

УДК 621.18

## **НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРВООЧЕРЕДНЫЕ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ШЛАКОВАНИЯ ТОПКИ**

*Алехнович А.Н., Артемьева Н.В.*

*Филиал УралВТИ ОАО «Инженерный центр энергетики Урала»  
г. Челябинск*

Шлакование топки определяется конструкцией и режимами её работы и свойствами летучей золы. Различие конструкций топочно-горелочных устройств, внедрение новых режимов сжигания топлива и конструкций топочных камер усложняет и ограничивает применимость методов прогнозирования шлакования с использованием эмпирических индексов шлакующих свойств.

В настоящее время при проектировании оборудования, проработке вопросов сжигания непроектных топлив и других вопросов по работе топочно-горелочных устройств находят применение компьютерные программы трёхмерной динамики (CFD), при помощи которых моделируется горение твёрдой фазы, теплообмен и газодинамика топочных камер.

Поскольку в рамках углей одного типа конструктивные особенности топочных камер и режимов их работы влияют на шлакование вне зависимости от шлакующих свойств углей, результаты, полученные с помощью таких моделей позволяют отрабатывать оптимальные с позиций шлакования конструкции топочно-горелочных устройств. В частности, очевидно, что наиболее опасные с позиций шлакования зоны котла характеризуются динамическим взаимодействием газового потока и поверхности, высокими значениями тепловых потоков и температур газов, восстановительной атмосферой или низкими значениями избытка воздуха. В некоторых случаях результаты “визуализируются” путём оценки количества шлака, который потенциально может закрепиться при рассчитанной массе летучей золы достигшей поверхности и сравнения температуры или вязкости среднего состава этих частиц со значениями, принимаемыми за границу образования отложений.

Очевидно, что при полезности такого подхода получаемые результаты не отражают не только многообразия образующихся типов отложений и их свойств, но и не дают ответа о характере шлакования (образование шлаковых отложений на прочных первичных или на рыхлых сыпучих с последующей саморасшлаковкой) и не позволяют оценить термическое сопротивление отложений (тепловую эффективность экранов).

**Общие положения о моделях шлакования топки.** В настоящее время термин “модель шлакования топки” понимается как модель, построенная на базе компьютерной программы трёхмерной динамики (CFD) и дополненная моделями (субмоделями), связанными с поведением минеральной части, для прогнозирования процессов образования отложений (рис. 1).



Рис. 1. Схема математической модели шлакования на базе компьютерной программы трёхмерной динамики (CFD) дополненных моделями по процессам минеральной части (с использованием идеи [1]).

Графически перечень необходимых сведений для моделирования шлакования, что определяет и набор необходимых субмоделей, показан на рис. 2.

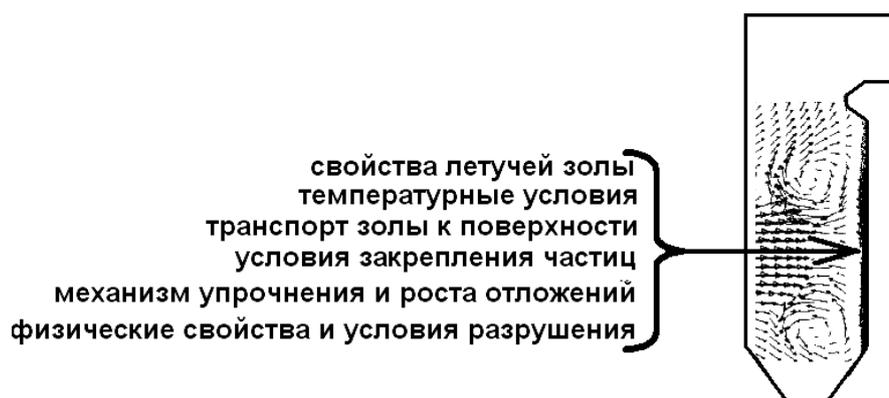


Рис. 2. Перечень необходимых сведений для математического моделирования отложений.

