Формирование и характеристики пылеугольной летучей золы

А.Н. Алехнович
Уральская теплотехническая лаборатория, Челябинск

Шлакование, загрязнение, абразивный износ поверхностей котлов с огневой стороны, а также надежность и эффективность работы систем газоочистки наряду с параметрами газового потока зависят от физико-химических свойств летучей золы. Для процессов, происходящих в котле в первую очередь важны свойства относительно крупных частиц (микроны). В последние годы всё большее внимание уделяется количеству и составу мелких частиц, поскольку сжигание углей является значительным их источником, и по оценке количество фракции менее 10 мкм составляет примерно третью часть таких частиц, образованных в результате человеческой деятельности. В данной публикации данный интересный и обширный аспект не рассматривается.

Летучая зола представляет совокупность частиц с отличающимися размерами, составом и свойствами, среди которых едва ли сколь либо значимое количество имеет средние характеристики, например средний состав (рис. 1).

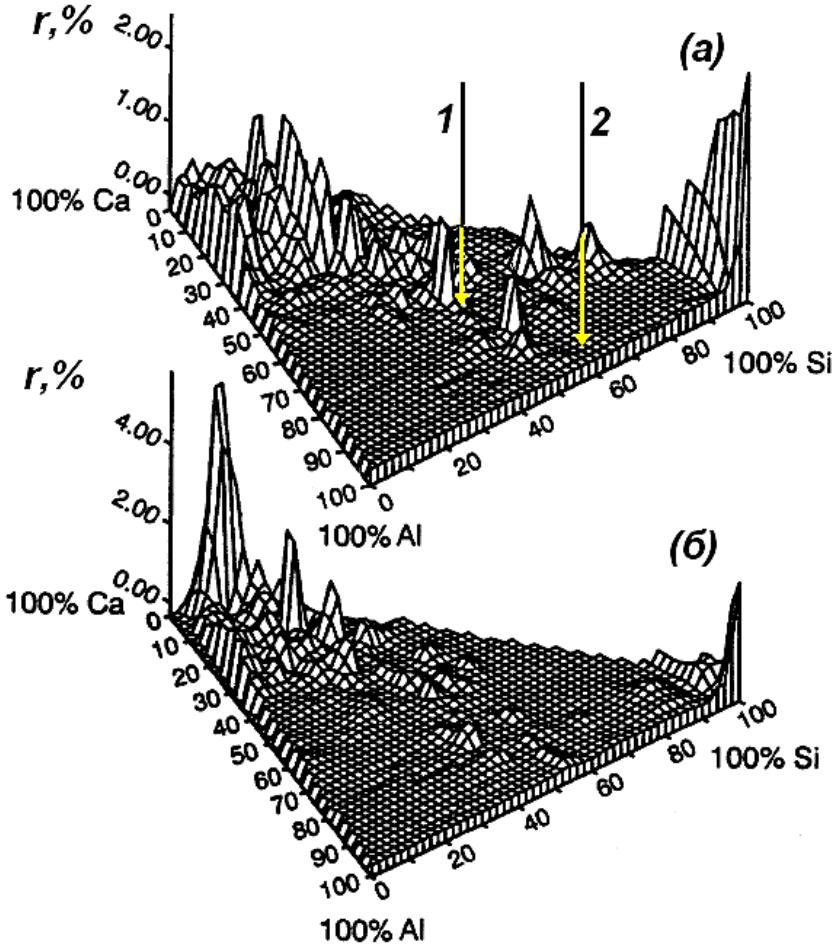


Рис. 1. Тройная диаграмма Si-Al-Ca состава летучей золы, образующейся при сжигании американского суббитуминозного угля Black Thunder в традиционных условиях (а) и при условиях низкого NO_x (б) [1].
Высота пиков соответствует доле по объёму частиц с соответствующим составом.
Положение стрелок 1 и 2 показывает средний (валовой) состав лабораторной золы угля и отложений, соответственно.

По ходу факела температура, агрегатное состояние и в некоторой степени состав частичек летучей золы изменяется, и способностью к закреплению и формированию отложений в разных температурных зонах обладают разные совокупности частиц. В ре-

зультате образуются отложения, состав, скорость формирования и свойства которых отличаются. В компьютерных программах образования и роста отложений оценивается способность каждой индивидуальной частицы к закреплению методом "частичка за частичкой, particle-by-particle". Для удобства анализа частички летучей золы можно объединить в группы по роли в формировании отложений. Например, в вероятностной модели шлакования УралВТИ [2] использовано деление частиц на 4 группы: матричные, липкие, инертные и абразивные, где под матричными понимаются частицы, закрепляющиеся на не липкой поверхности. Изменение доли каждой из групп частиц показано на рис. 2 по данным о составе индивидуальных частиц летучей золы бородинского угля.

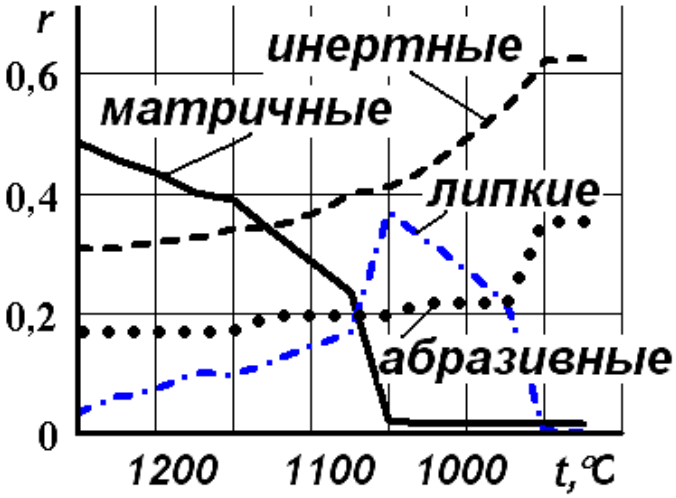


Рис. 2. Изменение доли частиц разного типа в зависимости от температуры (расчёт по распределению химического состава и размера индивидуальных частиц летучей золы бородинского угля).

Сведения о составе и размерах индивидуальных частичек летучей золы, используемые в математических моделях шлакования, оцениваются по данным о распределении минеральных включений в угле и представлений о механизмах образования летучей золы. Непосредственно, преимущественно для тестирования программ оценки, состав и размеры индивидуальных частичек летучей золы определяются при помощи сканирующей электронной микроскопии, скомпонованной с компьютером, например технология CCSEM.

Механизмы формирования летучей золы. При горении угля его неорганические компоненты претерпевают значительные физические и химические преобразования, глубина которых зависит от свойств угля и характеристик процесса.

