

УДК 662.741.3.022.067.5

ВЛАЖНОСТЬ УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ – БЛАГО ИЛИ ЗЛО ДЛЯ КОКСОВОГО ПРОИЗВОДСТВА?

© Дас С. К.^{1*}, Нанди А. С.², Паул А.², Саху Б. К.¹, Чакраборти Б.¹, Дас А.¹¹ Центр исследований и разработок в черной металлургии, компания Steel Authority of India Ltd (SAIL), г. Бокаро Стил Сити, штат Джхаркханд 827001. Индия² Металлургический завод Бокаро, компания Steel Authority of India Ltd (SAIL), г. Бокаро Стил Сити, штат Джхаркханд 827001. Индия

* Сурджит Кумар Дас, Room No. 6, R & C Lab. Building, Bokaro Steel Plant, Bokaro Steel City, Jharkhand-827001. India; e-mail: skdasju@gmail.com/ skdasju@sail-rcdis.com

Традиционный завод по производству кокса с улавливанием химических продуктов коксования обязан производить необходимое количество кокса удовлетворительного качества и соответствующий объем газа с высокой теплотворной способностью для металлургического завода с полным производственным циклом. Влажность – одно из свойств, влияющих на погрузочно-транспортные операции с углем и воздействующих на эффективность работы предприятия. По сравнению с другими важными характеристиками угольной шихты влажность легко поддается регулированию. Ее легко повысить путем орошения водой, а также можно снизить до 5–6 % (мас.) в рамках системы предварительной подсушки шихты (СМС) и до 2–4 % (мас.) – в системе предварительного уплотнения с сухой сепарацией и окускованием шихты (DAPS).

Влагосодержание – одна из многих переменных, которые влияют на насыпную плотность угольной шихты, определяют качество кокса и выход готового продукта. Повышение влажности способствует ухудшению измельчаемости угля, снижению давления расpiration при коксовании и внутреннего газового давления, подавлению выброса пыли при загрузке печей и тем самым – уменьшению закупорки стояков и газосборника. На коксовых батареях с загрузкой углей высокой влажности не создает затруднений отложение углерода на своде печных камер.

На металлургическом заводе компании SAIL в Бокаро отметили, что при повышении влажности угольной шихты сверх 8,5 % повышалась теплотворная способность коксового газа. При рабочем диапазоне влажности 9–11 % повышение влажности на 1 % сопровождалось повышением выхода коксового газа на 5,2 м³. Однако исследования показали, что повышение влажности шихты > 8 % отрицательно влияет на прочность кокса. Процесс коксования термически подготовленной шихты позволяет, как правило, повысить долю фракции 40–80 мм в коксе по сравнению с коксованием влажной шихты.

В условиях завода компании SAIL в Бокаро снижение влажности угольной шихты на 1 % требует затрат тепла 125 Мкал на печь. При более низкой влажности уменьшается и выброс NO_x в окружающую атмосферу. При снижении влажности шихты сушкой увеличивается вспучивание коксовой массы, что приводит к тугому ходу при выдаче из печей.

Ключевые слова: влажность угольной шихты; насыпная плотность; отложение графита на своде; коксовый газ; качество кокса; ровный ход печи.

Кокс – один из наиболее важных и дорогостоящих видов сырья, используемого при выплавке чугуна в доменных печах. Для обеспечения стабильной и высокопроизводительной работы доменной печи при низких затратах важно, чтобы коксохимическое производство располагало возможностью ритмично снабжать доменный цех достаточным количеством кокса стабильного качества при низкой себестоимости.

Показатели качества кокса определяются его химическими свойствами (зола, влага, летучие компоненты, связанный углерод), пористостью, свойствами в холодном состоянии (прочность по Микум-барабану – M_{10} и M_{40}), свойствами при высоких температурах (прочность кокса после взаимодействия с углекислым газом, показатель ре-

акционной способности). Типичные показатели качества кокса на заводе компании SAIL в Бокаро приведены в табл. 1.