Содержание и набор дополнительных моделей по преобразованию минеральной части, образованию и свойствам отложений может отличаться от модели к модели. По [2] полная модель шлакования топки должна включать модели: (1) формирования золы (2) газодинамики и траектории частиц, (3) взаимодействия частиц с поверхностью и закрепления, (4) роста отложений, (5) свойств отложений и упрочнения, (6) теплопередачи через отложения, (7) влияния отложений на режим топки (температурное поле и поле тепловых потоков), (8) влияния отложений на поле скоростей.

Модели шлакования топки получили распространение за рубежом с 90<sup>х</sup> годов двадцатого века, когда появилась возможность экспериментального определения распределения индивидуальных минеральных включений в топливе или состава индивидуальных частичек летучей золы при помощи сканирующей электронной микроскопии, скомпонованной с анализатором и компьютером, типа технологии CCSEM.

При концептуальной ясности и завершенности и успешном прогнозировании шлакования для конкретных примеров математические модели шлакования, тем не менее, на сегодняшнем этапе не обеспечивают достоверной информации для произвольно выбранного топлива и котла. Такое положение связано со сложностями описания многочисленных процессов и свойств, определяющих шлакование, недостатком экспериментальных данных и несовершенством используемых субмоделей.

**Модели формирования летучей золы.** В летучей золе нет частичек, имеющих средний состав. Подчеркнём ещё раз, что основное достоинство математических моделей шлакования, наряду с трёхмерным моделированием топочного процесса, связано с возможностью анализа влияния на процесс совокупности частиц, отличающихся агрегатным состоянием, составом и свойствами. В качестве исходной базы в зарубежных моделях используются сведения о составе, размерах и степени ассоциированности с угольным веществом индивидуальных минеральных включений. Возможность и целесообразность использования данных о индивидуальных частичках летучей золы обсуждается ниже.

Разработано большое количество моделей формирования летучей золы. В относительно простых из них степень фрагментации внешних минералов и коалесценции внутренних (рис. 3) задаётся эмпирически в зависимости от реакционных свойств угля.