В литературе рассматриваются несколько основных механизмов формирования летучей золы, например [3, 4] :

коалесценция (объединение отдельных минералов) внутренней минеральной части в горящей частице угля (рис. 3а);

фрагментация горящей частицы с частичным объединением внутренней золы (рис. 3б). Термин фрагментация объединяет совокупность различных процессов, в результате которых образуется более чем одна частица летучей золы из одной горящей частицы. В некоторых работах рассматривается раздельно фрагментация частиц в процессе выхода летучих и фрагментация при выгорании нелетучего остатка [5] ;

фрагментация (дробление) минеральной части внешней золы,

возгонка, испарение селективных компонентов с последующей конденсацией в виде гомогенных мелких частиц либо с образованием плёнок (покрытий) на поверхности других частиц. Помимо испарения отдельных металлов также рассматривается механизм испарения и конденсации их солей, таких как Na_2SO_4, KCl, K_2SO_4 [6].

- вынос ранее закрепившихся объединений частиц.

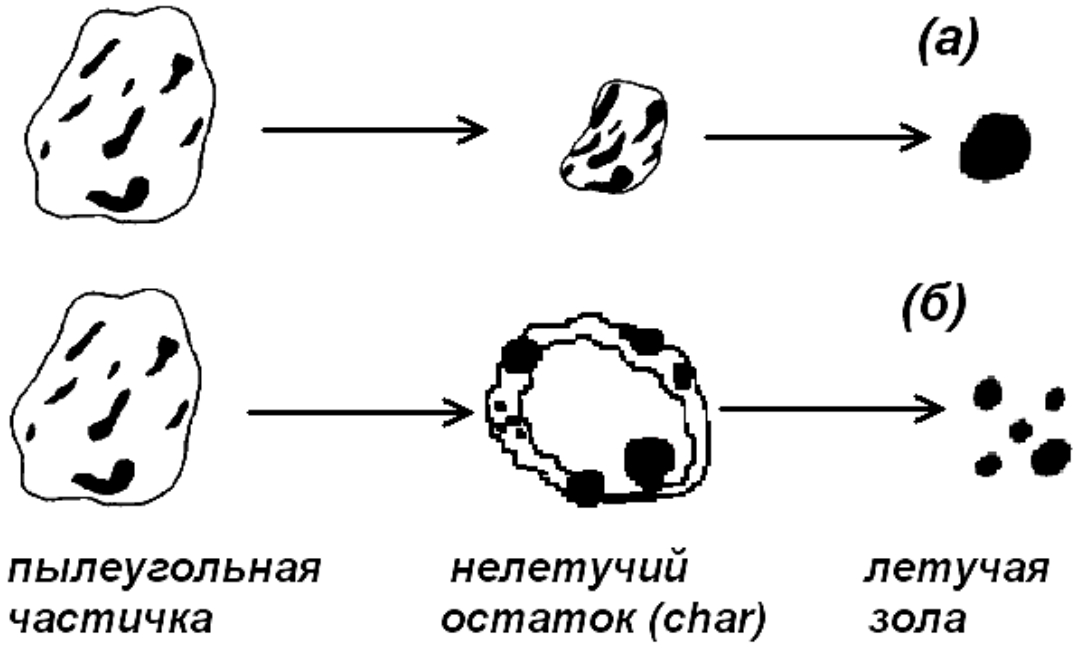


Рис. 3. Схема образования летучей золы путём коалесценции (а) и фрагментации (б).

Добавим к этому перечню процесс перераспределения частиц между летучей золой и шлаком, взаимодействия частиц с газовой фазой (сульфатизация, окисление), изменение фазового состава (плавление, кристаллизация и перекристаллизация).

Характерный результат таких преобразований проявляется в формировании многомодальной по размерам летучей золы, отдельные частицы которой крупнее частиц исходных минералов в угле и другие очень тонкие субмикронного уровня. Основная масса летучей золы формируется путём коалесценции внутренней золы и фрагментации внешней. Некоторые тугоплавкие минералы внешней золы, например кварц α-SiO_2, при развиваемых в топке температурах не плавятся и сохраняют исходный фазовый состав и неправильную форму. Однако, при высоких температурах силикатные и алюмосиликатные частицы, составляющие большинство в минеральной части, в контакте с другими расплавленными и конденсирующимися частицами образуют в основном расплавленные стекловидные сферы или аморфные образования.

Роль того или иного механизма в образовании основной массы летучей золы, очевидно не одинаковая для разных углей. В частности практически не наблюдается фрагментации при сжигании бурых углей, имеющих низкую склонность к вспучиванию. С ростом марки угля в ряду от бурого

до антрацита уровень фрагментации растёт вплоть до каменного высокореакционного (битуминозного с высоким выходом летучих). С ростом зольности наблюдается тенденция к снижению уровня фрагментации [5].

Склонность нелетучего остатка к фрагментации с большим или меньшим успехом оценивается по разным показателям и часто просто учитывается тип угля. В некоторых случаях для оценки используется индекс вспучивания угля, swelling – показатель его спекаемости, определяемый по изменению объема либо формы.

Основным механизмом формирования наиболее мелкой субмикронной части летучей золы считается освобождение органоминеральных металлов из органических соединений в процессе пиролиза углей, испарение солей (сульфатов, хлоридов) и освобождённых металлов и их конденсация при снижении температуры газового потока. Такой механизм обосновывается зависимостью количества субмикронной фракции от условий сжигания и, прежде всего, от температуры горения, а также характерностью размеров частиц для условий зародышеобразования и дальнейшей агломерации [3, 5, 7, 8]. Более крупные частицы субмикронного уровня и размером в единицы микрона в основном формируется при горении нелетучего остатка угольных частиц (char, частиц промежуточного продукта горения) за счёт их фрагментации [3, 8] и в меньшей мере зависят от температуры горения.

Субмодели формирования летучей золы. Как отмечалось, для прогнозирования размеров и характеристик летучей золы в основном в качестве исходных данных используют сведения сканирующей электронной микроскопии CCSEM о составе и размерах минеральной части в угле. Отметим, что даже этих данных, дополненных химическим фракционированием для определения органически связанных металлов, не достаточно для корректного прогнозирования (рис. 4).

