

В.А. Козлов

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗОЛЫ УГЛЯ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТОПОК**

Рассмотрено влияние зольности, влаги и химического состава золы угля на эффективность его сжигания и эксплуатацию топок.

Ключевые слова: уголь, зольность, основные и кислые оксиды, температура плавления золы, шлакование, отложения в топках.

Рядовой уголь после добычи представляется топливом с определенной исходной энергией, содержащим, как «чистое топливо», так и не горючие элементы, включающие внешнюю породу, внутреннюю зольность и воду. Не горючие элементы можно интерпретировать, как разбавляющие элементы, уменьшающими энергию «чистого топлива», содержащуюся в единице массы. Когда идет горение, порода и внутренние не горючие составляющие угля переходят в золу. Присутствующее в угле значимое содержание серы и ртути при сжигании является причиной возникновения экологических проблем, а также проблем в эксплуатации и ремонте топок электростанций и котельных.

Процесс обогащения угля, который основан на использовании различных физических сил, изменяет характеристики рядового угля в направлении наиболее соответствующим требованиям рынка.

В мире наблюдается тенденция, когда потребители угля для энергетических целей ужесточают требования к производителям угля по уменьшению влаги угля, его зольности и снижению содержания серы.

Так, в Казахстане разработана Правительственная программа по снижению зольности добываемых углей Экибастузского месторождения на ближайшее будущее. На период до 2016 года зольность угля, поставляемого на электростанции, допускается 43 %, на период с 2016 г. по 2021 г. зольность угля, предназначенного для получения электроэнергии на электростанциях должна быть не более 38 % и, начиная с 2021 го-

2021 года зольность сжигаемого угля должна быть не более 29,5 %. Эта важнейшая народнохозяйственная задача предполагает не только значительное повышение калорийности топлива, но и позволяет решить экологические проблемы, связанные с уменьшением выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду более чем в 2 раза.

Обогащение угля снижает зольность угля и значительно увеличивает отдаваемую мощность станции, уменьшает вредные выбросы в окружающую среду. Конечно, затраты на обогащение угля и охрану окружающей среды требуют для действующего производства значительных финансовых затрат. И, зачастую, собственники предприятий по добыче топлива оппозиционно относятся к данным мероприятиям. Далее кратко рассматривается, как качество сжигаемого угля влияет на мощность станции, и как химический состав золы влияет на эксплуатационные параметры топки.

Размер частиц, содержание влаги, наличие глинистого материала может влиять на калориметрические характеристики угля, особенно когда требуется измельчение угля до крупности, достаточной для применения в топках пылевидного факельного и циклонного сжигания. В топках со слоевым сжиганием или в топках кипящего слоя требования к крупности менее критичны.

В топках пылевого сжигания, дробленый уголь подается питателем в распылитель. Уголь, высушенный и измельченный до крупности менее 0,074 мм, подается в распылитель, который и доставляет тонкие частицы в топку для сжигания. Увеличение влаги угля отрицательно сказывается на работе распылителя.

Величина зольности в угле и химический состав угля, являются ключевым фактором формирования расплава и отложений в топке, сужения конвекционного прохода и перегрева секций в топке. Эти отложения препятствуют передаче тепла и выводу золы из топки. Когда массивные отложения накапливаются, они могут привести к необходимости остановки работы топки, из-за того что зола может также закупорить проходы для горячего воздуха.

