

МЕХАНИКА

УДК 621.18, 533.6.08

И.С. Ануфриев, Ю.А. Аникин, В.В. Саломатов,
О.В. Шарыпов, Х. Энхжаргал

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В МОДЕЛИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ
МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ¹**

Проведено физическое моделирование внутренней аэродинамики изотермической модели вихревой топki энергетического парогенератора. Диагностика потоков выполнена с применением современной бесконтактной лазерно-доплеровской измерительной системы. Получены новые данные о структуре вихревого течения в исследуемой модели. Результаты экспериментальных исследований сопоставлены с данными численных расчетов.

Ключевые слова: *структура закрученных потоков, управление горением, бесконтактные методы диагностики.*

В настоящее время одной из наиболее перспективных и экологически безопасных технологий теплоэнергетики при сжигании низкосортных углей является технология факельного сжигания пылеугольного топлива в вихревом потоке [1]. Известно, что оптимальной организацией аэродинамики вихревых топочных устройств можно повлиять на устойчивость горения, добиться требуемых скоростей и температур в топочном объеме, увеличить коэффициент шлакоулавливания, снизить уровень выбросов токсичных веществ в окружающую среду. Этим определяется высокий интерес к исследованию вихревых процессов горения и их применению в практике. Разработка (с целью внедрения в теплоэнергетике) перспективных вихревых аппаратов и новых технологий сжигания осложняется многообразием и сложностью процессов, протекающих в вихревых газодисперсных потоках с горением, что принципиально затрудняет поиск эффективных инженерных решений при конструировании топливосжигающих устройств нового типа. Недостаточная изученность сложной структуры закрученного газодисперсного потока, межфазного теплового и силового взаимодействия, физико-химических превращений в органической и минеральной частях топлива и других процессов в вихревых устройствах на данном этапе свидетельствует о необходимости научного обоснования применяемых инженерных методов их расчетов, а также способов оценки энергетической эффективности и экологической безопасности нового оборудования.

С развитием вычислительной техники численное моделирование стало основным подходом при выполнении НИР и НИОКР, направленных на оптимизацию существующих и разработку новых конструктивных решений энергетических ап-

¹ 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»).

паратов. Однако сами математические модели и численные алгоритмы нуждаются во всесторонней проверке и тщательном тестировании. Наиболее эффективной и надежной верификацией является сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными. Тем самым физическое моделирование является необходимым этапом разработки новых типов крупных энергетических установок. Вместе с ростом требований к достоверности результатов численного моделирования, возрастают требования к точности и объему информации, получаемой в экспериментах. Современный уровень физического моделирования процессов в теплоэнергетическом оборудовании в первую очередь предполагает получение данных о трехмерной структуре потока, включая как осредненные, так и пульсационные характеристики данных о распределении скорости, температуры, концентрации и других параметров. В условиях лабораторного моделирования этим задачам отвечают бесконтактные оптические методы измерений, такие, как лазерная доплеровская анемометрия, тепловизионные методы, полевые методы измерения скорости, концентрации, температуры (particle image velocimetry, planar laser-induced fluorescence). Указанные методы, обеспечивая исчерпывающую информацию о течении и процессах переноса в модели изучаемого аппарата, позволяют глубже понять закономерности топочных процессов и проанализировать возможности оптимизации конструктивных и режимных параметров разрабатываемых котлов с вихревой технологией сжигания топлива.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению структуры изотермического закрученного потока в модели вихревой топki с применением метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Модель топki воспроизводит в масштабе 1:15 одну из секций опытно-промышленного котла ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3. Принципиальная особенность конструкции данного котла, разработанного в НПО ЦКТИ, заключается в топочном устройстве с горизонтальным вихрем, обеспечивающим: распределенный тангенциальный ввод газодисперсной среды с высокой циркуляцией потока, высокое объемное теплонапряжение, непрерывное жидкое шлакоудаление с высоким коэффициентом шлакоулавливания, режимы высокотемпературного сжигания низкосортных углей, уменьшенные массогабаритные размеры.