Эти показатели качества зависят от химических свойств (зола, летучие, влага и связанный углерод), реологических свойств (индекс свободного вспучивания FSI , спекаемость по Грей – Кингу LTGK, текучесть) и параметров, определяемых стадией метаморфизма (произвольный показатель отражения R_o , средний максимальный коэффициент отражения MMR, содержание витринита и др.) углей в шихте, а также от степени износа коксовых батарей, исполнительской дисциплины персонала и режима нагрева.

Для простоты восприятия угольные шихты классифицированы по влажности, как показано в

Т а б л и ц а 1. Типичные показатели качества кокса на заводе компании SAIL в Бокаро

Показатели, %	1	2	3	4	5	6
Влажность	4,85	4,83	5,07	5,01	4,84	4,82
Выход летучих веществ	0,76	0,75	0,75	0,76	0,77	0,77
Зольность	16,59	16,63	16,60	16,32	15,27	15,53
Прочность по M_{10}	10,28	10,29	10,19	10,32	10,31	9,74
Прочность по M_{40}	77,58	77,45	77,99	77,95	76,70	77,45
Прочность CSR после взаимодействия с CO_2	65,60	65,26	65,63	63,33	64,00	65,26
Реакционная способность CRI	21,64	21,78	21,80	23,11	22,54	22,23
Пористость	46,09	46,10	45,96	46,14	46,18	46,15
Доля класса > 80 мм в доменном коксе	13,15	13,46	12,89	12,75	11,05	11,19
Доля класса < 25 мм в доменном коксе	4,54	4,73	4,56	4,37	4,66	4,64

табл. 2. Свойства угольной шихты на заводе компании SAIL в Бокаро представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 2. Классификация угольных шихт по показателю влажности

Диапазон влажности, %	Характеристика	Способ достижения
< 2	Сухая	Система предварительного уплотнения с сухой сепарацией и окускованием (DAPS)
2–6	Низкой влажности	Система регулирования влажности (СМС)
6–9	Средней влажности	Обычная влажность поступающих углей (кроме дождливого сезона)
> 9	Высокой влажности	Увлажнение

Влажность – фактор, влияющий на транспортировку угля и вместе с тем на режим и эффективность работы оборудования. Между тем влажность угольной шихты – одно из наиболее важных свойств, которому уделяют относительно мало внимания. В этой статье обсуждают

роль влаги в производстве высококачественного кокса и устойчивой работе коксовой батареи. Сравнительно с другими свойствами угольных шихт влажность легко поддается регулированию. Влажность шихты можно достаточно легко повысить при реализации весьма простой системы. Для снижения влажности шихты также разработаны системы (СМС, DAPS), которые применяются на многих предприятиях.

Различные виды влаги в угле

Во-первых, уточним определение влаги в угольной шихте. Влага в угле характеризуется методом ее определения. Ниже перечислены различные методы [1].

1. *Связанная/пластовая/гигроскопическая влага/влажность угля/влага аналитической пробы угля.* Это влага, которая содержится в порах и капиллярах угля. Содержание связанной влаги тем меньше, чем выше стадия метаморфизма угля.

2. *Поверхностная/внешняя влага угля.* Это влага, которая удерживается на поверхности угля.

Т а б л и ц а 3. Типичные свойства угольной шихты на заводе компании SAIL в Бокаро

Показатели	1	2	3	4	5	6
Влажность в рабочем состоянии, %	8,49	8,5	8,6	8,60	8,6	8,49
Выход летучих веществ, %	23,13	23,19	23,26	23,10	23,40	23,34
Зольность, %	12,68	12,70	12,65	12,34	11,54	11,78
Индекс измельчаемости (< 3,2 мм), %	82,41	82,39	82,36	82,93	82,57	82,62
Доля классов < 0,5 мм в шихте, %	43,43	43,09	43,32	43,27	43,52	43,56
Импортный уголь (всего), %	74,28	75,67	79,86	78,00	77,00	76,67
Индекс свободного вспучивания FSI	5,0–6,5	5–7	5,0–6,5	6,0–6,5	5,5–6,0	5,5–6,0
Спекаемость по Грей–Кингу LTGK	G3–G3	G3–G4	G3–G4	G3–G4	G3–G4	G2–G3
Максимальная текучесть, дел. шкалы/мин	550	466	305	318	246	332

3. *Влага воздушно-сухого угля.* Это потеря массы пробы угля в результате частичного высушивания.