### данные CCSEM по углю

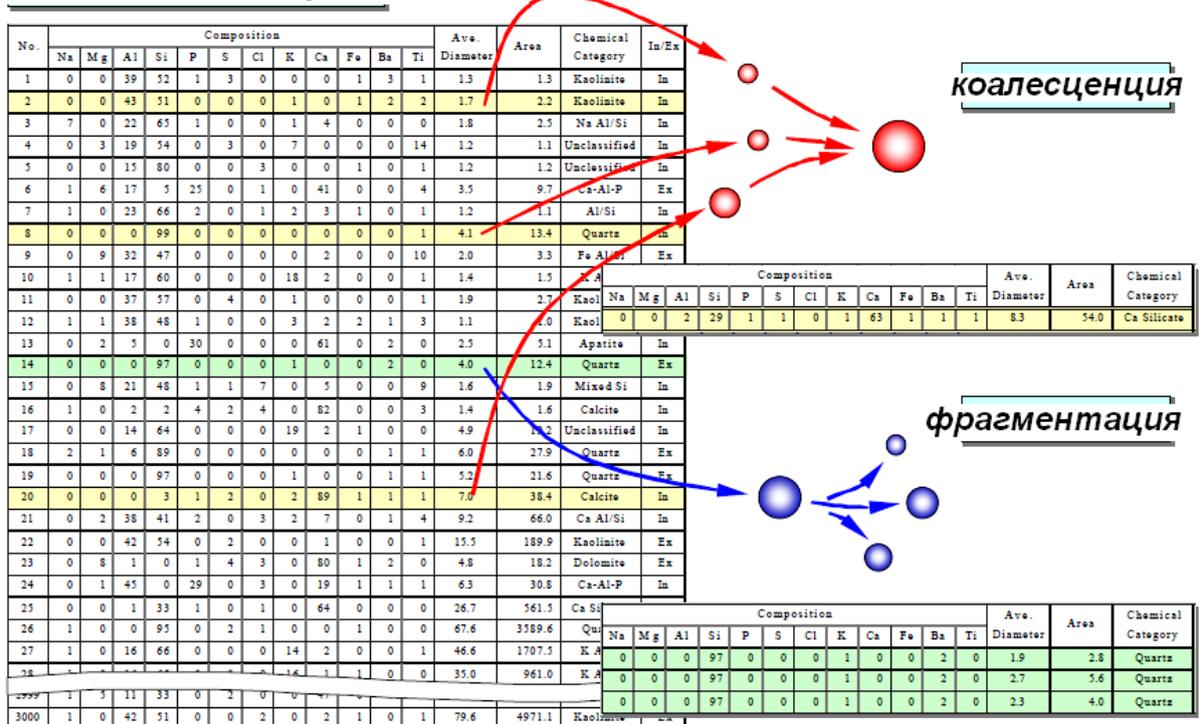


Рис. 3. Схема расчёта состава и размеров летучей золы при фрагментации и коалесценции минеральных включений по разработке [3]

В разработанной в EERC, США, по-видимому, наиболее полной модели формирования летучей золы с прогнозированием размеров и состава частиц золы *Atran* [4] в качестве входных данных используется:

размер, состав и распределение по количеству минеральных включений в угле по данным CCSEM,  
 средний состав золы,  
 элементный состав угля,  
 распределение органически связанных минеральных компонентов по результатам химического фракционирования,  
 ограниченные эмпирические данные по похожим углям о степени коалесценции и фрагментации.

В модели учитываются процессы испарения/ конденсации, коалесценция, саморасшлаковка, фрагментация горящих частиц, фрагментация минералов. Схема расчёта по модели формирования летучей золы EERC показана на рис. 4.