Экспериментальные установки и методика измерений

Физическое моделирование внутренней аэродинамики исследуемой вихревой топki проводилось на изотермической модели, изготовленной из оргстекла (рис. 1). 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° к горизонту симметрично расположены два прямоугольных сопла (соответствующие амбразурам горелок), через которые поступает сжатый воздух. При физическом моделировании использован геометриче-

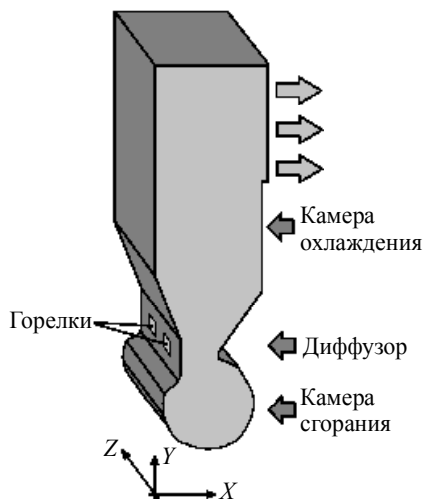


Рис. 1. Схема вихревой топki

ский параметр подобия Σ_f/F_T , характерный для данного типа парогенераторов с вихревой топкой, где Σ_f – сумма площадей сечения горелок, F_T – площадь диаметрального сечения камеры сгорания. Число Рейнольдса ($Re \sim 10^5$) в лабораторных условиях ниже, чем в натурных. Моделирование структуры потока при этом оправдано благодаря автомодельности течения в диапазоне $Re = 10^4 \div 10^6$ [2].

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. Поток сжатого воздуха из магистрали подавался в модель вихревой топки (1) через регулятор давления (3) и ресивер (5) с целью стабилизации потока. Давление после регулятора контролировалось при помощи образцового манометра (4) (рис. 2). 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,

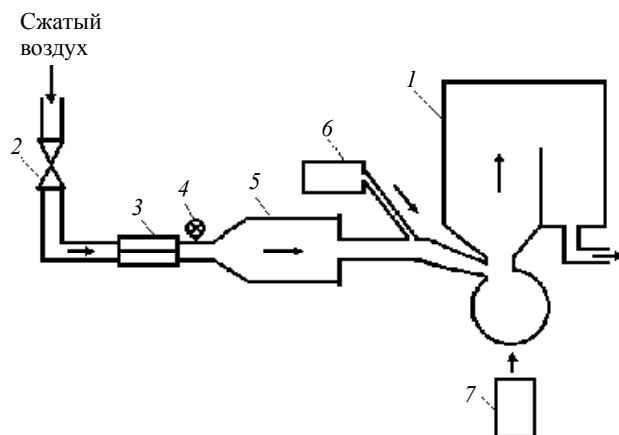


Рис. 2. Экспериментальный стенд по исследованию аэродинамики и процессов смешения в вихревой топке: 1 – модель вихревой топки; 2 – вентиль; 3 – регулятор давления (редуктор); 4 – манометр; 5 – ресивер (для сглаживания пульсаций давления); 6 – дымогенератор XLINE FOG 800; 7 – автоматизированный измерительный комплекс ЛАД-05

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. Трассеры примешивались к основному потоку воздуха через отверстия в соплах, до входа в модель, и таким образом засеивали весь исследуемый объем. Их концентрация позволяла измерительной системе регистрировать 300 – 500 частиц в секунду. Характерный размер микрокапель (1 – 5 мкм) обеспечивал высокое соответствие их траекторий линиям тока.

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 XY (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 300×500×165 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. Поскольку средние скорости в разных точках эксперимента значительно различаются, имеет смысл привести размер доверительного интервала в относительных величинах, приведенных к средней скорости в данной точке:

$$U = \bar{U} \pm \Delta U = \bar{U} \left(1 \pm \frac{t(\alpha, N)S}{\bar{U}\sqrt{N}} \right),$$

где S – вычисленное стандартное отклонение, N – количество измерений в точке, α – вероятность попадания в доверительный интервал, $t(\alpha, N)$ – квантиль Стьюдента. Автоматизированный эксперимент был спланирован так, чтобы в каждой точке эксперимента для получения среднего значения скорости было произведено не менее 1000 измерений (по $N = 500$ для каждой компоненты скорости). Для $\alpha = 0,95 \%$ и $N > 25$ $t(\alpha, N) \approx 2$. Выявлено, что для каждой точки эксперимента отношение стандартного отклонения к среднему значению не превышало

$S/\bar{U} < 0,35$. Тогда $\frac{t(\alpha, N)S}{\bar{U}\sqrt{N}} < 0,035$. То есть для каждой точки измерения 95 %-й доверительный интервал не превышал 3,5 % от вычисленной локальной средней

скорости. Пульсации скорости, определяемые как среднеквадратичное отклонение по всем измерениям в точке, не превышали 1,2 м/с в каждой точке эксперимента.

