

15. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
16. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 391 с.
17. Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. – 1969. – № 5. – С. 959–967.
18. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
19. Коздoba Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 227 с.
20. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание накаливаемой одиночной частицей жидких углеводородных топлив // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. – С. 5–9.
21. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. – 2009. – № 5. – С. 42–50.
22. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle–liquid fuel interface on the ignition characteristics // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – № 2. – P. 162–167.
23. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53. – Iss. 5–6. – P. 923–930.
24. Варафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: ООО «Старс», 2006. – 720 с.
25. Теплофизический справочник: в 2 т. Т. 1 / под ред. В.Н. Юрнева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 743 с.
26. Теплофизический справочник: в 2 т. Т. 2 / под ред. В.Н. Юрнева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 896 с.
27. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. Ч. 1. – М.: Пожнаука, 2004. – 713 с.

Поступила 19.12.2012 г.

УДК 621.18

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

И.С. Ануфриев, Г.В. Кузнецов*, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов, Ю.А. Аникин, С.В. Двойнишников, Д.В. Куликов,
В.В. Рахманов

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

*Томский политехнический университет

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Исследована структура изотермического закрученного течения в модели вихревой топки новой конструкции с горизонтальной осью вращения и распределенным тангенциальным вводом топливовоздушных струй с помощью метода цифровой трассерной визуализации. Измерены осредненные характеристики поля скорости в ряде сечений. Проанализированы особенности внутренней аэродинамики новой конструкции вихревой топки парогенератора при различных режимных параметрах.

Ключевые слова:

Турбулентные закрученные потоки, вихревая топка, тангенциальный ввод горелочных струй, метод цифровой трассерной визуализации, перспективное оборудование теплоэнергетики.

Key words:

Turbulent swirl flows, vortex furnace, tangential input of burner streams, particle image velocimetry, promising energy equipment.

При проектировании и разработке новых аппаратов и технологий теплоэнергетики ключевым этапом является физическое моделирование, которое позволяет при низких затратах изучить основные физические процессы в элементах энергетического оборудования с целью оптимизации конструктивных и режимных параметров разрабатываемых устройств [1, 2].

В данной работе исследуется вихревое топочное устройство новой конструкции с горизонтальной осью вращения и рассредоточенным по периметру тангенциальным вводом топливовоздушных струй (патент РФ № 2042084). Основными отличительными особенностями новой конструкции вихревой топки (по сравнению с известной топкой Н.В. Голванова [3]) является: дополнительный тангенциальный подвод топлива, расположенный в ни-

жней части камеры сгорания, и увеличенная ширина горловины диффузора. Наличие в исследуемой конструкции вихревой топки рассредоточенных по периметру (условной окружности камеры горения) горелочных струй, ориентированных в противоположном направлении, обеспечивает гибкость управления структурой течения и режимными параметрами, а горизонтальная ось вращения потока увеличивает полноту выгорания топлива.

Цель данной работы – экспериментальные исследования структуры закрученного течения в новой конструкции вихревой топки. Измерение аэродинамических характеристик пространственного турбулентного течения проводилось в изотермической лабораторной модели, изготовленной из оргстекла толщиной 10 мм (рис. 1, а). Основными эл-

