

УДК 620.9.001.5

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ANSYS, Inc. В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

¹Фомичев А.С., ²Корецкий Д.А., ²Заворин А.С.,
³Коняшкин В.Ф., ³Харченко В.В.

¹ЗАО «КАФДЕМ Си-Ай-Эс», г. Новосибирск, ²Национальный
исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
³ЗАО «Е4-СибКОТЭС», Новосибирск)

E-mail: fomichev@cadfem-cis.ru, koretskiy@cotes.ru

Приведены данные о результатах моделирования шлакования для топки энергетического котла П-67, работающего на углях Канско-Ачинского бассейна. В процессе работы применялся программный продукт численного математического моделирования «ANSYS 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 компании по причине шлакования поверхностей нагрева. Несмотря на большой опыт отечественной котлостроительной отрасли в проектировании и строительстве котлоагрегатов проблемы связанные с 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.

Таким образом, 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 угля был 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 зольного остатка 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).

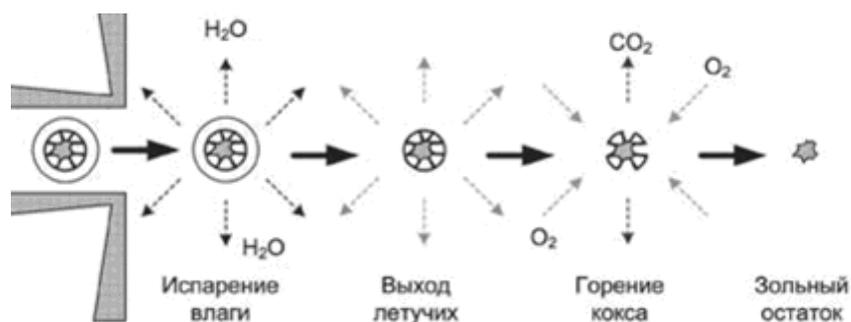


Рис. 1. Стадии горения угольной частицы.

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 гранулометрический и химический состав золы, а так же используют программу ANSYS Fluent в качестве источника исходных данных о месте столкновения частицы с поверхностью нагрева, тем-

пературе 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 расчёта штатными средствами программы Fluent.

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 минерального состава золы

$$T_s = 306.63A - 574.31$$

$$A = \frac{3.19Si + 0.855Al + 1.6K}{0.93Ca + 1.5Fe + 1.21Mg + 0.69Na + 1.35Mn + 1.47Ti + 1.91S}$$

Согласно статье [4] две вышеописанные модели расчета дают наилучшие результаты по сравнению с другими алгоритмами (исследования проводились для проб золы британских углей).

Описанная выше модель шлакования поверхностей нагрева была реализована для топочной камеры котла П-67 Березовской ГРЭС-1.

Опыт эксплуатации котлов П-67 1-ого и 2-ого энергоблоков Березовской ГРЭС-1 показал, что топочные камеры подвергается 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 [5].

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 приводит к шлакованию поверхностей нагрева (рис. 2).

Также наблюдается интенсивное шлакование на скатах холодной воронки и в области около горелок, особенно по нечетным вертикальным рядам. Основной причиной является осаждение мелкой фракции золы. Данные частицы вовлекаются в движение вторичных вихрей в углах топочной камеры. Обладая доста-

точно высокой температурой, частицы золы достигают экрана и образуют шлаковые отложения (рис.3). Таким образом, анализ аэродинамики газовых потоков и мест отложения шлака говорит об инерционном механизме закрепления частиц золы.

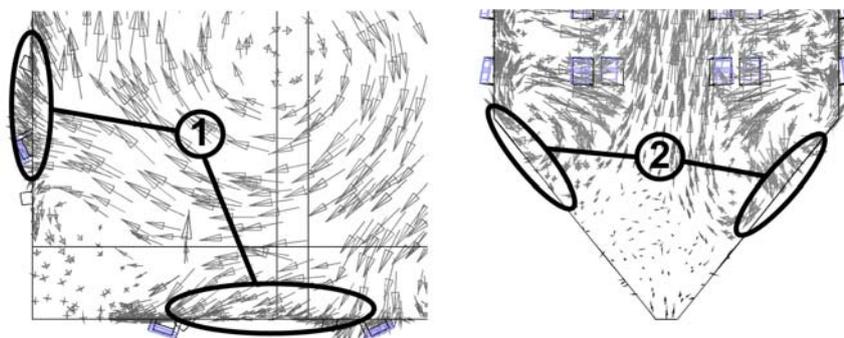


Рис. 2. Наброс топочных газов: 1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скаты холодной воронки.