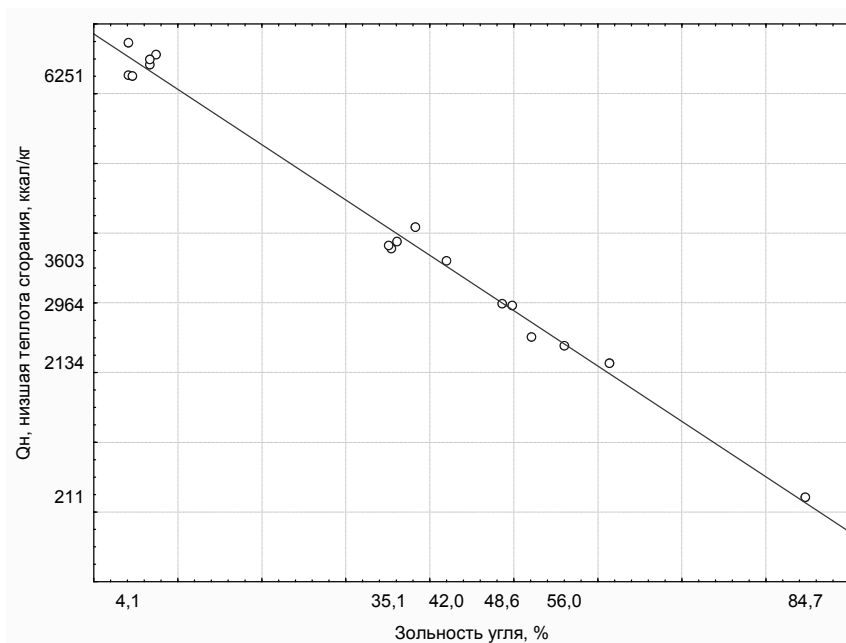


Рис. 1. Зависимость нижней теплоты сгорания Q_n от зольности A_d для крупного угля класса 25x100 мм

Минеральное вещество в угле уменьшает величину калорийности топлива, является причиной эрозии труб и воздухопроводов топки, формирования отложений на трубах, превышения выбросов SO_2 и, в итоге, увеличивает стоимость произведенной энергии, включающей затраты для складирования золы и скрубберного осадка.

Минеральное вещество может присутствовать в угле в виде тонких диссоциированных частиц, как разделенные углем прослойки породы, или более в общем, как отдельные частицы породы из кровли или подошвы, попадающие в уголь при добыче. Различные формы негорючего компонента: глинистый сланец, песчаник, глина и пирит являются основными породобразующими элементами в угле.

Высокая зольность угля имеет непропорционально неблагоприятное влияние на теплотворную способность угля. На рис. 1 показан типичный график зависимости нижней теплоты сгорания угля от зольности, построенный по данным исследования

рядовых углей марки «Д» в питании ЦОФ «Павлоградская» (ДТЭК, Украина).

Аналитическое уравнение зависимости для класса 25x100 мм:

$$Q_n = 6858,42 - 79,41 \cdot A^d, \quad (1)$$

Из уравнения следует, что на 1 % зольности приходится 79,41 ккал/кг.

Аналитическое уравнение зависимости для мелкого класса 1x25 мм:

$$Q_n = 6811,48 - 79,20 \cdot A^d, \quad (2)$$

Из этого уравнения следует, что на 1 % зольности приходится 79,20 ккал/кг.

Увеличение влаги угля влияет на калорийность также как и увеличение зольности, уменьшает его значение. Получено уравнение, для угля марки «Д» разреза «Виноградский» (КТЭК, Кузбасс), связывающее зольность и влагу:

$$Q_n = 7262,5 - 63,16 \cdot A^d - 73,08 \cdot W_r \quad (3)$$

Например, требуемую низшую теплоту сгорания концентрата в 6000 ккал/кг мы сможем получить, при зольности на сухую массу $A^d=4,9$ % и рабочей влаге $W_r = 13,0$ %.

Из уравнения видно, что на 1 % зольности приходится 63,16 ккал/кг, а на 1 % влаги — 73,08 ккал/кг, что несколько выше, чем для зольности.

При горении угля происходит образование крупных частиц золы внизу топки, а тонкие зольные частицы вылетают в трубу. Обычно распределение происходит в пропорции около 20 % вниз и 80 % вверх. Удаление золы и ее размещение приводит к значительному увеличению стоимости производства энергии из угля. Улавливание ртути после сгорания угля требует специального места для складирования ртути с пылевидной золой и активации углерода для захвата ртути из дымоходных газов. Без последующего разделения летучей золы и активного углерода, летучая зола из таких процессов не будет пригодна для использования в цементе и бетоне.

