

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ МИКРОПОМОЛА В ЭНЕРГЕТИКЕ

А.П. Бурдуков, В.И. Попов, В.А. Фалеев, Т.С. Юсупов

Рассмотрены преимущества двух направлений облагораживания углей как энергетического топлива – глубокая деминерализация и механоактивационное измельчение. Показано, что отдельное использование процессов облагораживания, так и их сочетание открывают перспективы в повышении качества и энергосодержания, а также снижения энергии активации, увеличения их реакционной способности при использовании углей в энергетике.

Предложена новая технология использования углей микропомола для замещения относительно дорогого газа и мазута при розжиге и стабилизации горения пылеугольного факела в энергетических котлах, а также объектах промплоэнергетики. Технология включает в себя процессы микропомола, термогазоподготовки и механоактивации.

Ключевые слова: уголь, энергетика, облагораживание, механоактивация, микропомол.

Уголь является перспективным энергетическим топливом. Россия – одна из ведущих стран мира по запасам ископаемых углей и до 1990 года была в числе лидеров по их добыче (примерно 750 млн. т/год.) [1].

Открытие крупнейших месторождений нефти и газа в 50–60 г.г. прошлого столетия привело к изменению топливного баланса страны. За перестроечный период резко сократилась добыча угля и в 2005 г. она составила примерно 300 млн. т. Основным энергоносителем стал газ.

Однако последние оценки специалистов вызывают беспокойство об энергообеспеченности и энергобезопасности страны в недалеком будущем, если основой энергетики будут в основном только газ и нефть. Прогнозные ресурсы основных энергоносителей на уровне потребления 2000 г. выглядят следующим образом: нефти хватит на 48 лет, газа на 60 лет, в то время как углем страна обеспечена более чем на 220 лет. При этом отчетливо проявляется дефицит нефти и газа. В скором будущем предстоит переход к эксплуатации труднодоступных месторождений нефти и газа Восточной Сибири и шельфа, что неизбежно приведет к удорожанию этих видов полезных ископаемых.

В топливно-энергетическом балансе России на долю газа приходится порядка 60 %, а в центральной части страны, где проживает более 80 % населения, этот показатель достигает 80 %. Между тем во многих экономически развитых странах имеет место иная картина, – там основным энергетическим топливом является уголь. Так, в США он занимает 60 % в энергетике страны, в Китае – более 80 %, а в России менее 20 %. Это недопусти-

мо мало. Главная причина данной ситуации заключается в низкой стоимости газа в России для внутреннего потребления и ценовая диспропорция между углем и газом [2].

Указанные показатели привели к переосмыслению энергообеспеченности и энергетической безопасности страны. Минэкономразвития РФ планирует увеличить добычу угля к 2020 г. почти в 2 раза, то есть добывать 400–430 млн.т. в год, доводя участие угля в энергобалансе страны до 24 % [3].

Одним из основных путей в приближении конкурентоспособности угля к природному газу является повышение его качества на основе новых научных разработок и технологических решений, в том числе глубокой деминерализации топлива и повышения реакционной способности посредством активационного измельчения.

Проблемы деминерализации углей

Органическая часть топлива определяется составом петрографических компонент, степенью метаморфизма. Угли, будучи горючей породой осадочно-растительного происхождения, всегда содержат негорючие минеральные примеси (35–50%), которые соответственно составляют зольность топлива. Процессы многих технологий использования углей требуют по возможности более "чистых" угольных концентратов. Это достигается путем глубокой деминерализации углей преимущественно методами механического обогащения, т.е. разделения минералов без изменения химического состава органического вещества. Между тем имеются и вновь разрабатываются перспективные методы химического и механохимического обогащения. Промышленно развитые страны для тепло-

энергетики используют только обогащенные угли с зольностью $A^p = 5-18\%$. В России угли для коксования обогащаются полностью, однако для энергетики облагораживаются только 11,6 % используемого топлива и нередко на электростанции поступают угли с A^p до 40 % [4]. Состояние обогащения углей в России дано в таблице.