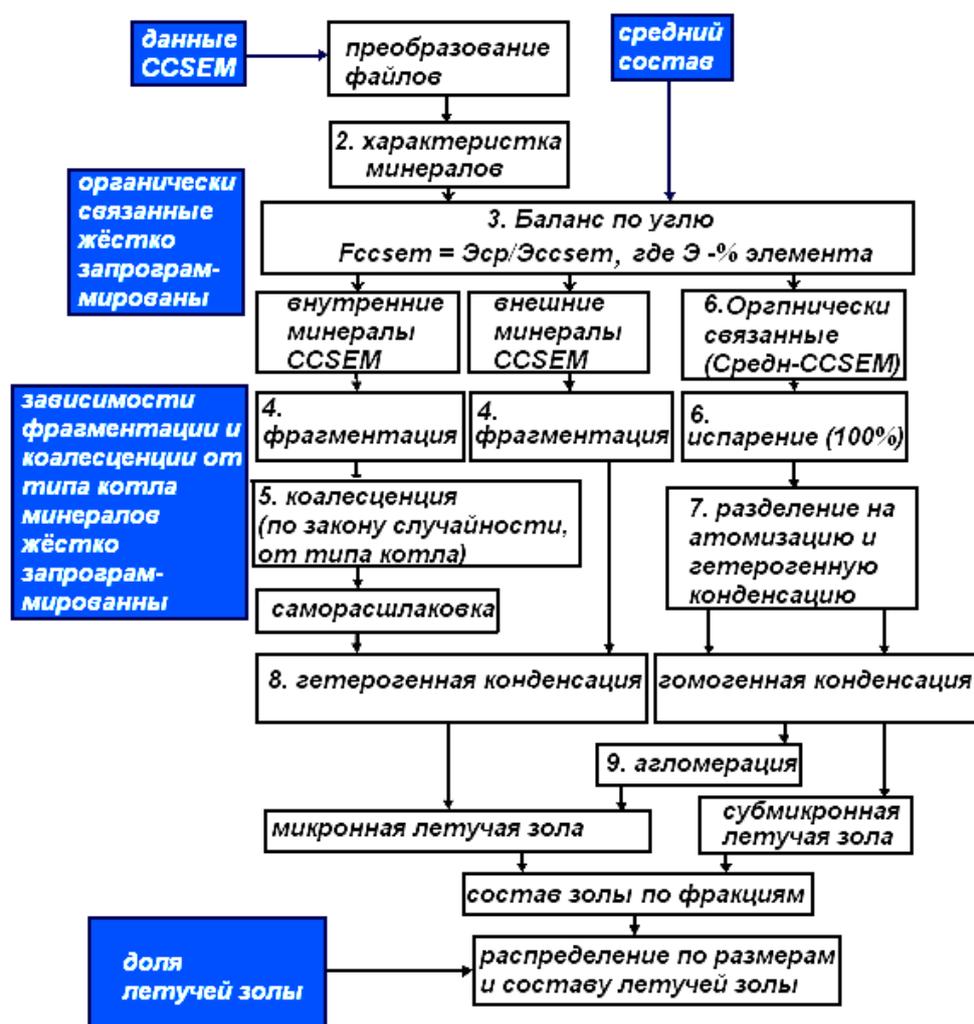


Рис. 4. Схема расчёта по модели формирования летучей золы, разработанной EERC [4, 5]. Клетки с белым текстом – исходные данные; номерами на рисунке выделены самостоятельные компьютерные программы; на рисунке не приведена часть модели, касающаяся прогнозирования распределения в летучей золе микроэлементов.

Помимо расчёта формирования летучей золы может также ставиться задача расчёта преобразований минеральной части (окисление, сульфатизация, кристаллизация) по траектории частиц с использованием кинетических моделей и данных о температуре, среде, времени пребывания и других [6].

Вместе с тем, даже сложные модели формирования летучей золы не учитывают или не достаточно достоверно учитывают многочисленные факторы, определяющие распределение и свойства летучей золы.

В ряде моделей в качестве исходных данных используются или могут использоваться сведения о распределении и составе летучей золы. Такой подход противоречит концепции создания общей научно обоснованной модели шлакования и, несомненно, снижает экстраполяционные возможности рассматриваемого моделирования.

Тем не менее, для исключения наложения ошибок разных субмоделей авторы полагают целесообразным в первую очередь выполнять совершенствование и тестирование моделей собственно шлакования топки с использованием сведений о распределении и составе летучей золы, отобранной на промышленных котлах или установках с достоверным воспроизведением условий выгорания топлива и преобразования минеральной части. При отсутствии в обслуживающих отечественную энергетику организациях технологии типа ССЕМ данные о распределении минеральных включений в угле и частиц летучей золы придётся заказывать в зарубежных научных центрах. Вместе с тем, авторы полагают возможным создание достоверной модели шлакования с использованием в качестве исходных данных распределение минеральной части по фракциям угля и соответствующей летучей золы. Первый частный вариант такого подхода представлен в [7].

***Модели закрепления частиц и роста отложений.*** При достижении частицей летучей золы поверхности возможно её закрепление, либо отскок.

При закреплении частиц за счёт липких свойств наиболее физически обосновано описывать процесс захвата (удержания) частицы на поверхности с позиций избыточной энергии. Такой подход требует определения кинетической энергии частицы в момент контакта и далее оценки энергии диссипации при ударе.

Более простые и распространённые модели закрепления построенные на вязкости и исходят из посылки, что вязкость является доминантой характеристикой липких свойств. При этом во внимание принимается вязкость частиц и подвергающейся шлакованию поверхности. Для использования этой модели предполагается возможность оценки вязкости по составу зольных материалов. Однако расчёт высококристаллизующихся шлаков с основным составом золы по равновесным зависимостям даёт не совпадающие, даже в качественном отношении, с практикой результаты и для подобных углей должны в качестве основных или дополнительных условий закрепления использоваться иные показатели. Граничные условия и вероятность закрепления чаще подбираются как эмпирические условия, призванные привести в соответствие результаты моделирования и экспериментальный материал. В качестве альтернативных показателей липкого закрепления используются такие высокотемпературные характеристики как температуры плавкости, температура начала шлакования, доля расплавленных частиц и их агрегатное состояние (например в виде низковязкого расплава).