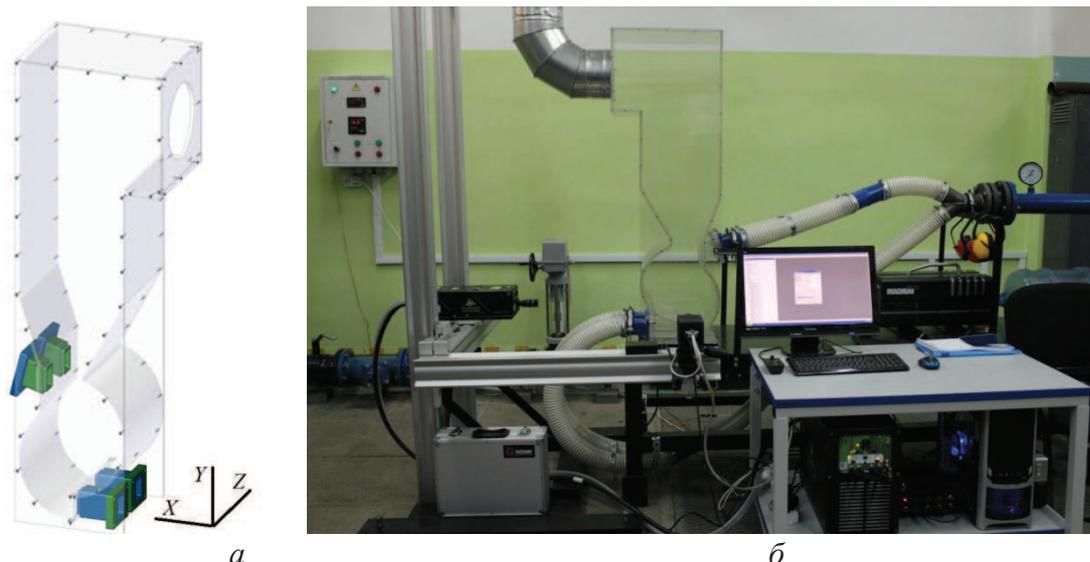


Рис. 1. а) модель вихревой топки новой конструкции (габаритные размеры 300×1200×300 мм); б) измерительный комплекс «Полис» на экспериментальном стенде по исследованию аэродинамики и процессов переноса в вихревой топке

элементами экспериментального стенда для исследования аэродинамики и процессов смешения в модели вихревой топки являются (рис. 1, б): автоматизированный комплекс регулирования подачи сжатого воздуха; изотермическая лабораторная модель вихревой топки новой конструкции; контролируемые приборы; стенд подключен к сети сжатого воздуха; установка оснащена устройством засева потока – генератор тумана Martin Magnum 1800; стенд подключен к системе вентиляции. 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]. Принцип работы экспериментального стенда описан в работе [5].

Диагностика вихревого течения осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV). Метод PIV – оптический метод измерения полей скорости жидкости и газа. Для измерения полей скорости в интересующих сечениях модели применялась PIV-система «Полис», разработанная в ИТ СО РАН (рис. 1, б). Система позволяет измерять две компоненты вектора скорости одновременно во всем заданном сечении. Измерительный комплекс «Полис» включает в себя: двойной импульсный Nd: YAG лазер QuantelEVG с энергией в импульсе 145 мДж; объектив для формирования лазерного ножа; цифровую кросс-корреляционную камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей; широкоугольный объектив Nikon 28 mm F/2.8 D; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow.

Принцип метода PIV состоит в следующем [6] (рис. 2). Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие частицы, взвешенные

в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Скорость потока определяется расчетом перемещения, которое совершают частицы за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинам с использованием регулярного разбиения на элементарные подобласти. Варьирование времени задержки между лазерными вспышками позволяет изменять диапазон измеряемых скоростей от долей миллиметра в секунду до сверхзвуковых. В качестве трассеров в экспериментах использовались микрокапли специальной жидкости на основе глицерина, создаваемые дымогенератором. Подача трассеров осуществлялась через трубу Вентури, установленную в канал основного потока до входа в модель. Их концентрация регулировалась уровнем мощности дымогенератора. Малая инерционность микрокапель (характерный размер 1–5 мкм) обеспечивает соответствие их скорости параметрам потока воздуха.

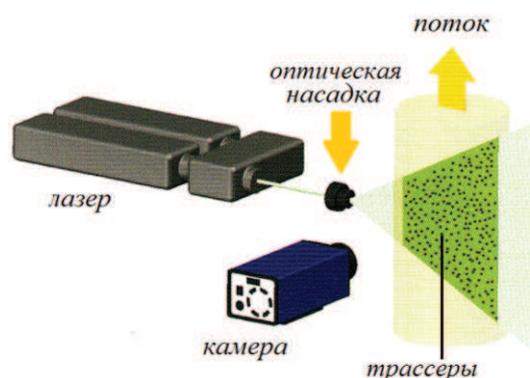


Рис. 2. Схема PIV-измерений

Экспериментальные исследования поля скорости течения в модели вихревой топки новой конструкции проводились при следующих условиях: рабочая среда – сжатый воздух; число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру вихревой топки (300 мм), $\sim 10^5$ (при этом значение модуля среднерасходной скорости на срезе каждого сопла варьировалось от 5 до 20 м/с; плотность воздуха при 20 °С 1,2 кг/м³; динамическая вязкость воздуха при 20 °С $1,82 \cdot 10^{-5}$ Па·с). Размер сопла в сечении

на входе в камеру сгорания 40×50 мм. Угол наклона оси верхней горелки к горизонту (плоскости XOZ) составляет $\beta=15^\circ$, а ось нижней горелки расположена горизонтально. Значение величины относительного расхода через верхние и нижние сопла γ варьировалось в интервале от 1 до 3, за счет использования расходных шайб разного диаметра. Измерения проводились в трех сечениях XOY (при $z=15, 80, 150$ мм), а также в сечениях XOZ (при $y=25, 185$ мм).