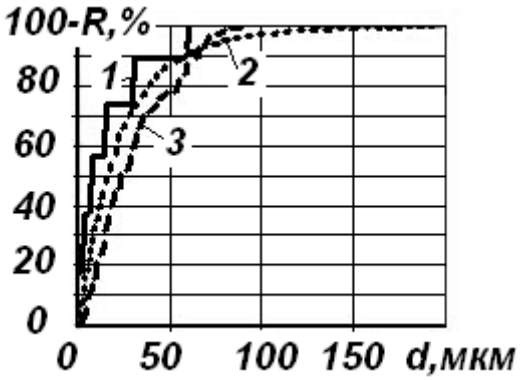


Рис. 4. Фракционный состав летучей золы [6].
1 - прогнозирование без учёта коалесценции (каждое минеральное образование в угле образует отдельную частичку летучей золы),
2 – реальная зола,
3 – прогнозирование при принятии полной коалесценции минеральной части в частичке пыли (объединение всех минеральных включений).

Для получения результатов прогнозирования более близких к реальным в субмоделях формирования летучей золы дополнительно используются эмпирические сведения о процессах дробления, объединения и испарения минеральной части, различающееся для углей разных типов и степени метаморфизма. Так, например, в вероятностной модели коалесценции (Random Coalescence, RC) для оценки фракционного состава дополнитель-

но учитывается разный тип углей [9]; в методе [10]– их реакционные свойства.

В, пожалуй, наиболее полной модели Atran, разработанной в EERC [11], в качестве исходных данных используются:

размер, состав и количество минеральных включений в угле, нахождение минеральных примесей в угольной частице или вне её (по данным электронной микроскопии скомпонованной с компьютером CCSEM),

средний состав золы, элементный состав и массовое количество неорганических элементов, связанных с органикой.

Также используются данные о конструкции и режимах работы котла. В модели учитываются процессы испарения – конденсации, коалесценции минеральной части и частичной коалесценции, шлакообразования, фрагментации горящего нелетучего остатка и минералов.

Дополнение экспериментальных данных по распределению минеральных включений в угле эмпирическими зависимостями их преобразования при горении позволяет получить хорошее соответствие для конкретных изучавшихся углей. Для произвольного угля и топочных условий приемлемое количественное прогнозирование, по-видимому, пока не обеспечивается. Такая ситуация, в том числе, связывается с различиями преобразования одного и того же угля в разных топках и условиях. В частности, состав и распределение летучей золы зависит от перераспределения минеральной части угля между шлаком и уносом.

Перераспределение между шлаком и уносом. В топочной камере часть наиболее крупной и тяжёлой летучей золы сепарирует в холодную воронку; достигшие поверхности стен и способные закрепляться частицы, в том числе мелкие, образующие рыхлый слой удаляются в виде шлака и агломератов частиц. Если не касаться не получивших в энергетике широкого распространения циклонных камер, доля минеральной части углей, удаляемой через холодную воронку и в виде шлака (коэффициент шлакоудаления $a^{шл}$) в традиционных топках не превышает 15 %.

При удалении части минеральных примесей в виде шлака средний химический состав летучей золы, как и удаляемого шлака, может отличаться от состава золы угля (золы лабораторного озоления), что необходимо учитывать при анализе шлакующих и иных свойств летучей золы и шлака.

В то же время, при большом количестве исследований в промышленных условиях и на стендах отсутствуют признаваемые широким кругом исследователей алгоритмы учёта или даже оценки результатов перераспределения минеральной части между шлаком и уносом по широко доступным данным для произвольно выбранного топлива. По-видимому, это, прежде всего, указывает на недостаточность широко доступных данных для подобного анализа, а также на зависимость результата от достаточно большого числа внешних факторов (режим пылеприготовления и сжигания, характеристика топочной камеры, в том числе условия агломерации

частиц золы и степени шлакоулавливания). Определённую роль играет и погрешность опытов, прежде всего, в части синхронизации отбора проб топлива и летучей золы, а также представительности их отбора. Вопрос о представительности отбора правомерен в силу того, что на отечественных ТЭС сжигается уголь переменного состава без усреднения.

Возможность получения для фиксированного угля результатов, отличающихся не только в количественном отношении, но и по знаку иллюстрируется простым анализом, частные результаты которого показаны на рис. 5. При этом анализе приняты крайне возможные варианты перераспределения минеральной части между шлаком и уносом. В одном случае принято, что в шлак сепарирует только внешняя зола (полное отсутствие коалесценции внутренней золы). В другом случае принята полная коалесценция внутренней золы с образованием больших частиц летучей золы, которые сепарируют в шлак. Анализировались угли, для которых экспериментально определена зависимость химического состава золы углей от зольности и, тем самым, средний состав внешней и внутренней золы.

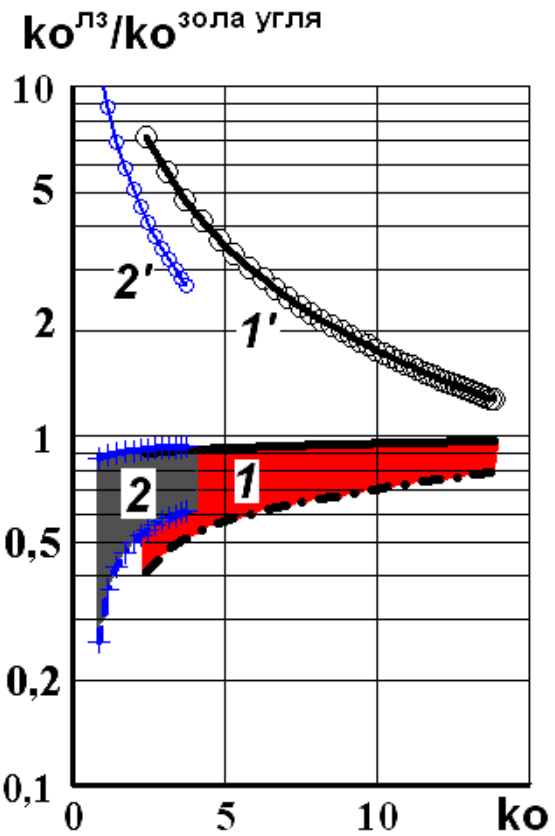


Рис. 5. Расчётное изменение отношения кислых к основным компонентам в летучей золе (лз) и золе угля.
ko=K/O, где $K=SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$, $O=CaO+MgO+K_2O+Na_2O$.
1, 2 – при принятии условия сепарации в шлак только внешней золы при коэффициенте шлакоулавливания $a^{шл}$=8-40% (отсутствие коалесценции внутренней золы), 1- майкубенский уголь, 2 – берёзовский уголь;
1′, 2′ - при принятии условия сепарации в шлак только внутренней золы, 1′- майкубенский уголь, 2′ – берёзовский уголь.