Практически во всех широко используемых моделях налипания принимается монотонный рост отложений до определённого предела, определяемого условиями саморасшлаковки или очистки. Фактически это не так. За исключени-

ем случаев интенсивного шлакования при высоких температурах и высокой доли весьма липких на уровне матричных свойств частиц, процесс образования отложений является динамичным процессом и, наряду с ростом отложений, перманентно происходит разрушение нелипкими частицами с высокой кинетической энергией. Этот факт объясняет меньшую долю липких частиц в отложениях по сравнению с летучей золой и учтён в вероятностной модели шлакования Урал-ВТИ [8, 9]. По-видимому, обещающим исключением является также более поздняя разработка [10].

В ней прилипание принимается с учётом разрушения отложений (рис. 4) как:

$$P_{\text{нал}} = P_{\text{ч}} + P_{\text{п}} - P_{\text{ч}} \cdot P_{\text{п}} - k_{\text{с}} \cdot (1 - P_{\text{п}}) \cdot (1 - P_{\text{ч}}),$$

где  $P_{\text{ч}}$  и  $P_{\text{п}}$  – липкость (вероятность налипания) частицы и поверхности, комплекс  $k_{\text{с}} \cdot (1 - P_{\text{п}}) \cdot (1 - P_{\text{ч}})$  – износ нелипкими частицами.



Рис. 5. Схема роста отложений по модели налипания [10].

$P_{\text{ч}}$  – липкость частицы оценивается с учётом доли расплавленных солей и вязкости алюмосиликатов:

$$P_{\text{ч}} = (V_{\text{sil}} \cdot P_{\text{sil}} + V_{\text{salt}} \cdot P_{\text{salt}}) / (V_{\text{sil}} + V_{\text{solt}}),$$

где  $P_{\text{salt}} = 0$  при доле расплавленной фазы 10-70% и  $P_{\text{salt}} = 1$  при доле расплавленной фазы >70%,

$P_{\text{sil}} = \min(1, \eta_{\text{ref}}/\eta)$  – липкость силикатных частиц оценивается по данным расчёта вязкости по модели Урбана.

**Прогнозирование типа шлакования.** Шлакующаяся топка от не шлакующейся или шлакующейся локально отличается наличием прочных селективных отложений на существенной площади экранов, и в зависимости от типа первичных отложений зависит выбор не только размеров топки, но и граничных условий, условий достижений заданного результата в модели шлакования.

Стадийность протекания процесса шлакования общепринята, однако за рубежом склонность к образованию прочных селективных отложений не входят в число основных показателей шлакующих свойств. В известных нам математических моделях шлакования не ставится задача классификации типа первичных отложений и корректировки в зависимости от этого дальнейшей расчётной схемы.

Шлакование экранов может быть длительным процессом, когда характерное состояние достигается через месяцы, а скорее через годы. Это связано с медленным образованием плотного первичного слоя из небольшого количества селективно обогащённых частиц. В том числе в силу длительности процесса моделирование образования первичного слоя относится к числу наиболее сложных,

и в большинстве моделей шлакования процесс образования первичных отложений не моделируется, и расчёт начинается при наличии на экране уже заданного слоя.

В то же время, для практики может быть более важен не расчёт достижения стабильного первичного слоя и начала образования на нём шлаковых отложений, а принципиальная возможность формирования того или иного типа отложений.

На поверхностях нагрева образуются отложения, темп роста которых выше или промежуточного типа при близком темпе роста отложений разных типов. Для отечественных углей прочные первичные отложения представлены в основном железистыми отложениями, и, в первом приближении, задача определения типа первичных отложений сводится к расчёту кинетики выгорания и транспорта к поверхности продуктов преобразования пирита и мелкой “инертной” фракции. Сложнее решается задача в случае необходимости дополнительного учёта процесса сульфатизации первичного слоя, как для канско-ачинских углей.