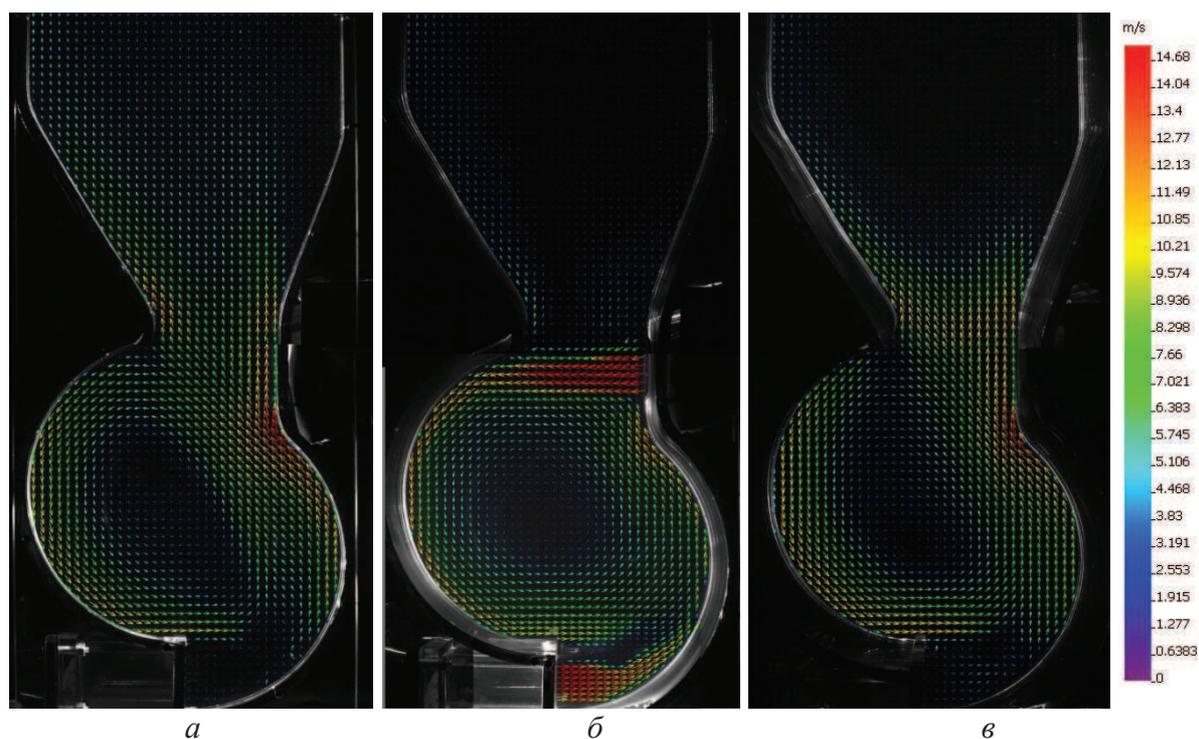


Рис. 3. Поле скорости при $\gamma=1$: а) $z=15$; б) $z=80$; в) $z=150$ мм

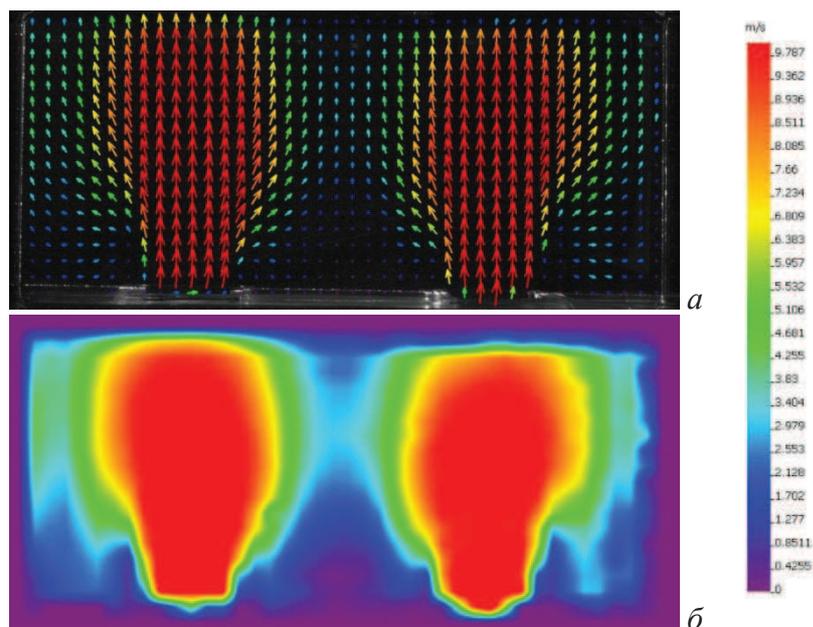


Рис. 4. Структура течения в сечении XOZ по центру верхних сопел при $\gamma=1$: а) векторное поле средней скорости; б) модуль средней скорости, м/с