4. *Остаточная влага угля.* Это влага, которая остается в пробе после определения влаги воздушно-сухого состояния.

5. *Общая влага/влага в состоянии поставки.* Это потеря массы пробы угля в условиях строгого контроля температуры, времени и вентиляции. Это сумма связанной и внешней влаги, а также влаги воздушно-сухого состояния. Если рассчитать потерю в процентах массы для пробы 1 г угля крупностью 200 мкм при нагреве в мерной чашке в сушильном шкафу при 108 ± 20 °С до стабилизации массы, то получим общую влагу этого угля.

6. *Влага в рабочем состоянии.* Так обозначают потерю в процентах массы 200-г пробы угля (классов < 3,2 мм для смеси углей или < 12,5 мм для отдельных углей) при нагреве в сушильном шкафу с температурой 108 ± 20 °С в течение не менее 1 ч до стабилизации массы.

7. *Влага разложения.* Это влага, которая образуется при термическом разложении органических компонентов угля.

8. *Гидратная влага.* Это вода, которая присутствует в кристаллической решетке глины и неорганических веществ в угле.

Системы регулирования влажности угольной шихты

Поддерживать влажность вещества в угольной шихте на уровне, соответствующем категории шихты средней или высокой влажности, относительно несложно. Во многих случаях это обеспечивается при разных уровнях влажности отдельных исходных углей. Иногда, особенно в летний сезон, добавляют воду через гибкие шланги или распылительные форсунки, повышая уровень влажности угольной смеси.

Для поддержания влажности на уровне, соответствующем категории сухой шихты или шихты низкой влажности, разработаны и внедрены в существующее производство специальные системы. Такие системы действуют на многих предприятиях. Ниже описан процесс в системах, предназначенных для снижения влажности угольной шихты.

1. Регулирование влажности угля (СМС)

Разработка способов регулирования влажности угля с использованием средне- и низкотемпературных носителей отходящего тепла (т. е. теплосодержания коксового газа и газообразных

продуктов сжигания из системы обогрева печей) привлекла внимание специалистов коксовой отрасли после 1975 г. Оборудование первого промышленного образца системы СМС с использованием отходящего тепла введено в эксплуатацию на коксовых батареях № 1 и 2 на заводе Оита в Японии в сентябре 1983 г. [2]; оно безотказно работало, обеспечило значительную экономию энергии и способствовало повышению качества кокса и производительности печей.

Вся масса угля после смешивания и измельчения подвергается нагреву в непрерывном режиме в системе с автоматическим управлением. Физическое тепло дымовых газов в системе обогрева коксовых печей и газообразных продуктов коксования, протекающих соответственно через дымоходы и стояки печей, отбирают и утилизируют в сушилке для подсушивания угля. Теплоноситель, обеспечивающий теплообмен, непрерывно циркулирует в системе. Этим процессом можно снизить влажность исходного угля (7–11 %) до стабильного уровня 5 %.