В топке также наблюдается отрицательное явление, названное шлакованием, которое включает процесс расплавления золы и смешение расплава с частицами не расплавленной золы в

нижней секции топки, включая и конвекционный проход, который незащищен от лучистого тепла. Химический состав золы угля влияет на процесс шлакования. Имеются различные модели для предсказания процесса шлакования золы, но ключевые параметры качества угля включают, химический состав золы, температуру плавления и зольность топлива.

Деление суммы основных компонентов (CaO, MgO, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O) на сумму кислых компонентов (SiO₂, Al₂O₃, TiO₂) золы, определяет величину, так называемого основно-кислотного отношения. Это отношение, так же как и индекс основности (I_o) для коксующихся углей, широко применяется в модели для шлакования и включается в формулу вычисления фактора шлакования, который для восточных углей США определяется по эмпирической формуле [1]:

$$R_s = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O) \cdot S / (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2), \quad (4)$$

где S — содержание серы в угле, %.

Таблица 1

Данные химсостава золы угля разреза «Богатырь-Комир»

Показатели	Величина показателя		Среднее значение
	От	До	
Температура плавления золы, °С	1490	1500	1495
момент размягчения	—	—	1300
момент полушария	—	—	1460
момент жидкого состояния	—	—	1500
Состав зольного остатка:			
SiO ₂ , %	56,9	67,3	62,1
Al ₂ O ₃ , %	24,4	31,6	28,0
Fe ₂ O ₃ , %	4,4	7,26	5,83
CaO, %	0,68	3,29	1,98
MgO, %	0,19	1,26	0,72
Ti O ₂ , %	1,09	1,65	1,37
SO ₃ , %	0,55	2,31	1,43
P ₂ O ₅ , %	0,32	1,29	0,80
K ₂ O+ Na ₂ O, %	0,56	0,95	0,75
Содержание серы общей S _t ^d , %	0,4	1,0	0,7

Содержание серы отражает действие пирита, который состоит на половину из железа, на шлакование и его влияние в рассматриваемой модели может быть учтено степенью, как:

$$R_s = (\text{Fe}_2\text{O}_3^{1,50} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2), \quad (5)$$

Величина $R_s \leq 0,6$ относит золу к низкой степени шлакуемости, $0,6—2,0$ — к средней степени шлакуемости, $2,0—2,6$ — к высокой степени шлакуемости и $>2,6$ к сверхвысокой степени шлакуемости.

При низком содержании серы в углях уравнение (5) может не соответствовать действительности, так как, например, западные угли США имеют типично большие содержания кальция и натрия и меньше железа и серы чем в восточных углях. Модель предлагает для западных бурых углей с составом золы, когда $\text{CaO} + \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ следующее уравнение [1]:

$$R_s = (HT + 4 \cdot DT) / 5, \quad (6)$$

где HT — температура образования полусферы, $^{\circ}\text{C}$, DT — температура размягчения, $^{\circ}\text{C}$.

Так величина R_s равная 1340°C и более соответствует низкой степени шлакуемости, $1230—1340^{\circ}\text{C}$ средней степени шлакуемости, $1150—1230^{\circ}\text{C}$ высокой степени и ниже 1150°C — очень высокой степени шлакуемости.

Вычислим на примере угля разреза «Богатырь-Комир» (Казахстан) показатель шлакуемости используя данные о качестве угля из табл. 1.

Показатель шлакуемости будет по уравнению (4):

$$R_s = (5,83 + 1,98 + 0,72 + 0,75) \cdot 0,7 / (62,1 + 28,0 + 1,37) = 0,071,$$

что соответствует низкой степени шлакуемости Экибастузских углей.