Помимо иллюстрации возможности получения для фиксированного угля отличающихся результатов подобный анализ также показывает, что заметное изменение состава летучей золы может наблюдаться только для малозольных углей с составом внутренней золы, существенно отличающимся от состава внешней. Для зольных углей с кислым составом минеральной части перераспределение несущественно и меньше колебаний состава в силу непостоянства зольности. Действительно, при коэффициенте шлакоулавливания менее 10%, потенциальное изменение состава летучей золы для углей с зольностью A^d=20-40% в первом приближении эквалентно изменению состава при изменении

зольности менее чем на 2-4%, что меньше реально наблюдаемых колебаний зольности.

Приводимая на рисунках 6-7 подборка результатов с промышленных котлов подтверждает результаты приведённого анализа, в том числе заключение о том, что закономерное перераспределение состава летучей золы и золы угля меньше, чем колебания состава из-за непостоянства зольности и состава золы поступающего зольного угля. Также подтверждается возможность заметного перераспределения состава летучей золы и золы малозольного угля.

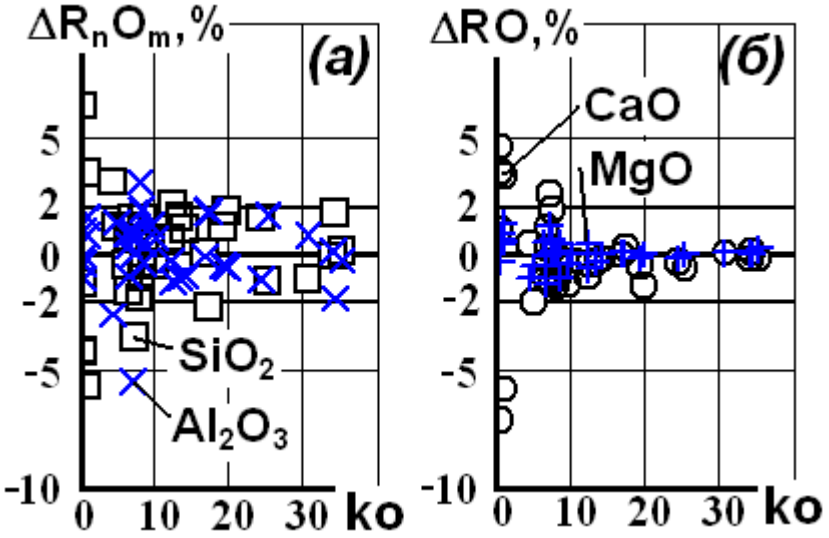


Рис. 6. Разность содержания компонентов $\Delta R_nO_m = R_nO_m^{унос} - R_nO_m^{уголь}$ (а) и ΔRO (б) в уносе и золе угля при разном соотношении кислых и основных компонентов в золе угля.

В приведённом простом теоретическом анализе помимо реального соотношения механизмов фрагментации и коалесценции не учитывался ряд процессов, таких как возможность фрагментации компонентов внешней золы, например, разложения карбонатов или фрагментации и выгорания пирита.

Эти процессы существенно влияют на перераспределение железа, и в литературе содержатся противоречивые результаты и их трактовка. Так, по [12] характерным является обогащение шлака железом (уменьшение в летучей золе) при сжигании как бурых, так и каменных углей, что логично, поскольку в шлак сепарируют наиболее крупные и тяжёлые частички. Наблюдавшиеся противоположные результаты, например, при сжигании ирша-бородинского угля, в [12] объясняются тем, что железо в их минеральной части находится преимущественно в форме сидерита ($FeCO_3$). В отличие от этого в ряде публикаций приводится мнение о возможной значительной фрагментации не только сидерита, но и пирита в процессе частичного окисления и образования пирротина ($Fe_xS_{1\pm x}$), например [13]. Известно также, что пирит в углях имеет разнообразные размеры и морфологию [14]. Размер пирита изменяется от мелких тесно связанных с органическим веществом включений, в частности, в форме сферических тел - фрамбоидов диаметром 0,5-1,5 мкм до крупных кристаллических пиритных прожилок (тысячи мкм).

В использованной совокупности данных получено не обеднение, а обогащение летучей золы железом в исследованиях, выполненных при

сжигании углей с высоким содержанием железа в виде пирита (кизеловский, кызыл-кийский, приозёрный). Напротив, максимальное уменьшение железа в летучей золе отмечается для кузнецких каменных углей, в которых железо представлено сидиритом (рис. 7). Также получено, что уменьшение железа в летучей золе более характерно для топочных камер с жидким шлакоудалением (огневой стенд УралВТИ, $a^{шл}$>50%) и высоким коэффициентом шлакоулавливния (ВИР-технология).

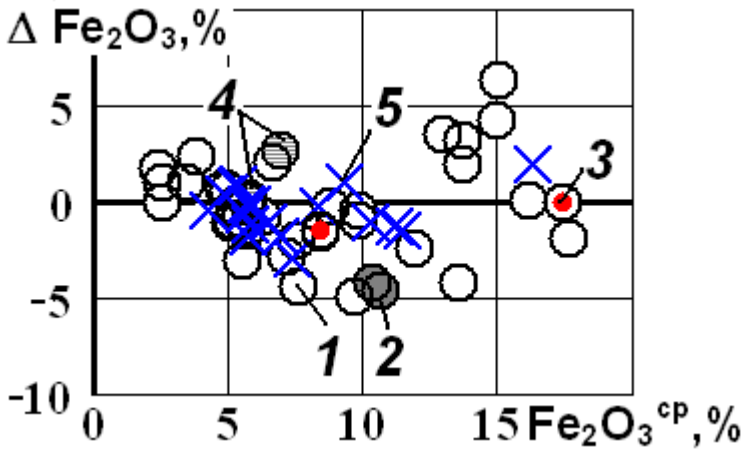


Рис. 7. Разность содержания железа $\Delta Fe_2O_2 = Fe_2O_3^{унос} - Fe_2O_3^{уголь}$ в уносе и золе угля при разных его значениях в золе угля.
1 – опыты на котлах,
2 – ВИР-технология, берёзовский уголь, 3 – котлы с ЖШУ, назаровский уголь, 4 – трёхступенчатое сжигание, азейский уголь, 5 - результаты с огневого стенда УралВТИ, $Fe_2O_3^{ср} = (Fe_2O_3^{унос} + Fe_2O_3^{уголь})/2$

Как и для других компонентов строгой зависимости перераспределения кальция для разных углей не прослеживается. Для бурых углей с высоким содержанием кальция в составе органических соединений и/или карбонатов скорее характерно обогащение кальцием летучей золы. С ростом температуры обогащение кальцием уменьшается [9] и при высоких температурах в совокупности с высоким коэффициентом шлакоулавливания наблюдается противоположная картина. В частности, такой результат получен для берёзовского угля (рис. 8).