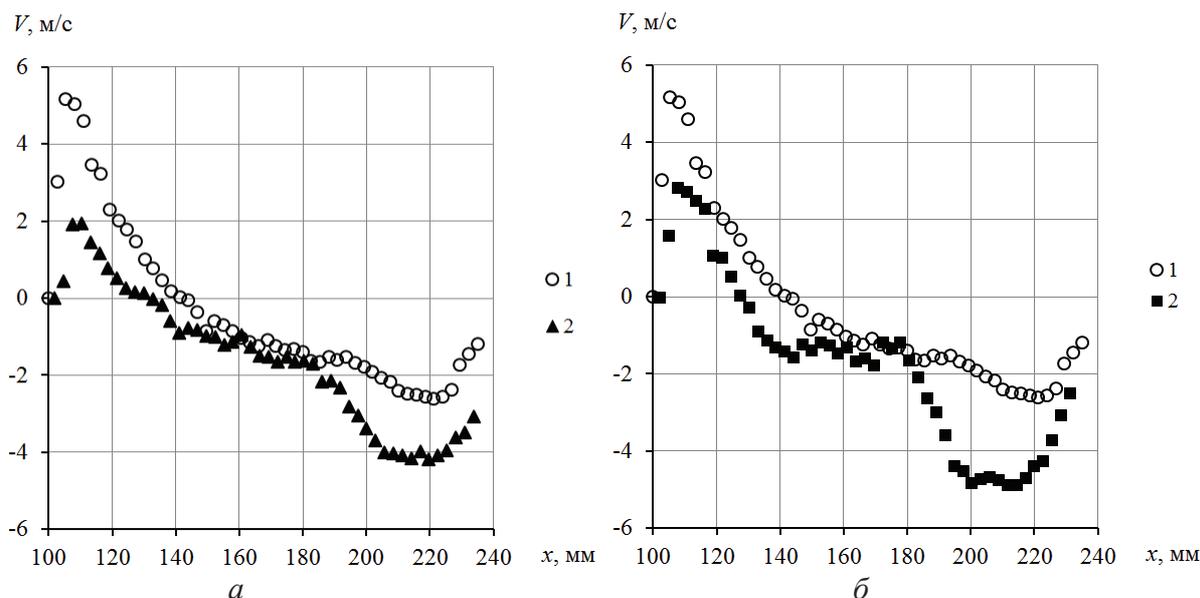


Рис. 5. Распределения $V(x)$ при $y=360$ мм, $z=80$ мм в режимах: а) $\gamma=1$ (1); $\gamma=3$ (2); б) $\gamma=1$ (1); $\gamma=2$ (2).

В процессе измерений задержка между парой кадров цифровой камеры варьировалась в диапазоне от 50–150 мкс, в зависимости от режимов течения. Размер области измерений составлял 350×350 мм (128×128 векторов). Поля средней скорости получены в результате статистической обработки 500 мгновенных полей. На рис. 3 показана структура течения при $\gamma=1$ (среднерасходные скорости потоков на срезе верхнего и нижнего сопла 15 м/с) в трех сечениях XOY: а) вблизи торцевой стенки модели; б) по центру сопел; в) в плоскости симметрии между соплами. Полученные результаты, так же как и данные лазерной доплеровской анемометрии [5], позволили выявить следующие особенности аэродинамики закрученного потока в исследуемой конструкции вихревой топки. Истекающая из верхнего сопла струя подпирается снизу дополнительно тангенциально вдуваемым потоком (рис. 3, б). 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, пересекаясь со струей, выходящей из нижнего сопла, создает интенсивно закрученное течение. Причем, за счет отклонения верхней струи от своего первоначального направления может происходить частичный вынос потока в камеру охлаждения и образовываться область рециркуляции. На практике данный эффект может приводить к частичному механическому недожогу топлива (с целью устранения указанной особенности течения варьировалось соотношение расходов через верхние и нижние сопла). Течение в диффузорной части носит «перчаточный» характер, поток выходит из камеры сгорания через диффузор в виде струи в плоскости симметрии между соплами, а также вблизи торцевой стенки модели (рис. 3, а, в).