Основные преимущества деминерализации топлива состоят в следующем. Считается, что снижение A^p на 10 % позволяет повысить КПД производства электроэнергии на 2-4 %. Однако данная зависимость не имеет линейный характер. Например, сжигание высокозольного (35-40%) экибастузского угля приводит к снижению мощности ТЭС и необходимости использования для подсветки факела до 22 млн.т. мазута в год [5]. В данной ситуации уместно вспомнить высказывание Д.И. Менделеева «топить топки нефтью, все равно, что топить ассигнациями». При обогащении менее зольных углей, например кузнецких, при снижении A^p на 10 %, расход мазута на единицу сжигаемого топлива снижается на 6-15 %. Уменьшение зольности на 1 % повышает стоимость топлива на 1,5 % за счет увеличения его энергосодержания.

Таблица - Снижение зольности углей в результате их обогащения

Бассейн	Зольность угля			
	коксуемых		энергетических	
	Исходный уголь	Концентрат	Исходный уголь	Концентрат
Печерский	38,7	13,7	26,2	19,0
Кузнецкий	23,8	8,8	18,9	9,4
Южно-Якутский	16,2	13,4	--	--
Черемховский	--	--	26,5	17,4

Особо следует выделить экологические преимущества при использовании обогащенных углей на основе снижения содержания в отходящих газах CO_2 , SO_2 , NO_x , а также твердых компонентов [6]. Большие экономические перспективы открываются также в результате исключения затрат на перевозки балластного негорючего материала.

В настоящее время повысился интерес к методам обогащения углей с получением чистых витринитовых концентратов с зольностью около 1 %. В этих методах используются центробежные, химические, механохимические процессы, магнитная сепарация в высокоградиентных полях, специальные флотационные методы, позволяющие разделять соб-

ственно витринит по степени его минерализованности. Для этого изыскиваются новые органические вещества в качестве флоторегентов. «Сверхчистые» угольные концентраты перспективны в качестве топлива газовых турбин, двигателей внутреннего сгорания и даже в авиационных реактивных двигателях, но их дисперсность должна составлять порядка 10 мкм. Исключительно важное значение имеет плавкость минеральных компонентов. Низкоплавкие соединения кальция, магния, железа подлежат удалению, так как их присутствие приводит к порче агрегатов указанных машин.

Имеются и другие не менее актуальные направления применения «чистых» углей, в частности, металлургия, где они выступают в роли восстановителей металлов из оксидов, а также используются при выплавке кристаллического кремния и других веществ.

Следует, однако, отметить, что в каждой отдельной технологии необходим технико-экономический расчёт, позволяющий определить необходимый с точки зрения экономических показателей процесса уровень снижения зольности топлива.

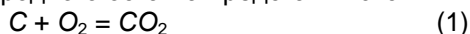
Активационное измельчение для повышения реакционной способности угля

Горение пылеугольного факела – сложный физико-химический процесс, включающий в себя целый ряд аэродинамических, теплофизических и химических явлений. Поэтому при практическом рассмотрении горения индивидуальных частиц как базового принципа пылеугольного факела, приходится схематизировать процессы. Для качественной оценки отдельных стадий и процесса в целом их существенно упрощают.

Имеется много литературных данных по экспериментальному исследованию отдельных стадий горения угольной частицы, которые пригодны чаще всего к использованию определенного вида угля и при определенных условиях: скорости нагрева, размера частиц и температурного уровня процесса.

Время выхода летучих коррелирует с временем прогрева частицы, которое достаточно просто рассчитывается [7]. Однако имеется большое количество экспериментов подтверждающих, что горение летучих захватывает значительную часть времени горения коксового остатка. Горение коксового остатка, в свою очередь, определяется целым рядом факторов: зольностью угля, реакционной способностью полукокса, пористостью частицы, аэродинамической обстановкой в камере сгорания, уровнем температур.

