

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 топki 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. Алексеенко 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

котельных агрегатов и уменьшение длительности рабочей кампании по причине шлакования поверхностей нагрева. Несмотря на большой опыт отечественной котлостроительной отрасли в проектировании и строительстве котлоагрегатов, проблемы, связанные со шлакованием поверхностей нагрева, остаются актуальными.

Наиболее доступным и экономически целесообразным способом повысить эффективность работы пылеугольных котлоагрегатов на этапе конструирования или реконструкции является компьютерное моделирование топочных процессов. При существенном сокращении затрат на проведение экспериментальных и опытных работ на лабораторных установках и действующих котельных агрегатах моделирование позволяет корректно изучать режимы работы топочных камер и оптимизировать процесс горения.

Для моделирования процессов горения угля уже давно и успешно применяются программы вычислительной гидродинамики, но они не имеют встроенных средств для моделирования отложения золовых частиц на топочных экранах и конвективных поверхностях нагрева.

Решение данной задачи возможно с помощью расширения возможностей программы «ANSYS Fluent» дополнительными функциями. При этом процесс моделирования шлакования поверхностей нагрева может быть разбит на два основных этапа: моделирование параметров топочной среды и расчет скорости роста золовых отложений на экранах топки.

На первом этапе все топочные процессы, такие как аэродинамика, воспламенение, выгорание, теплообмен, химические реакции, рассмотрены взаимосвязано и в едином комплексе. Принято, что газовая среда в топке состоит из химически инертных диоксида углерода CO_2 , молекулярного азота N_2 , паров воды H_2O , реагирующих кислорода O_2 и летучих веществ. Расчет траекторий движения твердых частиц выполнен в Лагранжевой постановке. Для дисперсной фазы описывался теплообмен, определялись траектории частиц с использованием стохастической модели случайных блужданий в турбулентной среде [1].

В расчете принималось, что частица имеет сферическую форму и представляет собой смесь золы с коксом. Кроме того, она включает в себя влагу и горючие составляющие (летучие вещества). Для учета полидисперсности частиц была использована формула Розина-Раммлера. Учитывалась стадийность горения угольных частиц: прогрев до начала испарения влаги топлива, испарение влаги, выход летучих, горение коксового остатка, движение золового остатка (рис. 1).

На втором этапе моделируется образование шлаковых отложений при помощи UDF-функций (функции, определяемые пользователем), написанных на языке «С» и встроенных в программу «ANSYS Fluent». UDF-функции используют дополнительные исходные данные, такие как грану-

лометрический и химический состав золы, а также используют программу «ANSYS Fluent» в качестве источника исходных данных о месте столкновения частицы с поверхностью нагрева, температуре частицы в этот момент, компонентах скоростей и т. п. Эффективность соударения частиц моделировалась на основе стохастической модели случайных блужданий. Численное значение скорости роста золовых отложений экспортируется в программу «ANSYS Fluent» для того, чтобы визуализировать и обрабатывать результаты расчета штатными средствами программы «ANSYS Fluent».

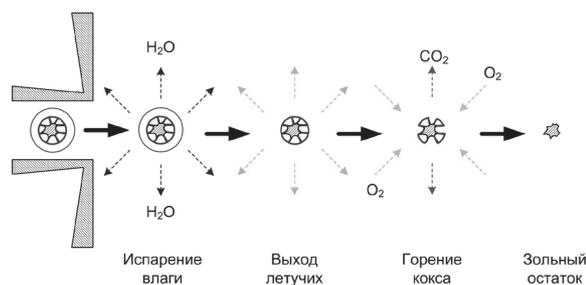


Рис. 1. Стадии горения угольной частицы

Принято, что скорость шлакования пропорциональна вероятности прилипания частицы к экрану, которая рассчитывается по модели захвата Уолша [2]:

$$P_{\text{прилипания}} = \frac{m_{\text{отлож}}}{m_{\text{общ}}} = \min \left[\frac{\mu_{\text{крит}}}{\mu}, 1 \right],$$

где $\frac{m_{\text{отлож}}}{m_{\text{общ}}}$ – отношение массы «прилипших» частиц к общей массе; μ – эффективная вязкость частицы; $\mu_{\text{крит}}$ – вязкость в критической точке, при которой частица считается «липкой».