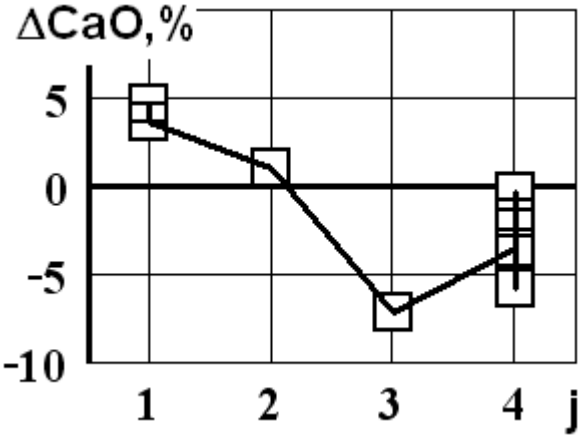


Рис. 8. Разность содержания кальция в уносе и золе берёзовского угля $\Delta CaO = CaO^{унос} - CaO^{уголь}$ в зависимости от условий его сжигания. **j:** 1 – ВИР-технология, котёл П-59; 2 – традиционное сжигание, твёрдое шлакоудаление, котёл П-59; 3 – жидкое шлакоудаление, котёл БКЗ-320-140ПТ; 4 – огневой стенд УралВТИ, жидкое шлакоудаление.

Для исключения влияния перераспределения железа анализ выполнен при пересчёте на состав $SiO_2+Al_2O_3+CaO+MgO=100$ %.

Окисленность железа. При сжигании одинакового угля в разных топках свойства летучей золы могут существенно различаться, не только в силу разной доли сепарации железа в шлак, но из-за разной формы его присутствия и степени окисленности. Форма присутствия и степень окисленности железа (валентность Fe^{2+}, Fe^{3+} в стекловидной и кристаллических фазах) зависят от большого количества факторов и, по-видимому, в силу

этого наблюдается плохая воспроизводимость в опытах на котлах. Среди влияющих факторов:

- температурная история частиц. С ростом температуры и/или теплового напряжения топки возрастает количество железа в стекловидной фазе $Fe^{ст}$ и доля двухвалентного железа в ней $(1\text{-}n)=Fe^{2+}/Fe^{ст}$;

- химический состав золы. При увеличении компонентов кислого состава в расплаве повышаются показатели $Fe^{ст}$ и (1-n);

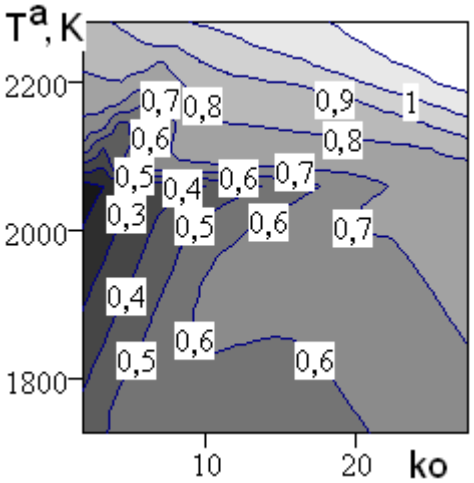


Рис. 9. Изменение доли Fe^{2+} в стекловидной фазе $(1\text{-}n)=Fe^{2+}/Fe^{ст}$ в золе- уносе, отобранной на котлах с твёрдым шлакоудалением при сжигании бурых и каменных углей.

- избыток воздуха. С ростом избытка воздуха количество железа в стекловидной фазе $Fe^{ст}$ и степень его окисленности уменьшаются. На рис. 10 приведены результаты исследований УралВТИ при сжигании экибастузского угля с использованием Мёссбауэровской спектроскопии.

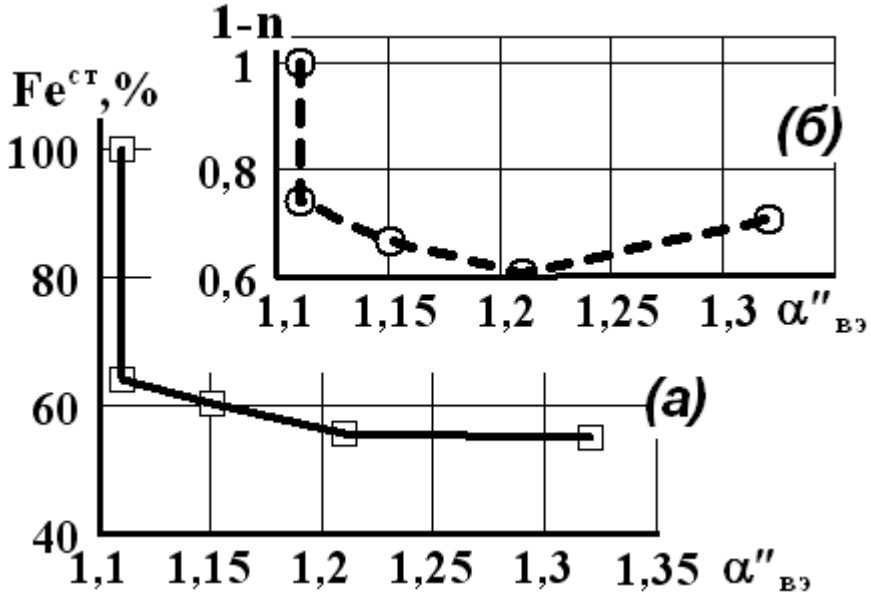


Рис. 10. Изменение количества железа в стекловидной фазе (а) и доли Fe^{2+} в стекловидной фазе $(1\text{-}n)=Fe^{2+}/Fe^{ст}$ (б) в летучей золе, отобранной в верхней части топки при сжигании экибастузского угля в котле П-57 блока 500 МВт при разных избытках воздуха за водяным экономайзером.

Организация ступенчатого сжигания угля с недостатком воздуха в зоне горения также уменьшают степень окисленности железа, что усиливает шлакующие свойства летучей золы. При этом последующая подача избыточного воздуха по ходу факела не компенсирует в полной мере степень окисленности железа и усиление шлакующих свойств [15], хотя в целом по ходу факела и с ростом выгорания топлива количество железа в стеклофазе снижается и содержание в ней Fe^{3+} растёт.

В золе-уносе кислого состава содержание железа в стекловидной фазе минимальное и степень окисленности железа максимальная по сравне-

нию с летучей золой по тракту котла. Например, в одном из опытов наших исследований сжигания экибастузского угля с низкими избытками воздуха в летучей золе из топки всё железо находилось в стекловидной фазе и форме Fe^{2+}, в то время как в уносе в форме Fe^{2+} измерено 39% и в кристаллической фазе примерно 47% от общего содержания железа. Это, строго говоря, не позволяет использовать унос для исследований и оценки таких свойств летучей золы как шлакующие и абразивные.