Основные химические реакции горения углеродного остатка представляются в виде:



В целом, согласно диффузионно-кинетической теории горения угля [9] суммарная скорость гетерогенной реакции

$$q = K^1 C_\omega = \frac{K C_0}{1 + K/\beta} = \frac{C_0}{1/K + 1/\beta}, \quad (4)$$

где сопротивление переходу вещества из окружающей среды к реагирующей частице

$$\frac{1}{K^1} = \frac{1}{K} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{K} + \frac{d}{NuD}, \quad (5)$$

то есть состоит из химического $1/K$ и диффузионного d/NuD сопротивлений. Здесь величина K^1 - суммарная константа скорости химической реакции, β - коэффициент массоотдачи, K - константа скорости реакции, C_0 и C_ω - концентрации окислителя в объеме и на поверхности, D - коэффициент диффузии окислителя в газе, ($Nu = Bd/D \approx 2$) - число Нуссельта. Константа скорости реакции обычно определяется по соотношению Аррениуса $K = K_0 \exp(-E/RT)$, где E - энергия активации, T - температура, R - газовая постоянная, K_0 - предэкспоненциальный множитель.

Из выражения (4) следует, что в случае горения при высоких температурах, основное сопротивление в процессе - диффузия d/NuD , при малых размерах частиц или низких температурах основное сопротивление - химическое. Поэтому выделяется два предельных режима процесса горения: диффузионный и кинетический. В реальном процессе воспламенения и горения частиц в пылеугольном факеле в топке котла, где реализуются переменная температура частиц топлива при их движении в потоке, полифракционный размер частиц (на стадиях выделения и горения летучих и догорания коксового остатка) возможно изменение режима горения от внешнего кинетического до внешнего переходного и внешне- и внутреннедиффузионного. Детальное экспериментальное исследование всех стадий процесса горения полидисперсных частиц представляется достаточно сложной задачей. Однако даже упрощенный анализ соотношений (4) и (5) позволяет сделать очевидные выводы: для увеличения скорости сгорания частиц угля следует повышать температуру процесса и уменьшать диффузионное сопротивление. Повышение температуры сопряжено с рядом тех-

нологических и экологических проблем, связанных с материаловедением, плавкостью золы, образованием окислов азота и т.д. Поэтому в реальных топочных устройствах максимальная температура в объеме не превышает 1500-1700 °С.

Уменьшение диффузионного сопротивления за счет улучшения смесеобразования для мелкодисперсных частицах топлива не всегда эффективно, поскольку мелкие частицы при реализуемых в камерах сгорания частотах турбулентных пульсаций потока практически полностью увлекаются газом и увеличение числа Нуссельта $Nu > 3$ связано со сложными технологическими мероприятиями: созданием режимов вибрационного трения, наложением вынужденных колебаний и т.д.

Более перспективным является путь механоактивации при ультратонком помоле топлива. В этом случае возможно увеличение интенсивности переноса в несколько раз за счёт увеличения реакционной поверхности и снижения энергии активации топлива.

Измельчение до 10-30 мкм и особенно до 5-10 мкм представляет собой сложную технологическую задачу. Для достижения подобной крупности в традиционных шаровых мельницах в несколько раз увеличивается время диспергирования.

Следовательно, необходимо увеличить энергозатраты на измельчение, поэтому используются измельчители с повышенной энергией механического воздействия на угольные частицы - вибрационные, центробежные и планетарные мельницы, дезинтеграторы, в них проявляется не только диспергирующий, но и активирующий эффект.

Сущность механического активирования состоит в создании некомпенсированных связей, радикалов, подвижных активных центров и определенной ориентации деструкционных молекул угольного вещества. Наряду с увеличением поверхностной энергии это вносит свой вклад в изменение энергии активации. Последняя вычисляется по данным дифференциально-термического анализа с помощью специальных компьютерных программ.

Определение «истинной» энергии активации и предэкспонента в уравнении Аррениуса сопряжено со значительными трудностями, связанными с проведением изотермического эксперимента в чисто кинетическом режиме с четкой поверхностью реагирования.

Однако полученные нами данные позволяют достаточно определенно оценить влияние механоактивационного измельчения на кинетические характеристики процессов вос-

пламенения и горения. Нами установлено, что если снижение зольности на 10 % уменьшает энергию активации с 200 кДж/моль до 140 кДж/моль, то в результате активационного измельчения эта величина падает до 60 кДж/моль. Снижение энергии активации повышает реакционную способность топлива. Вид механического воздействия при измельчении определенным образом влияет на структурные и физико-химические свойства.