Применение восстановительной или окислительной газовой среды в методе определения плавкости золы моделирует поведение углей при сжигании в промышленных агрегатах [3]: при слоевом сжигании в зоне образования шлака создается восстановительная среда, а при пылевидном сжигании в условиях избытка воздуха — окислительная среда.

В окислительной среде процесс плавления протекает при температурах выше на 70—90 °С, чем в восстановительной среде, что объясняется свойствами соединений железа. Так, в восстановительной среде образуются легкоплавкие эвтектики закисных форм железа с алюмосиликатами, а в окислительной — тугоплавкие гематитные формы железа.

Химический состав и температура плавкости золы позволяет определить эффективный способ сжигания и удаления шлаков.

Специалисты АЕР (Электроэнергетической Организации Америки) развивают графический метод для предсказания процесса шлакования золы в топке [2].

Эта процедура предполагает, что процесс шлакования является функцией количества золы в топливе, химического состава золы и температуры размягчения золы. Определено, что в больших топках уголь имеет низкий потенциал шлакуемости, а в маленьких или высокотемпературных топках зола имеет потенциал высокой шлакуемости.

Одним из результатов работы АЕР является заключение о том, что уменьшение зольности топлива ослабляет шлакуемость.

Обогащение угля часто уменьшает кальций и алюминий в золе концентрата, и обогащение иногда уменьшает температуру размягчения; однако в другом случае обогащение может существенно увеличить температуру размягчения золы. Даже когда обогащение уменьшает температуру размягчения, уменьшение золы в процессе обогащения угля, как показано в работе АЕР, может привести к значительному улучшению в шлаковании золы данного угля.

Загрязняющие отложения связаны с химией их образования при формировании отложений при нагреве паровых труб. Эти отложения приводят к коррозии труб и ухудшают прохождение газа через топку, поднимая нагрузку вентилятора и снижению мощности топки. Уменьшается открытое пространство между трубами для конвективного прохода. Загрязняющие отложения трудно удаляются. Отложения, в общем, связаны с содержанием натрия в золе угля, но отложения могут быть также связаны с оксидами калия в золе и величиной зольности угля.

На модели [2] для отложений в случае, если в золе наблюдается следующее отношение оксидов $\text{CaO} + \text{MgO} < \text{Fe}_2\text{O}_3$, то фактор загрязнения может быть вычислен по формуле:

$$R_f = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \cdot \text{Na}_2\text{O} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2). \quad (7)$$

Когда результат вычисления R_f ниже 0,2, зола относится к низкой степени склонности к отложениям, в пределах 0,2—0,5 средней степени склонности к отложениям, в пределах 0,5—1,0 относится к высокой склонности к отложениям и выше 1,0 относится к сверхвысокой склонности к отложениям.

Этот фактор может также быть вычислен также по формуле:

$$R_f = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \cdot (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2), \quad (8)$$

учитывающей суммарное содержание оксидов Na_2O и K_2O .

Для бурых углей фактор отложений определяется как:

$$R_f = \text{Na}_2\text{O}\% \text{ в золе угля}. \quad (9)$$

Когда содержание Na_2O ниже 3 %, зола относится как низкой и средней склонности к отложениям, при содержании 3—6 % зола относится к высокой степени склонности к отложениям и содержанию более 6 % — сверх высокой степени к отложениям.

Испытания бурых углей, что содержание в золе угля натрия оказывает сильное влияние на образование отложений в топке. Фактически испытание показало потенциальное увеличение отложений при увеличении золы в топливе, и что топливо с высоким содержанием натрия и высокой золой создавало много эксплуатационных проблем.

Вычислим значение фактора загрязнения для углей разреза «Богатырь-Комир» по формуле (8):

$$R_f = (5,83 + 1,98 + 0,72 + 0,75) \cdot 0,75 / (62,1 + 28,0 + 1,37) = 0,076,$$

следовательно, зола относится к низкой степени склонности к отложениям.