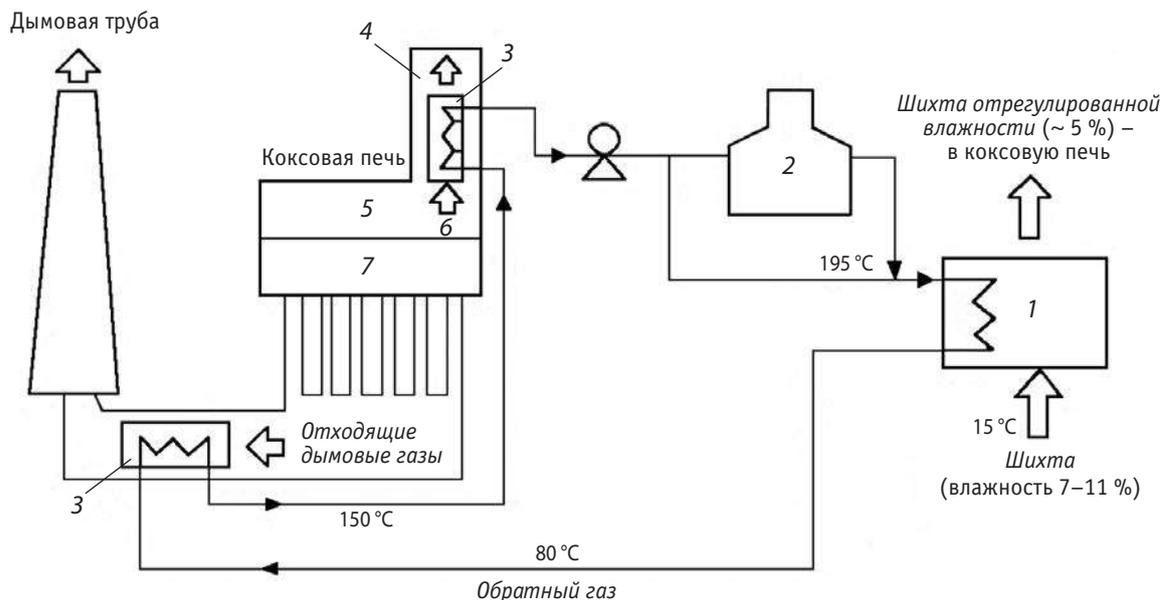
Описание оборудования системы СМС. Основные характеристики оборудования системы приведены в табл. 4. Технологическая схема показана на рис. 1. Оборудование системы СМС имеет следующие отличительные особенности [3]:

– с учетом фактора выделения пыли и ее уноса, а также количества утилизируемого тепла решили ограничить влажность на уровне 5 % и из этого условия проектировали оборудование;

– теплосодержание дымовых газов системы обогрева и коксового газа отбирается с применением теплоносителя (алкилдицил) сначала в дымоходах, а затем в стояке печи. Размещены два теплообменника в боровых для дымовых газов и 78 теплообменников в стояках печей; они дают

Т а б л и ц а 4. Основное оборудование системы СМС

Наименование	Характеристика	Число
Сушилка	Барабанная сушилка непрямого нагрева	1
Тепловой агрегат (печь)	$3,95 \cdot 10^6$ ккал/ч	1
Теплоноситель:		
дымовые газы коксовых батарей	280–350 °С	
коксовый газ	~ 4000 м ³	
Конвейер для угля	1200 т/ч	4
	290 т/ч	1
Пылеуловитель с рукавными фильтрами	1165 м ³ /мин	1



Р и с. 1. Технологическая схема процесса СМС регулирования влажности угольной шихты:

1 – сушилка; 2 – печь; 3 – теплообменник; 4 – стояк; 5 – камера коксования; 6 – коксовый газ; 7 – регенератор

теплоноситель для снижения влажности шихты с 9 до 5 % при пропускной способности по шихте 240 т/ч. Количество тепла сбалансировано таким образом, что сушка возможна на одном только утилизируемом тепле;

- тепло утилизируется в сушилке для угля, где подсушивается вся масса загружаемой в печи шихты после смешивания углей и дробления. Теплоноситель циркулирует в замкнутом контуре;

- высокоточный датчик влажности, включенный в контуры управления с прямой и с обратной связью, обеспечивает регулирование и поддержание постоянной влажности. В системе имеется одна нагревательная печь для подвода тепла в теплоноситель, чтобы удовлетворить дополнительную потребность в тепле, когда влажность угля повышается в период дождей;

- в систему включен холодильник, который служит для отвода тепла, отобранного на коксовой батарее, в период остановки сушилки. Теплообменники в стояках снабжены рубашкой водяного охлаждения, чтобы предотвратить чрезмерное повышение температуры теплоносителя в случае выхода из строя насоса в контуре циркуляции теплоносителя.

Результатом применения технологии СМС стало повышение производительности (на ~ 11 %) в результате повышения плотности загрузки и сокращения периода коксования, снижение потребления тепла (23–26 Мкал/т сухого угля на каждый 1 % снижения влажности), уменьшение выхода коксовой мелочи (> 2,0 %) и некоторое уменьшение выноса пыли.