Мёссбауэровская (гамма резонансная) спектроскопии применительно к летучей золе недостаточно освоена и относится к числу уникальных. Без разделения на виды кристаллов и стекловидную и кристаллическую формы степень окисленности железа определяется химическим методом и выражается в виде $n = FeO/Fe_2O_3^{общ}$ или отношения $1{,}11\cdot FeO/Fe_2O_3$, где $Fe_2O_3^{общ} = Fe_2O_3 + 1{,}11\cdot FeO + 1{,}43\cdot Fe$. Естественно, что степень окисленности по определению химическим методом и по данным Мёссбауэровской спектроскопии в общем виде численно не совпадают, но в качественном отношении и для решения ряда практических задач целесообразно использование более простой химической методики. На рис. 11 показано изменение степени окисленности железа по ходу факела. По мере выгорания угля и снижения температуры степень окисленности железа существенно изменяется. По ходу факела изменяется степень окисленности железа и соотношение его содержания в стекловидном и кристаллическом состоянии.

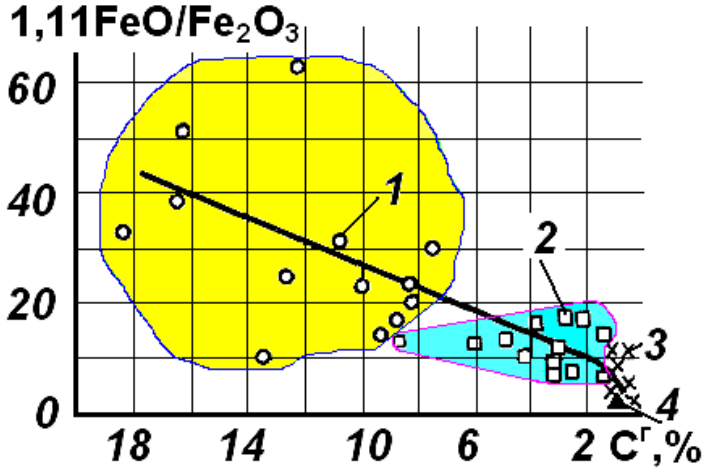


Рис. 11. Изменение соотношения FeO/Fe_2O_3 в летучей золе по ходу факела и в зависимости от содержания горючих при сжигании назаровского угля в котле П-49 [16]
1 - топка, отметка ↓22 м, 2 – топка, отметка ↓27,4м, 3 – за ширмами промперегревателя III ступени, 4 – за воздухоподогревателем (унос).

Изменение степени окисленности железа в основном, очевидно, определяет изменение шлакующих свойств в зависимости от режимов сжигания. С учётом изложенного повторимся, что, строго говоря, данные по уносу не могут хорошо характеризовать такие свойства летучей золы как шлакующие и абразивные, по крайней мере, для углей с высоким содержанием компонентов кислого состава.

В нашей стране исследования типа CCSEM о распределении по составу и размерам частиц летучей золы или минеральных включений в угле применительно к энергетике не выполняются. Для построения и тестирования математических моделей шлакования такие исследования для основных углей могут быть выполнены в зарубежных лабораториях. Кроме

того, по мнению автора, создание полезных для практики математических моделей шлакования, по-видимому, возможно и с использованием доступных экспериментальных данных, например сведений о распределении и составе частиц летучей золы по фракциям (размерным, плотностным и другим параметрам) [17]. Такой подход по рекомендации автора реализован в расчётной модели Института Теплофизики СО РАН [18].

Однако объём имеющихся подобных исследований не достаточный, и они не обобщены. Ниже приводятся несколько примеров изменения состава и характеристик фракций летучей золы.

Распределение состава по фракциям. При сжигании берёзовского угля грубые фракции летучей золы (уноса) обогащаются кремнием, алюминием и железом, при уменьшении содержания кальция, магния и серы (рис. 12). Вязкость частиц при этом имеет экстремальный характер.

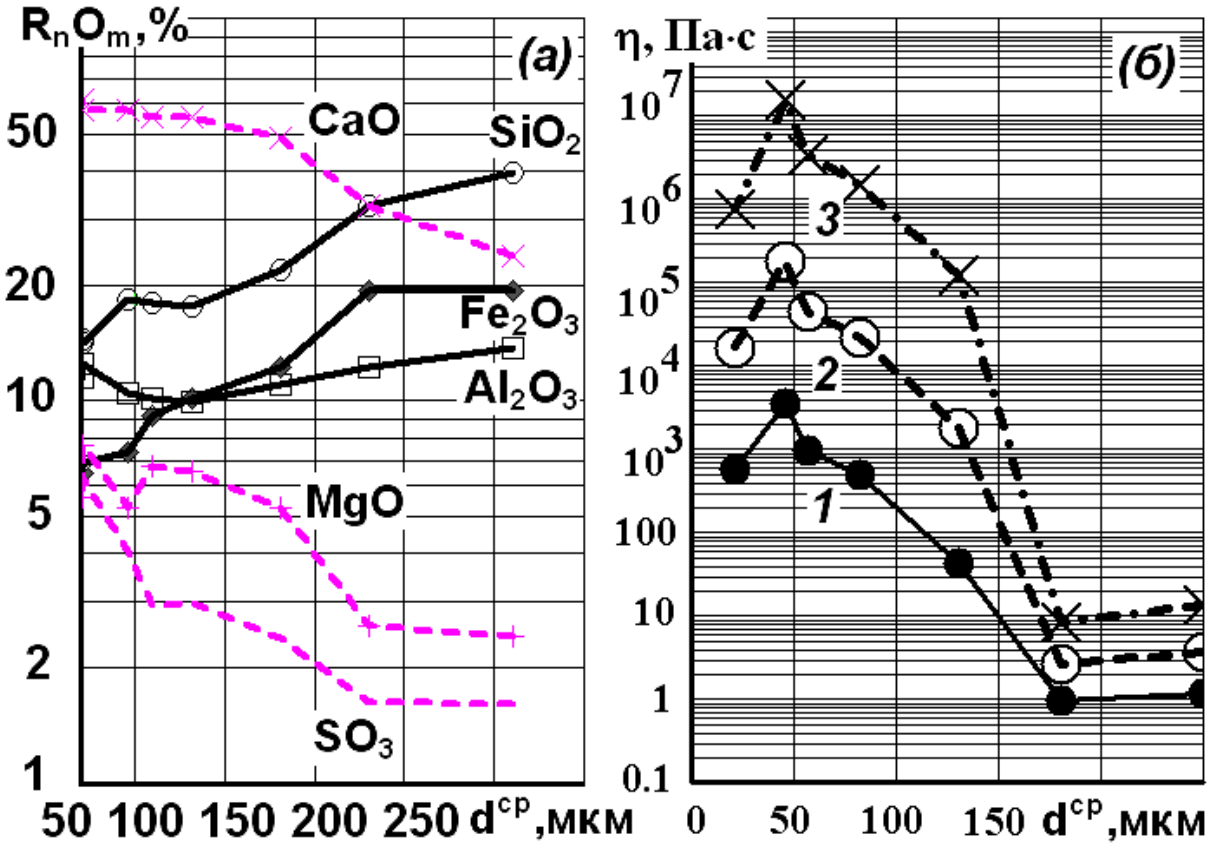
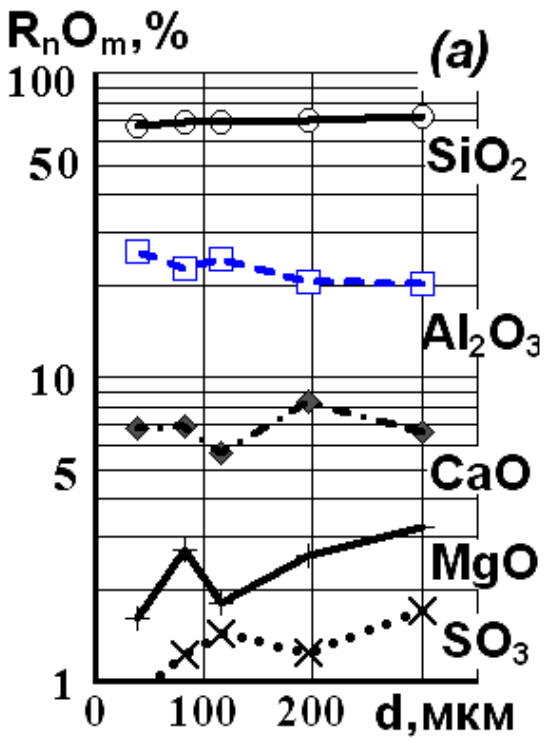