Результаты исследований и их анализ

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). Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру модели вихревой топки ($d = 0,29$ м), составляло $Re = 3 \cdot 10^5$. Структура течения в исследуемой модели вихревой топки, в сечении по центру сопла ($z = 0,23 z_{\text{макс}}$), полученная в экспериментах, показана на рис. 3. На рис. 4 приведены поля скорости в сечении посередине между соплами (при $z = 0,5 z_{\text{макс}}$), полученные при ЛДА-измерениях (а) и в результате численных расчетов при $Re = 5 \cdot 10^5$ [4] (б). Численное моделирование аэродинамики вихревой топки [4] проводилось в постановке изотермического несжимаемого течения с использованием осредненных по Рейнольдсу трехмерных уравнений неразрывности и количества движения, замыкаемых «стандартной» k - ε -моделью турбулентности.

Из анализа результатов, представленных на рис. 3 и 4, следует, что закрученный поток в камере сгорания имеет пространственную структуру, для которой положение центра вихря практически не зависит от координаты z . Как расчетные, так и экспериментальные данные (см. рис. 4), 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.

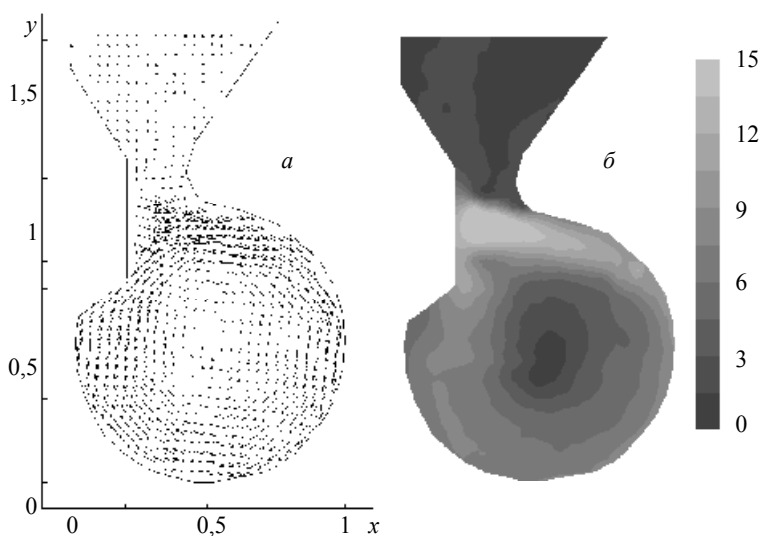


Рис. 3. Результаты ЛДА-измерений в модели вихревой топки в сечении $z = 0,23 z_{\text{макс}}$ (по центру сопла): скорость (а); модуль скорости, м/с (б)