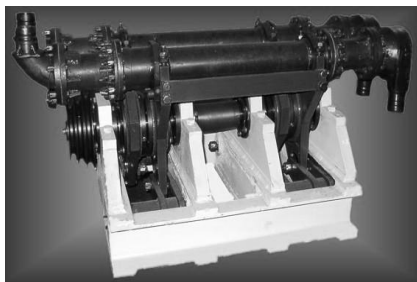


Рисунок 1 - Виброцентробежная мельница ВЦМ 30-ГЮ производительностью до 100 кг/час

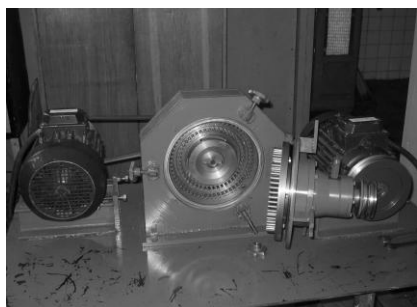


Рисунок 2 - Мельница дезинтеграторного типа, производительностью до 150 кг/час

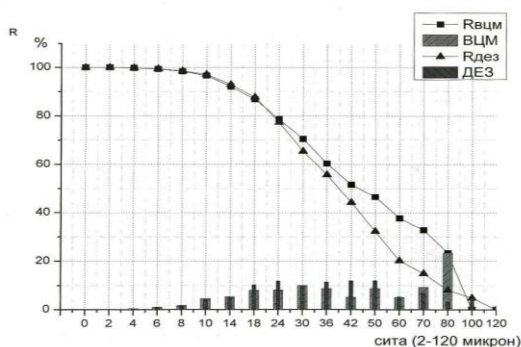


Рисунок 3 - Спектр размеров частиц бурого угля марки Б-2. ВЦМ – остаток на сите после помола на мельнице дезинтеграторного типа

При использовании шаровых виброцентробежных и планетарных мельниц имеет место преимущественно объемная активация частиц угля, а дезинтеграторная обработка приводит к сдвиговой деформации и актива-

ции поверхностных слоев. Именно последний способ оказался наиболее эффективным.

На рисунке 1 приведена шаровая виброцентробежная мельница, а на рисунке 2 дископальцевый измельчитель дезинтеграторного типа. Характеристики помола одного и того же угля представлены на рисунки 3. Видно, что средние размер и поверхность реагирования частиц примерно одинаковы. Различие в скоростях воспламенения и горения пылеугольного факела может определяться только степенью механоактивации.

На рисунках 4-7 приведены результаты экспериментов по воспламенению и горению пылеугольного факела из углей микропомола на ВЦМ и стенде-дезинтеграторе.

На рисунках 4 и 6 сравниваются автотермические показания термодпары, установленной в предтопке перед подачей вторичного воздуха, который служит для догорания частично газифицированного топлива. Видно, что процесс воспламенения и горения пылеугольного факела на основе углей дезинтеграторного помола реализуется с гораздо более высокой скоростью и более коротким временем выхода процесса на автотермический режим (до температуры 800⁰С) с оптическими характеристиками факела, качественно близкими к газомазутному.

При активационном измельчении значительно возрастают количество частиц и поверхность реагирования, интенсивность теплообмена (обратно пропорционально диаметру частиц) и в целом при горении в диффузионном режиме, характерным для факельного сжигания в пылеугольных топках, возможно, более чем 3-х кратное ускорение процесса сжигания. В этом случае пылеугольный факел по своим размерам, теплонапряженности и интенсивности выгорания приближается к газовому или мазутному.

Это открывает широкие возможности интенсификации пылеугольного сжигания с возможностями создания компактных высокофорсированных устройств по сжиганию и газификации углей различной стадии метаморфизма.

В мировой энергетической практике уже реализуется направления использования угля микропомола - замещение мазута в промышленных котлах и замена слоевого сжигания на факел с углем микропомола.