Рис. 12. Распределения состава (а) и расчётной вязкости (б) по размерным фракциям летучей золы, отобранной при сжигании берёзовского угля. 1 – t=1400°C, 2 - t=1300°C, 3 - t=1200°C.

Совпадающее в качественном отношении распределение химического состава летучей золы по фракциям определено для лигнитов с высоким содержанием кальция и в зарубежных исследованиях [19].

Распределение состава летучей золы, отобранной в районе ширм при сжигании промпродукта кузнецкого газового угля (ko>2,25) [20] показано на рис. 13. Видно, что грубые фракции также обогащаются кремнием и железом при менее выраженном перераспределении других компонентов.



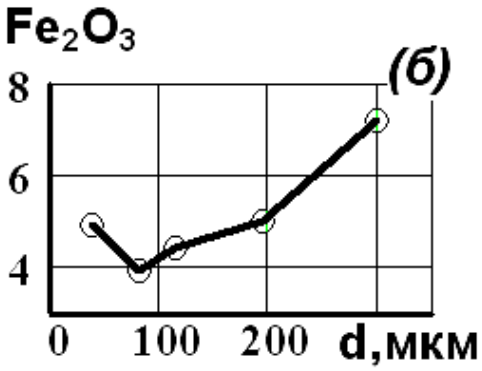


Рис. 13. Изменение содержания компонентов химического состава в пересчёте на сумму $SiO_2+Al_2O_3+CaO+MgO=100\%$ (а) и железа (б) в зависимости от размеров фракции летучей золы промпродукта кузнецкого газового угля.

Перераспределение компонентов в выделенной по плотности фракции показано на рис. 14.

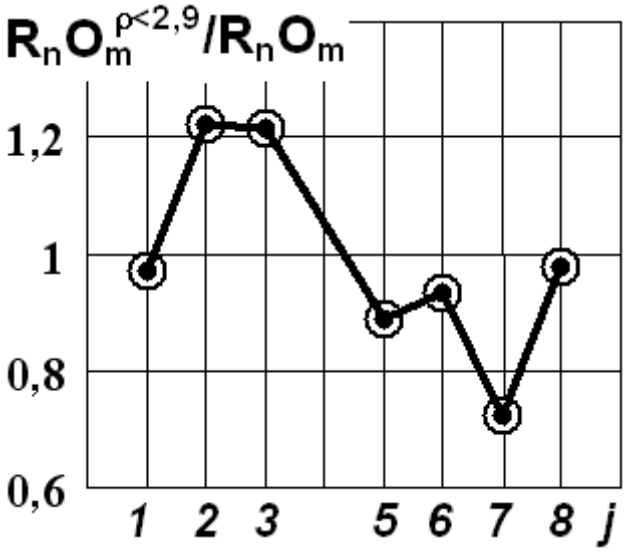


Рис. 14. Относительное содержание компонентов в "лёгкой" $\rho<2,9$ фракции уноса приозёрного угля из котла Е-500 в пересчёте на сумму $SiO_2+Al_2O_3+CaO+MgO=100\%$.

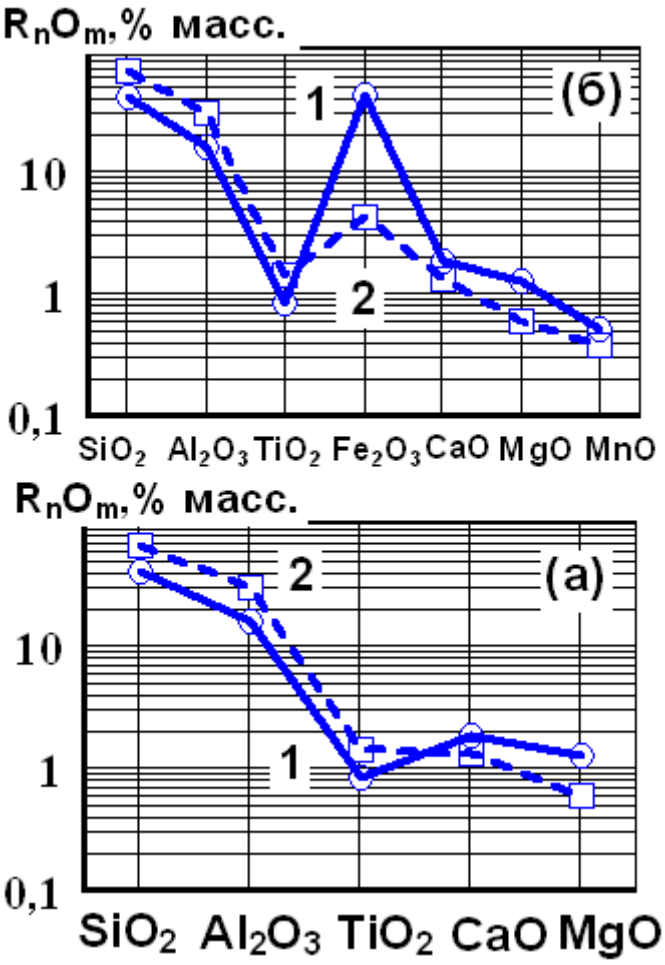
j: 1 – SiO_2, 2 – Al_2O_3, 3 – TiO_2, 5 – CaO, 6 – MgO, 7 – K_2O, 8 – Na_2O.