Обогащение уменьшает зольность в угле и способствует уменьшению отложений при сжигании угля с высоким содер-

жанием натрия. Это связано также с тем, что, возможно, влага обогащенного угля уменьшает содержание натрия в угле и способствует уменьшению отложений при сжигании углей с высоким содержанием натрия.

Влага не только уменьшает энергию сжигания единицы массы угля, но также уменьшает эффективность станции, за счет увеличения износа топок и уменьшает выходную мощность станции.

Высокая влага в углях оказывает отрицательное влияние на тепловые характеристики угля, скорость нагрева воды и эффективность тепло— и электростанций. Высокая влага топлива может уменьшить производительность распылителя топлива в топках, уменьшить теплоотдачу, из-за потерь энергии на испарение воды в топливе при горении.

Дополнительная вода увеличивает массу газа за счет парообразования в топке и увеличивает мощность вентиляторов. Увеличение электрической мощности внутреннего потребления, создаваемой высокой влажностью угля, уменьшает эффективность станции. Затраты на очистку топок, пылеуловителей и скрубберов от золы также повышают себестоимость электроэнергии.

Повышенная влага топлива может расширять эффект эрозии труб и материала топок за счет увеличения скорости газа в топке и трубах. Чрезмерное парообразование в топке уменьшает отдачу тепла и увеличивает фактические тепловые потери.

Наиболее ключевые выбросы на тепло— и электростанциях, сжигающих уголь, включают твердую пыль, SO_2 , ртуть, NO_x и CO_2 . Выбросы могут быть уменьшены благодаря обогащению угля и снижению влаги. Обогащение угля удаляет золу, серу и ртуть из угля. Уменьшение влаги топлива, особенно важно при высокой влажности угля, улучшает эффективность станций и увеличивает выход продаваемой мощности.

Сокращение выбросов NO_x и CO_2 определяется контролем их образования в топке и расходом воздуха — топливной смесью. Очевидно, что сжигание качественного топлива в топке и контроль расхода воздуха на стадиях сжигания способствует снижению выбросов NO_x . Если качество топлива широко изменяется, а расход воздуха не соответствует оптимальной смеси топлива, то наблюдаются повышенные выбросы NO_x , а при недостаточном сжигании и высокие потери углерода.

Высокое содержание NO_x в выбросах топок связано с химией золы, особенно с содержанием пирита, и может иметь результатом проблемы забивания топок. Обогащение угля удаляет пирит из топлива и может уменьшать отложения, связанные с содержанием NO_x .

АЕР контролирует выбросы ртути на станциях США и будет требовать существенного снижения содержания ртути в выбросах в будущем. Несмотря на применение сорбентов, требуемых для улавливания ртути, эти технологии для захвата ртути после сжигания могут быть эффективными и экономичными до требуемой степени. Также практика обогащения угля показывает на достигаемое снижение содержания ртути в концентрате на 50 % и выше для многих углей.

Заключение

Обогащение добытого рядового угля, предназначенного для энергетических целей, позволяет:

1. Значительно снизить его зольность и получить концентраты существенно большей теплотворной способностью при сжигании, повышая эффективность работы тепло— и электростанций.

2. Сократить транспортные расходы на перевозку топлива.

3. Снизить содержание серы, NO_x , CO_2 и ртути в атмосферных выбросах, тем самым уменьшить вредное воздействие на окружающую среду.

3. Уменьшить объем таких отрицательных процессов, как шлакование и отложения в топках, на трубах и газоходах, и тем самым уменьшить эксплуатационные затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Michael B. Doherty, «Evaluation of Coal Quality Impacts on Power Plant Operations», Coal Prep. pp.7—51, April 28—30, 1998.

2. S.K. Ghosh, «Understanding Thermal Coal Ash Behavior», Mining Engineering, pp. 158—162, February 1985.

3. Хоффман Е. Энерготехнологическое использование угля. Пер.с англ.— М.: Энергоатомиздат, 1983. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Козлов Вадим Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, главный технолог Коралайна Инжиниринг — СЕТКО, vak@cetco.ru.