Вероятность прилипания рассчитывается как отношение значений вязкости. При этом предполагается, что критическая вязкость является постоянной величиной.

Значение вязкости частицы вычисляется из уравнения Браунинга [3]:

$$\log \left(\frac{\mu}{T - T_s} \right) = \frac{14788}{T - T_s} - 10,931,$$

где T – температура частицы, T_s – температурный сдвиг.

При этом предполагается, что вязкость зависит только от температуры и состава золы, а температурный сдвиг зависит от минерального состава золы:

$$T_s = 306,63 \cdot A - 574,31;$$

$$A = \frac{3,19Si + 0,855Al + 1,6K}{\left[0,93Ca + 1,5Fe + 1,21Mg + 0,69Na + \right.}$$

$$\left. + 1,35Mn + 1,47Ti + 1,91S \right]}.$$

Согласно опубликованным сведениям [4], вышеописанные уравнения для модели расчета дают наилучшие результаты по сравнению с другими ал-

горитмами для британских углей. Однако в исследовании [5] показано, что модель Браунинга при фиксированной температуре выдает значения вязкости ниже по сравнению с имеющимися отечественными экспериментальными данными. Тем не менее, описанная выше модель шлакования была реализована для условий сжигания угля в топочной камере котла П-67 Березовской ГРЭС-1.

Опыт эксплуатации котлов П-67 1-го и 2-го энергоблоков Березовской ГРЭС-1 показал, что топочные камеры подвергаются интенсивному шлакованию в зоне активного горения и в районе скатов холодной воронки. Реконструкция топочно-горелочных устройств и внедрение современных средств очистки позволили снизить интенсивность образования отложений, но не исключить их [6].

Численное моделирование показало, что аэродинамическая структура газовых потоков в топочной камере обладает высокой неравномерностью. Образующийся центральный вихрь инициирует вторичные вихри в углах топочной камеры, которые приводят к набросу потока на стенки топки, что является определяющим фактором для шлакования экранных поверхностей нагрева (рис. 2).

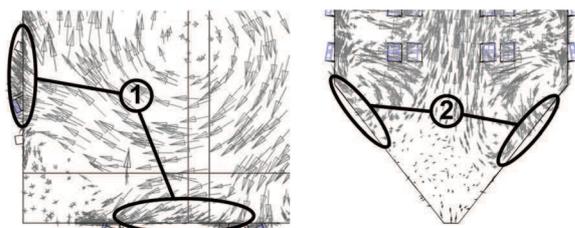


Рис. 2. Наброс топочных газов: 1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скаты холодной воронки

По результатам моделирования также выявляется интенсивное шлакование на скатах холодной воронки и в области около горелок, особенно по нечетным вертикальным рядам труб. Основной причиной является осаждение мелкой фракции золы. Данные частицы вовлекаются в движение вторичных вихрей в углах топочной камеры и, обладая достаточно высокой температурой, при достижении экрана образуют на нем шлаковые отложения (рис. 3). Таким образом, анализ аэродинамики газовых потоков с выявлением мест столкновения золых частиц с экранами и мест отложения шлака позволяет говорить об инерционном механизме осаждения золошлаковых частиц и закреплении их на трубах главным образом за счет адгезии.

На рис. 4 видно, что реальные места шлакования экранов действующего котельного агрегата и устанавливаемые моделированием (рис. 2, 3) совпадают, что позволяет говорить о качественно согласующихся с натурными наблюдениями результатах.

Однако количественная оценка образования отложений на экранах по модели Уолша—Браунинга при сжигании березовского угля показывает, что эффективная интенсивность образования отложе-

ний оказалась существенно выше. Принимая во внимание то, что при создании данной модели не учитывался ряд важных процессов, таких как упрочнение и саморазрушение отложений, а механизм образования отложений соответствовал только механизму образования вторичных отложений [7], данный результат является закономерным и объяснимым.