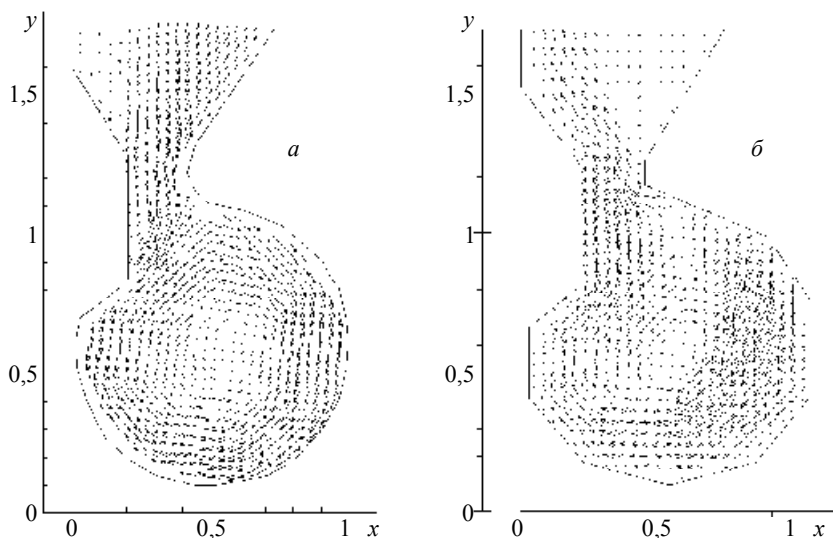


Рис. 4. Поле скорости в модели вихревой топки при $z = 0,5 z_{\max}$: данные ЛДА-измерений (а); результаты численного моделирования [4] (б)

Сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования позволяет заметить, что рассчитанная структура потока «в первом приближении» соответствует измеренной, однако на более детальном уровне имеются расхождения, они наиболее заметны для распределения скорости потока в камере охлаждения.

На рис. 5 приведены распределения горизонтальной U и вертикальной V компонент скорости вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр камеры сгорания ($y = 150$ мм), в сечении $z = 0,5 z_{\max}$ (посередине между соплами). Из рис. 5, а видно, что горизонтальная компонента скорости трижды меняет знак. Отрицательные значения в правой части графика можно объяснить тем, что входная струя в этом сечении продолжает равномерно распределяться в горизонтальном направлении. Профиль вертикальной компоненты скорости (см. рис. 5, б) соответствует распределению скорости в течении с потенциальным вихрем. Небольшое отклонение наблюдается в центре вихря, так как вследствие интенсивного турбулентного перемешивания имеется область перегиба с практически нулевой вертикальной компонентой. На рис. 6 представлены аналогичные распределения компонент скорости, вдоль вертикальной линии, проходящей через центр горловины диффузора ($x = 93,5$ мм).

Обработка результатов ЛДА-измерений позволяет получить распределение кинетической энергии турбулентности потока, которая определялась по следующей формуле:

$$k_t = 0,5 \left(\overline{(U')^2} + \overline{(V')^2} \right),$$

где U' , V' – отклонения от среднего значения горизонтальной и вертикальной компонент скорости соответственно, черта сверху – знак осреднения. На рис. 7 показаны распределения кинетической энергии турбулентности вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр камеры сгорания, в сечении по центру сопла и в сечении посередине между соплами.

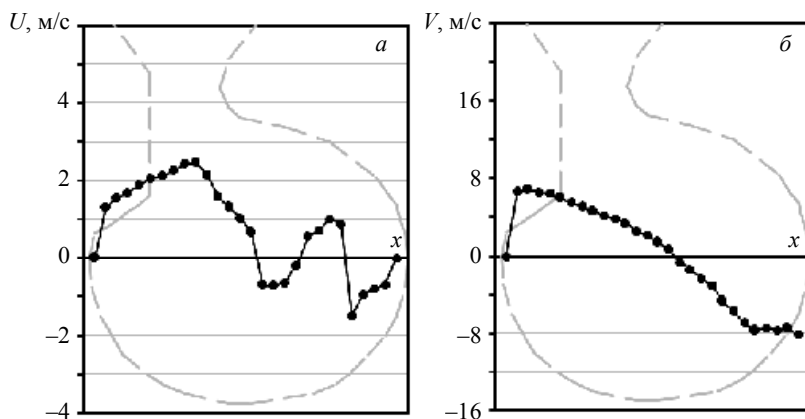


Рис. 5. Распределение горизонтальной (а) и вертикальной (б) компонент скорости вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр камеры сгорания ($y = 150$ мм), в сечении $z = 0,5 z_{\text{макс}}$

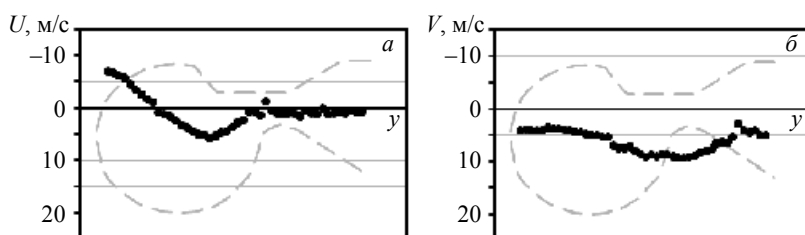


Рис. 6. Распределение горизонтальной (а) и вертикальной (б) компонент скорости вдоль вертикальной линии, проходящей через центр горловины диффузора ($x = 93,5$ мм), в сечении $z = 0,5 z_{\text{макс}}$