В результате испытаний за рубежом, выявлены основные преимущества котла при работе на угле микропомола по сравнению со слоевым сжиганием угля:

- 15% снижение эксплуатационных расходов;

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ МИКРОПОМОЛА В ЭНЕРГЕТИКЕ

- за счёт снижения избытка воздуха с 1,35 до 1,15-1,2 выше тепловая эффективность установки из-за уменьшения количества выбрасываемого с уходящими газами тепла;
- топки с цепной решёткой требуют использования определенного фракционного состава углей для уменьшения провала через решётку и уноса (дополнительные затраты на фракционирование 5-10 долл. на тонну угля);
- уголь микропомола можно сжигать в газомазутных котлах с большим порядком на 20 % временем непрерывной работы;
- использование золы (мелкий порошок) много проще, чем шлака из-под цепной решетки;
- снижение выбросов NO_x приблизительно на 25% по сравнению со слоевым сжиганием;
- возможность снижения SO_2 за счёт добавления в факел известняка микропомола.

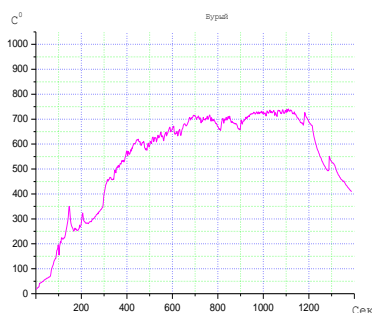


Рисунок 4 - Температурная динамика горения бурого угля после помола на виброцентриробежной мельнице с выходом на автотермический режим горения

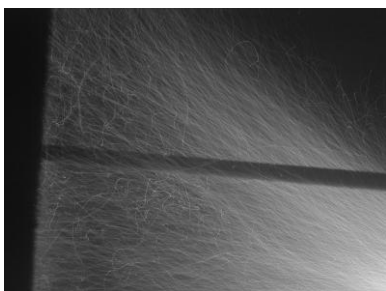


Рисунок 5 - Факельное горение бурого угля после помола на виброцентриробежной мельнице

Замещение мазута микроуглём в газомазутных котлах позволяет за короткий период ~ в течение 2 лет окупить за счёт разницы стоимости газа и мазута затраты на дополнительное оборудование и значительно удешевить стоимость вырабатываемой тепловой энергии. В «большой» энергетике - замещение газа и мазута в системах поджига и ста-

билизации горения пылеугольного факела. Испытания, проведённые на котле мощностью 600 МВт, показали, что система работает удовлетворительно и срок окупается менее чем 4 года.

Получены также положительные результаты при испытании технологии «ребёнка» - подавления окислов азота в пылеугольных котлах с подачей микроугля вместо газа или мазута в котёл выше основных горелок по ходу газа в зону восстановления NO_x с избытком воздуха $\alpha = 0,2-0,4$.

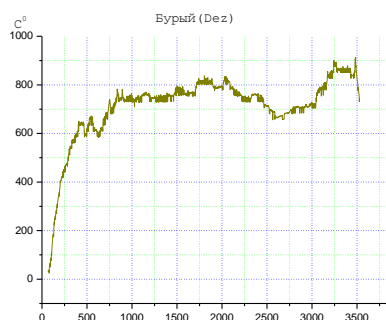


Рисунок 6 - Температурная динамика горения бурого угля после помола на мельнице дезинтеграторного типа с выходом на автотермический режим горения



Рисунок 7 - Факельное горение бурого угля после помола на мельнице дезинтеграторного типа

В России подобные работы ведутся только в институте теплофизики СО РАН в Новосибирске. На созданном укрупнённом стенде тепловой мощностью до 1 МВт проведены опыты по сжиганию углей различной стадии метаморфизма в условиях механоактивации (от антрацитов с $V_{летучих}=4-6\%$ до каменных - газовых, длиннопламенных и бурых с $V_{летучих}$ до 50%). Разработаны новые типы мельниц, позволяющих получать уголь с размером частиц 15-30 мкм при энергозатратах на помол, соизмеримых со стандартными в пылеугольных котлах системами - шаровые барабанные мельницы и др. (~25 квт.ч/т. уг-

ля). При исследовании микропомола на мельницах различного типа определены оптимальные условия помола с максимальной механоактивацией угля, определяемой по энергии активации применительно к воспламенению и горению механоактивированного угля, которая может отличаться в зависимости от системы помола до 3-х раз. Это в известной мере определяет размеры и конструкции горелочного и топочного устройств. На основании исследований воспламенения и горения углей микропомола с различными реакционными свойствами на укрупнённом стенде получены исходные данные для создания горелочных устройств и предтопок для объектов «малой» и «большой» энергетики.