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

На рис. 4 видно, что места шлакования экранов действующего котельного агрегата и модели совпадают, что позволяет говорить о качественно согласующихся с натурными наблюдениями результатах.

Однако количественная оценка образования отложений на экранах при сжигании берёзовского угля по модели Уолша–Браунинга показывает, что эффективная интенсивность образования отложений оказывается существенно выше. Учитывая то, что при создании данной модели не учитывался ряд важных процессов, таких как процессы упрочнения и саморазрушения отложений, а механизм образования отложений соответствовал механизму образования вторичных отложений [7], данный результат является закономерным и ожидаемым.

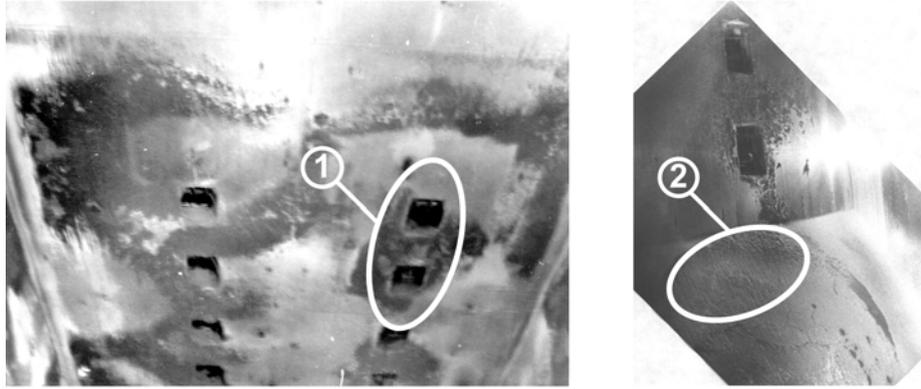


Рис. 4. Шлакование экранов (натурные наблюдения [6]):
1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скаты холодной воронки

Так же следует отметить, что выбранная модель шлакования в наибольшей степени соответствует сжиганию углей с кислым составом золы. Для моделирования образования отложений в топочной камере при сжигании углей с основным составом золы, какими являются угли Канско-Ачинского бассейна, требуется модель, учитывающая более многофакторный механизм. Необходимо учитывать зависимость вязкости от основного состава золы, а так же неравномерное распределение минеральной части от фракционного состава золы [8,9].

Таким образом, в данной работе проведено всестороннее численное исследование процесса горения с применением программы ANSYS Fluent. Получена полная картина газодинамических и тепловых процессов в топочном объеме, детальная информация о распределении тепловых полей, полей концентраций в газовой и дисперсной фазах на основании численного моделирования. При этом полученные значения основных теплотехнических характеристик топки согласуются с данными опытно-промышленных испытаний.

Литература

1. ANSYS FLUENT 6.2 User's Guide. ANSYS Fluent Inc., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, January 2005.
2. Walsh, P.M., Sayre, A.N., Loehden, D.O., Monroe, L.S., Beer, J.M., Sarofim, A.F., (1990) "Deposition of Bituminous Coal Ash on an Isolated Heat Exchanger Tube: Effects of Coal Properties on Deposit Growth." *Progress in Energy and Combustion Science* 16: 327-346
3. Browning G.J., Bryant G.W., Hurst H.J., Lucas J.A., Wall T.F. (2003) "An Empirical Method for the Prediction of Coal Ash Slag Viscosity." *Energy & Fuels*. 17:731-737
4. Measurements and modeling of coal ash deposition in an entrained-flow reactor, by Ryan Blanchard, 2009, Brigham Young University, интернет-страница <http://contentdm.lib.byu.edu/ETD/image/etd2764.pdf>.
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. – г. Шарыпово, 20-22 ноября 2002. – Шарыпово, 2002. – С.161–165.

6. Васильев В.В. Результаты освоения сжигания канско-ачинских углей на ТЭС России // Горение твердого топлива: Матер. VI-й Всероссийской конф. – Новосибирск, 2006.
7. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах // Известия ТПУ. – 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-й Всероссийской конф. – Новосибирск, 2006.