Летучая зола и твёрдые выбросы содержат немагнитные и магнитные фракции. Разделение на такие фракции и их исследования выполняются, прежде всего, с позиций влияния осадков золы на природу и для целей определения направлений использования золы этих фракций. Очевидно, что магнитные фракции обогащены железом в кристаллической магнитной форме (магнетит) и гематитом, как предельный оксид.

По нашим данным выделенная при помощи магнитного сепаратора магнитная фракция уноса экибастузского угля примерно в 10 раз обогащена железом по сравнению с немагнитной. При этом в ней значительно (в пять раз) возрастает доля трёхвалентного железа с 0,13 в немагнитной до 0,65 в магнитной. В магнитной фракции также возрастает содержание щё-

лочно-земельных металлов и марганца при уменьшении содержания кремния, титана и алюминия (рис. 15). То есть, железо имеет корреляцию с отрицательным знаком с элементами, формирующими алюмосиликатную часть (матрицу).

Рис. 15. Содержание компонентов в пересчёте на оксиды (R_nO_m) в магнитной (1) и немагнитной фракциях уноса экибастузского угля (котёл П-57). (а) в пересчёте на сумму SiO_2+ Al_2O_3+TiO_2+ Fe_2O_3+ CaO+ MgO+ MnO= 100%; (б) в пересчёте на состав без железа SiO_2+ Al_2O_3+ TiO_2+ CaO+ MgO = 100%.



Похожие результаты получены в исследованиях [21], где измерено десятикратное обогащение магнитной фракции железом и обогащение Co, Ni, и Mn в 2-4 раза. Соответственно не-магнитная фракция обога-щается K и Al. В отличие от результатов УралВТИ в [21] немагнитная фракция обогащается также Ca и в силу этого имеет более высокое pH.

Список литературы:

1. Zygarlicke Ch. J., McCollor D. P. Impacts of Low-NO, Combustion on Fly Ash and Slagging// EERC, Topical Report, No.: DE-FC2 1-93MC30097, USA, November 1997.

2. Алехнович А.Н. Вероятностная модель формирования шлаковых отложений// Электрические станции.-1995.- № 2.-с.16-20.

3. Status of coal ash behavior research/ S.A. Benson, E.A. Sondreal, J.P. Hurley//Fuel Processing Technology, Volume 44, Issues 1-3, September 1995, Pages 1-12.

4. Fine ash from coal combustion. Part 1: Fine ash from coal combustion/ B.J. Buhre, P.F. Nelson, R.P. Gupta, T.F. Wall// CCSD, Tehnical Note 17, October 2006, Australia.

5. Baxter L.L. Coal Char Fragmentation During Pulverized Coal Combustion// Sandia report, SAND95-8250c, UC-1409, July 1995.

6. Frandsen F.J. Fly ash and deposit chemistry// Project 204, Final technical report, Lyngby, 1998.

7. Formation of ultra-fine particulate matter from pulverized coal combustion/ C.L. Senior, T. Panagiotou, A.F. Sarofim, J.J. Helble// Preprints of Symposia, Division of Fuel Chemistry, American Chemical Society, March 2000, 45(1).

8. Formation of submicron particulate matter (PM_1) during coal combustion and influence of reaction temperature/ L. Zhang, Y. Ninomiya, T. Yamashita// Fuel, Volume 85, Issues 10-11, July-August 2006, Pages 1446-1457.

9. Prediction of fly-ash size distribution: a correlation between the char transition radius and coal properties/ M. Seggiani, A. Bardi and S. Vitolo//Fuel, Volume 79, Issue 8, June 2000, Pages 999-1002.

10. Modelling of ash formation behavior during pulverized coal combustion/ T. Yamashita, H. Tominaga, M. Orimoto, N. Asahiro// IFRF Combustion Journal, Article Number 200008, August 2000.

11. [benson2] 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), pp 796-798.

12. Шарловская М.С., Ривкин А.С. Влияние минеральной части Сибирских углей на загрязнение поверхностей нагрева парогенераторов. Новосибирск, Изд-во "Наука" Сибирское отделение, 1973 г.

13. Miller Sh.F., Schobert H.H. Effect of Mineral Matter Particle Size on Ash Particle Size Distribution during Pilot-Scale Combustion of Pulverized Coal and Coal-Water Slurry Fuels// Energy & Fuels, 1993, Vol. 7, № 4, pp. 532-541.

14. Максимович Н.Г. Геохимия угольных месторождений и окружающая среда// Вестник Пермского университетата. -Пермь, 1997.-Вып. 4.-Геология.-с.171-185.

15. Влияние схем сжигания и режимов на шлакования. Часть 1. Трёхступенчатое сжигание/ А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов// В кн.: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сборник докладов третьей научно-практической конференции. - Челябинск, УралВТИ, 2001. - т.II, с. 43-51.

16. О роли коагуляции тонкодисперсных частиц окиси кальция в механизме шлакования поверхностей нагрева/ В.В. Харченко, И.К. Лебедев, М.Ф. Лебедева// В кн.: Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции, Секция 1, том А., Таллин, 1980, с. 125-131

17. Алехнович А.Н. Уточнение расчётной схемы закрепления частиц и роста шлаковых отложений// Теплоэнергетика, 2008, № 9

18. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Расчетное исследование локального шлакования поверхности нагрева топочной камеры котла П-67//. Доклад на данной конференции.

19. The Effect of the Particle Size Differentiation of Lignite Fly Ash On Cement Industry Applications/ G.S. Itskos, S. Itskos, N. Koukouzas//2009 World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, KY, USA, May 4-7, 2009.

20. / Л.И. Пугач, Дубровский В.А., Лисицин В.В., Скерко Н.Н.// В кн.: Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Материалы Всесоюзной конференции. - Таллин, 1974. -том 1, с. 62-67.

21. Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions/ U. Kukier, Ch. F. Ishak, M. E. Sumner, W. P. Miller// Environmental Pollution, Volume 123, Issue 2, May 2003, Pages 255-266