Для приготовления пыли ультратонкого помола с размером частиц $\delta_{cp} \approx 2,5-35$ мкм были испытаны два типа полупромышленных мельниц, позволяющих производить помол с приемлемыми технико-экономическими показателями - удельными расходами электроэнергии в пределах 15÷30 квт.ч/т угля. Первый тип - виброцентробежная мельница ВЦМ 30-Г непрерывного типа, предназначенная для измельчения и активации различных материалов, рассчитанная на эксплуатацию в закрытых помещениях при температуре окружающей среды от 15 до 35⁰С и относительной влажности от 45 до 80%.

В принципе мельницы такого типа вполне пригодны для получения пыли микропомола, однако для испытаний системы на котле БКЗ-210 Барнаульской ТЭЦ-2 был рассмотрен альтернативный вариант помольного устройства с меньшими динамическими нагрузками на обмуровку котла и перекрытий на отметке, где расположены горелочные устройства для растопки и стабилизации горения пылеугольного факела. Для этого были спроектированы и изготовлены 2 образца мельниц дезинтеграторного типа на производительность 150 кг/час ДМ-0,2 для испытаний на укрупнённом горячем стенде и промышленной производительности ~ 2 т/час для котла БКЗ-210.

В результате опытов по сжиганию углей различных стадий метаморфизма, механоактивированных при помоле на виброцентробежной мельнице и дезинтеграторе на укрупнённом стенде было установлено, что при почти не отличающемся спектре размеров частиц скорость выгорания частиц в факеле после мельницы дезинтеграторного типа существенно выше.

ВЫВОДЫ

Уголь на ближайшую перспективу остается основным энергетическим топливом в России.

Рассмотрены преимущества двух направлений облагораживания углей как энергетического топлива - глубокая деминерализация и активационное измельчение.

Показано, что как отдельное использование данных процессов, так и их последовательное сочетание открывают большие перспективы в повышении качества и энергосодержания, а также снижении энергии активации при использовании углей в энергетике.

Предложены новые технологии использования углей микропомола для замещения газа и мазута при розжиге и стабилизации горения пылеугольного факела в энергетических котлах, а также в объектах промэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы развития российской энергетики. Материалы научной сессии Президиума СО РАН. Новосибирск, 2005, 255 с.
2. Рубинштейн Ю.Б., Дебердеев И.Х., Самойлова Е.К. Прогрессивные технологии обогащения и переработки тонкодисперсных углей. Горный вестник, 1998, № 2, с. 52-60.
3. Линева Б.И., Дебердеев И.Х., Давыдов М.В. Современное состояние и основные направления развития техники и технологии глубокого обогащения угля. Горный журнал, 2007, № 2, с. 23-29.
4. Бунин Г.М. К проблеме рационального использования углей для энергетики. Теплоэнергетика, 1988, №6, с. 46-49.
5. Юсупов Т.С., Шумская Л.Г., Бурдуков А.П. Пути повышения экологической и экономической эффективности угольной промышленности. Труды I Сибирского Конгресса по экологии. МАНЭБ, Омск, 2007, с. 99-103.
6. Рубан В.А. Современное состояние процессов обогащения углей. Химия твердого топлива, 2005, № 1, с. 101 -106.
7. Резняков А.Б. и др. Горение натурального твердого топлива, Алма-Ата: Изд-во «Наука» Казахской ССР, 1968.
8. Попов В.И. Диффузионно-релаксационная модель факельного горения топлива // Химия твердого топлива.- 2007.-№4. – С. 39-49.
9. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива.- М.: Изд-во АН СССР, 1958.

Бурдуков А.П., д.т.н., проф.,

Попов В.И.,

Фалеев В.А.,

Юсупов Т.С.,

*Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН, Новосибирск,
тел. (8383)3165544*