД-05

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем (см. рис. 2). Поток сжатого воздуха из магистрали 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 [3]. 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 которого прямо пропорциональна скорости трассеров. В качестве трассеров в работе 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). Координатное устройство (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 величиной 250 мм. Размеры исследуемой области модели топки составляли 300x500x200 мм. Чтобы охватить измерениями всю интересующую область, потребовалось провести несколько серий измерений и объединить результаты с учетом приведения координат в единую систему отсчета. Измерения двух компонент скорости потока проводились в плоскостях  $XU$  (при различных значениях координаты  $z$ ) в узлах сетки 28x47 с пространственным шагом 1 см.

Основной вклад в ошибку измерения среднего значения проекций скорости 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  $\sqrt{N}$ , 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  $N = 1000$  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 %.

### **Численное моделирование**

Течение в вихревой топке является дозвуковым, турбулентным и имеет существенно пространственный характер, обусловленный конструктивной схемой топки. Численное исследование такого течения в изотермической трехмерной постановке проводилось с использованием коммерческого CFD-пакета FLUENT вер.6.3. Математическая модель

установившегося пространственного турбулентного течения основана на осредненных по Рейнольдсу уравнениях неразрывности и количества движения, для замыкания которых выбрана т.н. «реализуемая» модификация  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности [4]. Достоинствами этой модели, по сравнению со «стандартной»  $k$ - $\varepsilon$  моделью турбулентности [5], являются меньшее число «констант» (так, значения параметра  $C_\mu$  определяются как функция от  $k$ ,  $\varepsilon$  и градиентов скорости, и лучше соответствуют экспериментальным наблюдениям, чем допущение  $C_\mu = \text{const}$  в «стандартной»  $k$ - $\varepsilon$  модели). А также более точная формулировка членов уравнения переноса скорости диссипации турбулентности  $\varepsilon$  (выведенного в [4] из точного уравнения переноса второго момента пульсаций завихренности), что обеспечивает значительно лучшую предсказательную способность модели и ее улучшенную вычислительную робастность. В этой модели достаточно задать только 4 константы:  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_2 = 1,9$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,2$ .

Построенная для конечнообъемной дискретизации уравнений расчетная неструктурированная сетка состоит из 254848 гексаэдрических ячеек, ее вид на граничной поверхности моделируемого объема топки представлен на рис. 3 (для увеличения показана только область вихревой камеры и диффузорная часть топки).

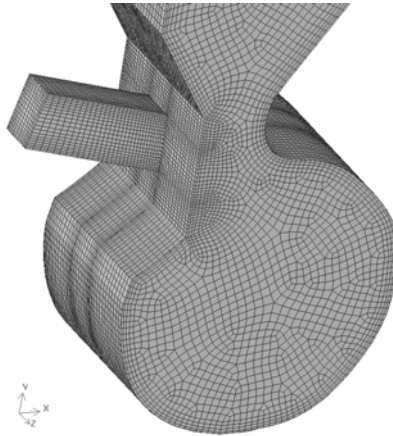


Рис. 3. Вид расчетной сетки на поверхности вихревой топки

Для компонент скорости на стенках задаются граничные условия прилипания, при этом для моделирования турбулентности в пристеночной области используется методика «улучшенного пристеночного моделирования» [6, 7], представляющая собой комбинацию двухзонного описания (с выделением зоны вязкого подслоя и буферной зоны, когда турбулентное число  $Re_r < 200$ ,  $r$  – расстояние по нормали от стенки до центра пристеночной ячейки) с описанием по модифицированному методу пристеночных функций [8], в т.ч. с учетом влияния градиента давления и эффектов неравновесности из-за искривления линий тока в сложном пространственном пограничном слое.

В качестве граничных условий во входном сечении прямоугольного канала сопла задавался равномерный профиль среднерасходной скорости, по модулю равной  $U_0 = 15$  м/с. Параметры турбулентности  $k_0$  и  $\varepsilon_0$  в этом сечении определялись через заданную величину интенсивности турбулентных пульсаций, полагаемую равной 5 %. На плоскости  $S_{xy}$  задаются условия зеркальной симметрии для всех величин. Тракт поворотного (выпускного) воздуховода котла имеет достаточную протяженность сверху вниз ( $\sim 1$  м, т.е. около 5 калибров относительно ширины канала воздуховода, см. рис. 1), чтобы вблизи его выходного сечения получить близкие к равномерным распределения характеристик потока – в этом сечении для всех величин, кроме давления, задаются т.н. «мягкие» граничные условия, а градиент давления в выходном сечении определяется из интегрального условия сохранения баланса массы.

Для численной аппроксимации конвективных членов осредненных уравнений количества движения использовалась схема QUICK [9] повышенного порядка точности, а для уравнений турбулентного переноса – схема «пятой степени» Патанкара [10], позволяющая обеспечить монотонность решения для скалярных величин. Для расщепления нелинейной связи между компонентами скорости и давлением применялся алгоритм PISO [11], который представляет собой модификацию известного алгоритма SIMPLE [10] путем введения дополнительных внутренних итераций для поправок скорости и давления типа «предиктор–корректор», сводящихся к решению дополнительного числа уравнений Пуассона для поправок давления. Несмотря на увеличение объема вычислений на каждой «глобальной» итерации, дополнительные подытерации «предиктор–корректор» в алгоритме PISO обеспечивают значительно лучшее согласование полей скорости и давления, что приводит к более надежной и быстрой сходимости итерационного процесса в целом.