Рис. 3. Толщина слоя осаждающихся золых частиц на экранах: 1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скатах холодной воронки

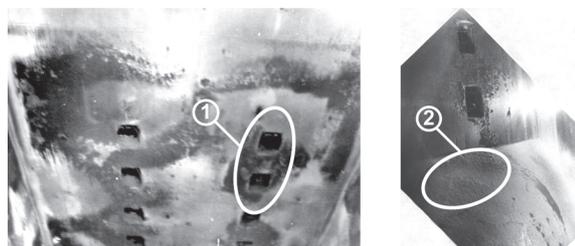


Рис. 4. Шлакование экранов (натурные наблюдения [7]): 1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скаты холодной воронки

Следует также отметить, что выбранный метод расчета вязкости в наибольшей степени соответствует сжиганию углей с кислым составом золы [8]. Для моделирования образования отложений в топочной камере при сжигании углей с основным составом золы, какими являются угли Канско-Ачинского бассейна, требуется учитывать температурную зависимость вязкости для основного состава золы. Помимо этого, необходимо разработать более многофакторный механизм образования отложений, который бы учитывал не только стадийность образования отложений, но и неравномерность распределения минеральной части по фракционному составу угольной пыли и образующейся из неё золы, влияние минеральной части на селек-

тивное образование железистых отложений, сульфатизацию отложений, разрушающее действие массивных частиц на шлаковое отложение и др. факторы [9, 10].

Заключение

Численным исследованием с применением программы «ANSYS Fluent» получена полная картина газодинамических и тепловых процессов в то-

почном объеме, детальная информация о распределении тепловых полей, полей концентраций в газовой и дисперсной фазах. Выполнено моделирование отложений золы на топочных экранах котла П-67, результаты которого качественно согласуются с данными опытно-промышленных испытаний. Обозначены пути совершенствования модели шлакования согласно накопленным экспериментальным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коняшкин В.Ф. Трёхмерное моделирование физических процессов и котельного оборудования с помощью программы ANSYS Fluent / Горение твёрдого топлива: Матер. VII Всеросс. конф. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2006. – Ч. 1. – С. 170–177.
2. Алехнович А.Н., Гладков В.Е., Богомолов В.В. Прогнозирование шлакования по химическому составу частичек летучей золы // Теплоэнергетика. – 1995. – № 8. – С. 23–28.
3. Blanchard R. Measurements and modeling of coal ash deposition in an entrained-flow reactor // Brigham Young University. 2009. URL: <http://contentdm.lib.byu.edu/cdm/singleitem/collection/ETD/id/1380> (дата обращения: 13.10.2011).
4. Алехнович А.Н. Анализ методов расчета вязкости расплава по сведениям о его химическом составе // Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Матер. VI научно-практ. конф. – Челябинск, 2007. – С. 71–82.
5. Демб Э.П., Петерс В.Ф., Порозов С.В., Усачев В.В. Опыт освоения и модернизации котлов П-67 ст.1 и 2 БГРЭС-1 // Эксплуатация и модернизация энергоблоков мощностью 800 МВт: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – Шарыпово, 2002. – С. 161–165.
6. Пронин М.С., Васильев В.В., Белый В.В. Результаты освоения сжигания канско-ачинских углей на ТЭС России // Горение твердого топлива: Матер. VI Всеросс. конф. – Новосибирск, 2006. – Ч. 2. – С. 175–191.
7. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 148–149.
8. Алехнович А.Н. Влияние минеральной части на показатели и характеристики энергетических углей // Энергетик. – 2008. – № 3. – С. 8–13.
9. Алехнович А.Н. Математическое моделирование шлакования. Субмодель закрепления частиц и роста шлаковых отложений // Горение твердого топлива: Матер. VI Всеросс. конф. – Новосибирск, 2006. – Ч. 3. – С. 153–162.
10. Заворин А.С. Проявление свойств минеральной части углей в паровых котлах. Монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 221 с.

Поступила 15.11.2012 г.