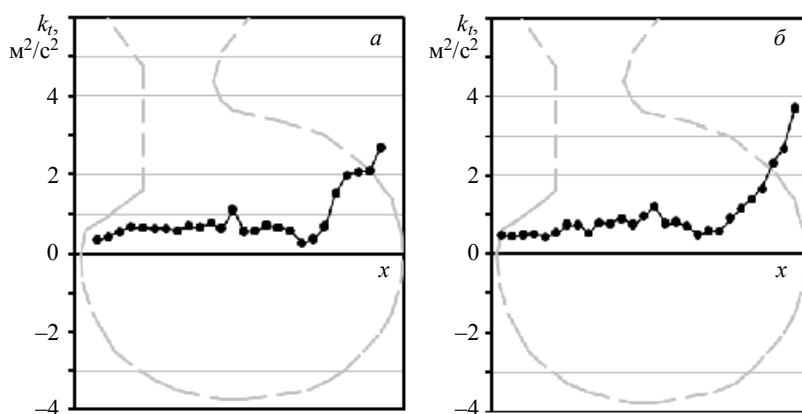


Рис. 7. Распределение кинетической энергии турбулентности вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр камеры сгорания ($y = 150$ мм): сечение $z = 0,23 z_{\text{макс}}$ (по центру сопла) (а); сечение $z = 0,5 z_{\text{макс}}$ (посередине между соплами) (б)

Из рис. 7 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.

Заключение

С помощью бесконтактного ЛДА-метода экспериментально исследована внутренняя аэродинамика лабораторной модели вихревой топки опытно-промышленного котла ТПЕ-427, проанализировано поле скорости в различных сечениях, получены распределения кинетической энергии турбулентности потока.

Обнаружено проявление эффекта Коанда – «прилипание» к стенке камеры охлаждения горячей струи на выходе из диффузора. Данная особенность течения может на практике приводить к негативным последствиям. Для ее устранения следует изменить положение и размер горловины камеры сгорания при разработке новых конструкций вихревых топков.

Сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования показало, что использование «стандартной» k - ϵ -модели «в первом приближении» применимо для описания структуры потока в вихревой топке, однако может не обеспечивать достаточного соответствия при более детальном анализе распределения скорости в объеме камеры сгорания и особенно – на выходе через диффузор в камеру охлаждения.

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.

ЛИТЕРАТУРА

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 // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 5. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 343–344.
4. Keyno A.W., Krasinsky D.V., Rychkov A.D., Salomatov V.V. Experimental and numerical modelling of the vortex furnace aerodynamics // Russ. J. Eng. Thermophys. 1996. V. 6. P. 47–62.

Статья поступила 12.02.2011 г.

Anufriev I.S., Anikin Yu.A., Sharypov O.V., Enkhzhargal Kh. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF VORTEX FLOW STRUCTURE IN THE MODEL OF A VORTEX FURNACE BY THE DOPPLER LASER ANEMOMETRY METHOD. Physical modeling of interior aerodynamics of the isothermal model of the vortex furnace of the energy steam generator was carried out. The modern non-contact laser Doppler measuring system was used for flow diagnostics. New information about vortex flow structure in the studied model was obtained. Experimental results were compared with the numerical data.

Keywords: vortex flow structure, coal combustion control, non-contact diagnostic methods

ANUFRIEV Igor Sergeevich (Kutateladze Institute of Thermophysics)

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

ANIKIN Yuri Alexandrovich

(Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk State University)

E-mail: yury.anikin@raisegroup.com

SALOMATOV Vladimir Vasilyevich

(Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk State University)

E-mail: vvs@itp.nsc.ru

SHARYPOV Oleg Vladimirovich

(Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk State University)

E-mail: sharypov@itp.nsc.ru

ENKHJARGAL Khaltapyn (Mongol University of Science and Technology)

E-mail: ch_enhjargal@yahoo.com