### Результаты исследований и их анализ

Экспериментальные данные и численные расчеты получены при одних и тех же входных условиях: рабочая среда – сжатый воздух; число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру вихревой топки (0,29 м), составило  $Re = 3 \cdot 10^5$  (при этом, среднерасходная скорость на срезе сопла  $U_0 = 15$  м/с, плотность воздуха при температуре  $20^\circ\text{C}$   $\rho_0 = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость воздуха при температуре  $20^\circ\text{C}$   $\mu_0 = 1,82 \cdot 10^{-5}$  Па·с). Размер сопла в сечении на входе в камеру сгорания – 40×60 мм.

Структура течения в модели вихревой топки показана на рис. 4. Анализ результатов показывает, что закрученный поток в камере сгорания имеет пространственную структуру, для которой положение центра вихря не зависит от координаты  $z$ . Как расчетные, так и экспериментальные данные, демонстрируют существенную пространственную неоднородность структуры восходящего потока в камере 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 её близким расположением к фронтальной стенке камеры охлаждения, что способствует проявлению эффекта Коанда.

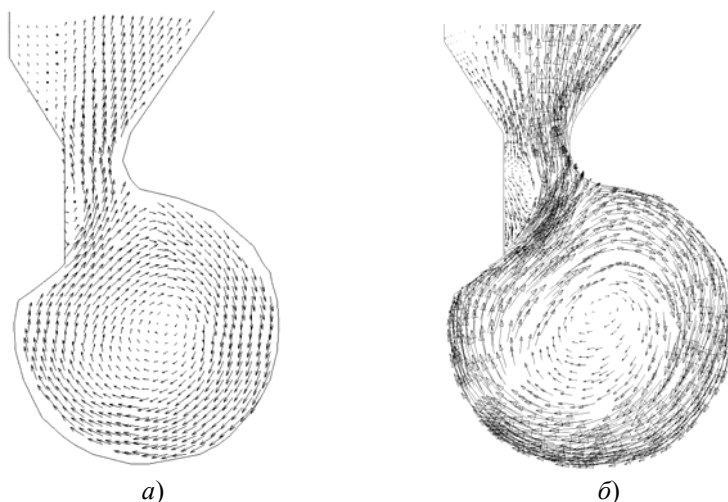


Рис. 4. Поле скорости в модели вихревой топки при  $z = 0,5$  (сечение  $XU$  посередине между соплами): данные эксперимента (а), результаты численного моделирования (б)

На рис. 5 показаны распределения кинетической энергии турбулентности. Видно, что профили кинетической энергии турбулентности имеют максимальное значение у правой стенки модели, что, по-видимому, вызвано «размыванием» входной струи, создающей

закрутку потока. По направлению к левой стенке интенсивность кинетической энергии турбулентности уменьшается. Такая быстрая ламинаризация течения вызвана действием центробежной силы, возникающей при течении вдоль вогнутой стенки.

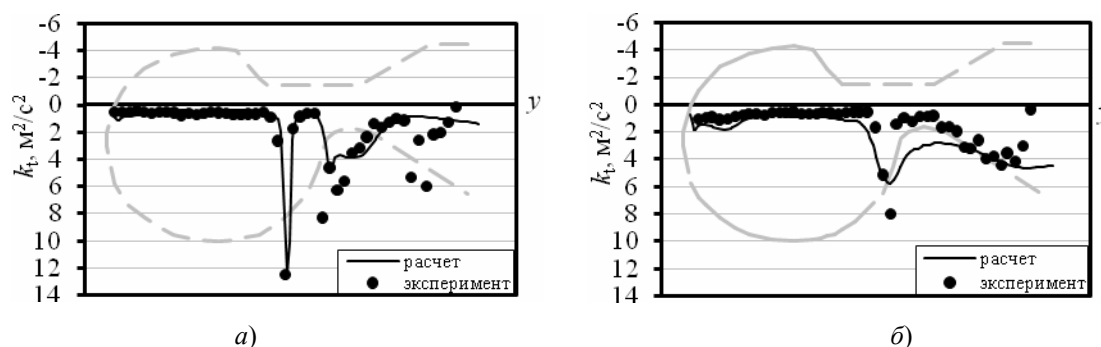


Рис. 5. Распределение кинетической энергии турбулентности вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр камеры сгорания ( $y = 150$  мм): сечение  $z = 0,23$  (а) (по центру сопла); сечение  $z = 0,5$  (б) (посередине между соплами)

### Заключение

С помощью бесконтактного ЛДА-метода и численного моделирования исследована внутренняя аэродинамика лабораторной модели вихревой топки опытно-промышленного котла ТПЕ-427, проанализировано поле скорости в различных сечениях, получены распределения кинетической энергии турбулентности потока. Полученные результаты применимы для использования при проектировании котлов с вихревыми топками.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 10-08-01093-а, 10-08-90032-Бел\_а) и Минобрнауки РФ (АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»).

### Список литературы

1. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 853 с.
2. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982. – 280 с.
3. Меледин В.Г., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В. и др. Лазерная доплеровская измерительная система для 2D диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05. В кн.: Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.5 – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 343–344.
4. Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., and Zhu J. A New k- $\epsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. Computers & Fluids. Vol.24(3). 1995. P.227–238.
5. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 1972.
6. Jongen T. Simulation and Modeling of Turbulent Incompressible Flows. PhD thesis. Lausanne (Switzerland): EPF Lausanne, 1992.
7. FLUENT 6.3 User's Guide. Fluent Inc., 2006.
8. Kim S.-E., Choudhury D. A Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient. ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows. – ASME, 1995.
9. Leonard B.P., Mokhtari S. ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow. NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12). – NASA Lewis Research Center, 1990.
10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
11. Issa R.I. Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting. J.Comput.Phys. Vol.62. 1986. P.40–65.