В области над верхним соплом присутствуют возвратные течения (рис. 3, б), в тоже время в нижней части камеры сгорания имеются застойные зоны, в которых проекция скорости близка к нулю (рис. 3, а, в). На рис. 3, а, видно, что в нижней части топки имеются локальные области, в которых векторы скорости направлены навстречу друг другу. Это говорит о движении в поперечном направлении 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.

Структура течения в сечении XOZ по центру верхних сопел показана на рис. 4. Измерения выполнены при среднерасходной скорости на срезе каждого сопла 10 м/с. Анализ результатов показывает, что входящие струи размываются вдоль вогнутых стенок камеры сгорания и поток распределяется в поперечном направлении. При этом наблюдается симметричность течения.

На рис. 5 приведены распределения вертикальной компоненты средней скорости $V(x)$ вдоль прямой при $y=360$ мм, $z=80$ мм (в сечении XOY по центру сопла) для различных режимных параметров течения. Круглые символы соответствуют одинаковым скоростям на срезах верхнего и нижнего сопла 15 м/с. Треугольные символы на рис. 5, а, – скоростям 15 и 5 м/с, соответственно. На рис. 5, б, треугольными символами обозначены результаты измерений при скоростях 20 и 10 м/с, соответственно. Можно заметить, что данные, приведенные на рис. 5, а, характеризуют режимы с одинаковым расходом через верхние сопла, но при различных суммарных расходах, а данные на рис. 5, б, – режимы с одинаковым суммарным расходом, но с разными расходами через верхние

сопла. Анализ этих результатов показывает, что во всех случаях увеличение параметра γ приводит к заметному уменьшению положительных значений V , т. е. верхняя струя значительно слабее отклоняется от своего первоначального направления. Благодаря этому должно уменьшаться проявление нежелательного для практики эффекта выноса топлива из камеры горения.

Заключение

Применение полевого метода цифровой трассерной визуализации позволило получить детальную информацию о распределении осредненной во времени скорости потока и проанализировать

основные особенности структуры течения в изотермической лабораторной модели вихревой топки с горизонтальной осью вращения потока и распределенным вводом топливоздушных струй. Показано, что наличие дополнительных (нижних) горелок (по сравнению с конструкцией Н.В. Голованова) позволяет эффективно управлять структурой потока, создавая более благоприятные режимы работы топki.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (Грант № 12–08–31004–мол_а), Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашения 14.В37.21.2071, 8193; ГК 16.740.11.0691) и Стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-987.2012.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заворин А.С., Бетхер Т.М., Лебедев Б.В. Анализ топочной среды котла БКЗ-210–140 на основе численного моделирования // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 50–55.
2. Заворин А.С., Казакова О.А., Казаков А.В. Оценка технологических параметров при энергетическом использовании угля Таловского месторождения Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 45–50.
3. Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топki парогенератора // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85. – № 2. – С. 266–276.
4. Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергия, 1966. – 350 с.
5. Ануфриев И.С., Аникин Ю.А. и др. Исследование структуры закрученного потока в модели вихревой камеры сгорания методом лазерной доплеровской анемометрии // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 24. – С. 39–45.
6. Алексеев С.В., Бильский А.В., Маркович Д.М. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 5. – С. 145–153.

Поступила 25.12.2012 г.

УДК 620.9.001.5

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ УГОЛЬНОЙ ЗОЛЫ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.С. Фомичев, Д.А. Корецкий*, А.С. Заворин*

ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», г. Новосибирск

*Томский политехнический университет

E-mail: alexey.fomichev@cadfem-cis.ru

Приведены результаты исследования шлакования экранов топki энергетического котла П-67, работающего на березовском угле Канско-Ачинского бассейна, с применением программного продукта численного математического моделирования «ANSYS Fluent». В ходе работы получены важные данные для дальнейшего совершенствования модели шлакования котельных установок.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, котел, шлакование, поверхность нагрева, вязкость.

Key words:

Mathematic modeling, computational fluid dynamic, boiler, slagging, heating surface, viscosity.

Согласно энергетической стратегии России на период до 2020 г. уголь останется основным топливом на тепловых электрических станциях. Учитывая стремление генерирующих компаний к снижению затрат на выработку электрической энергии, диверсификации угольных поставок и сокращению транспортных расходов, увеличение генерирующих

мощностей Сибири может быть обеспечено за счет сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна. Одним из крупных перспективных месторождений с открытой добычей угля является Березовский разрез, однако высокие шлакующие свойства угля данного месторождения вызывают затруднения при его сжигании, ограничение располагаемой мощности