Для образующихся в топке различающихся типов отложений условия формирования, механизм транспорта частиц к поверхности и их закрепления, упрочнения и разрушения отложений разные, что определяет целесообразность при построении математической модели процесса шлакования разбиения поверхностей экрана на зоны. При этом для каждой из зон задаются или могут задаваться различающиеся начальные и граничные условия, условия прекращения расчёта при получении искомого результата, разные механизмы процессов.

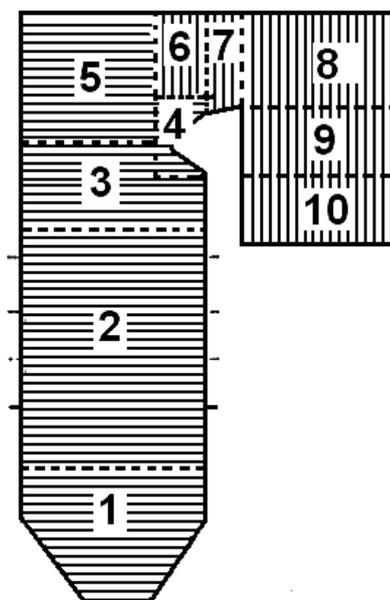


Рис. 6. Разделение расчётного объёма котла на зоны шлакования (1-5) и загрязнения (6-10) в модели шлакования и загрязнения котлов [11].

Разделение объёма котла на зоны (рис. 6), подобное предлагаемому, с использованием в них разных математических программ использовалось в ранних моделях шлакования топки [11].

## Литература

- 1 Kær S.K. Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers-Using CFD as the framework for slagging and fouling predictions// Ph.D. thesis, Institute of Energy Technology, Denmark, October 2001
- 2 Simulation of ash deposit in a pulverized coal-fired boiler/ J.R. Fan, X.D. Zha, P. Sun, K.F. Cen// Fuel 80 (2001) 645-654
- 3 Modeling of ash formation behavior during pulverized coal combustion// T. Yamashita, H. Tominaga, M. Orimoto, N. Asahiro// IFRF Combustion Journal, Article Number 200008, August 2000
- 4 Transformations Model for Predicting Size and Composition of Ash During Coal Combustion/ S.A. Benson, Th.A. Erickson, R.R. Jensen, J. D. Laumb// Fuel Chemistry Division Preprints, 2002, 47(2), pages 796-798
- 5 Advanced Power Systems Analysis Tools/ R.R. Jensen, S.A. Benson, J.D. Laumb// Final Report No. DE-FC26-98FT40320; UND Fund 4373, USA, ND, Grand Forks, Energy & Environmental Research Center, University of North Dakota, 05 August 2001
- 6 Leithner R., Muller H. CDF studies for boilers//Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Cambridge, 2003, p. 989
- 7 Математическая модель шлакования топки пылеугольного котла/ М.Ю. Чернецкий, А.Н. Алехнович, А.А. Дектерев// Теплоэнергетика, в печати
- 8 Алехнович А.Н. Вероятностная модель формирования шлаковых отложений// Электрические станции, 1995, №2
- 9 Slagging prediction when using the chemical composition of fly ash individual particles and the slagging probability model/ A.N. Alekhnovich, V.E. Gladkov, V.V. Bogomolov// Impact of mineral impurities in solid fuel combustion. Edited by R. Gupta, T. Wall, L. Baxter, "Proceeding of an Engineering Foundation Conference on Mineral Matter in Fuels, USA, Hawaii, Kona, November 2—7, 1997
- 10 Coupling of Thermodynamic Equilibrium Libraries with a Multidimensional CFD Solver- Application and Potential/ S. Martens, S. Kleditzsch, M. Braun//GTT-News, Issue 61, August 28, 2008
- 11 The coal quality expert: A focus on slagging and fouling/ R.W. Borio, R.L. Patel, M.E. Morgan, S.G. Kang, T.A. Erickson, S. E. Allan//Second Annual Clean Technology Conference, USA, Georgia, Atlanta, September 7-9 1993