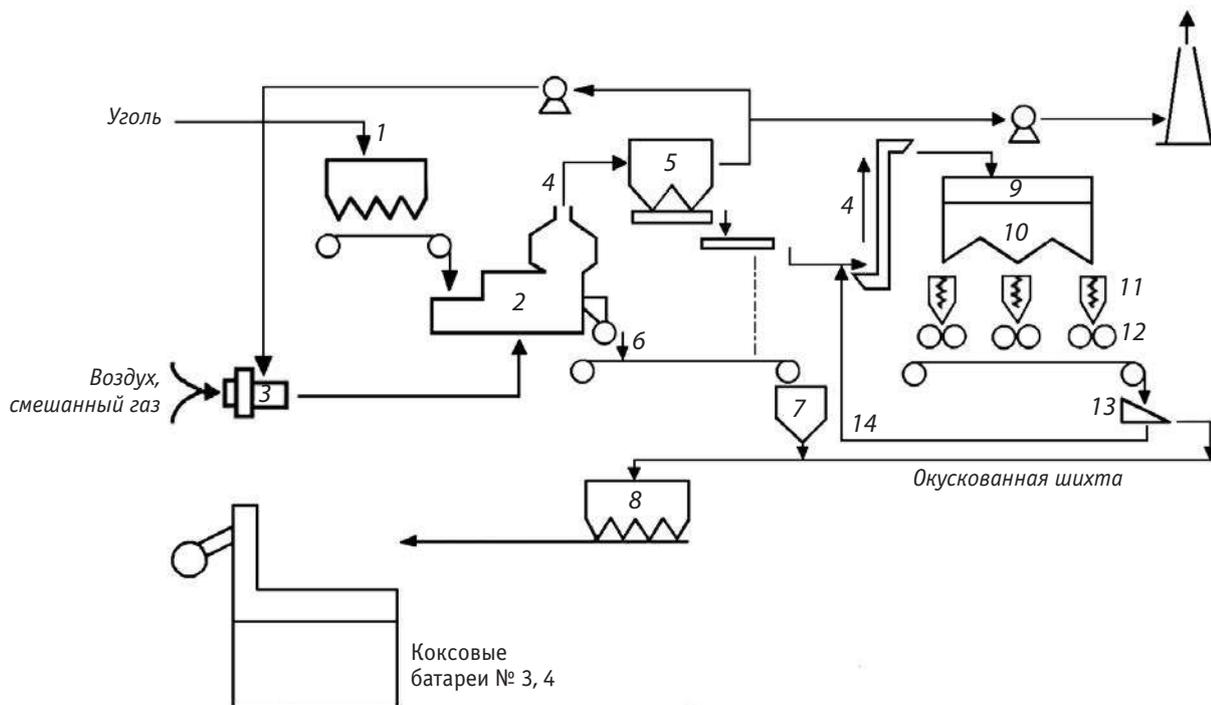
2. Система предварительного уплотнения с сухой сепарацией и окускованием (DAPS)

Снижение влажности шихты ниже 5 % затруднено, так как чем ниже влажность, тем больше выделение пыли. Это обусловлено разрушением квазичастиц, которые состоят из крупной частицы и связанных с ней поверхностной влагой налипших на ее поверхность пылевидных частиц угля, которые при высушивании отделяются. Разрушение квазичастиц происходит при снижении влажности угля до уровня 2 %, когда поверхностная влага почти полностью исчезает. На этом основании заключили, что при снижении влажности угля до 2 % пылевидный уголь может отделяться от шихты.

Однако с системой СМС нижний предел влажности угольной шихты находился около 5 %, и на фирме Nippon Steel, Япония, продолжали разработку системы подготовки подсушенной частично брикетированной шихты (DAPS), стремясь, насколько возможно, снизить влажность загружаемой шихты. В этой системе реализован процесс, который включает в себя отделение угольной мелочи, служащей источником пыли, от массы подсушенной шихты и окускование мелочи.

Оборудование этой системы сооружено на коксовых батареях № 3 и 4 завода Оита и выведено на проектную мощность в сентябре 1992 г. [4]. Со времени ввода в эксплуатацию оно действует безотказно.

Технологическая схема системы DAPS. Схема процесса DAPS показана на рис. 2. На Nippon



Р и с. 2. Технологическая схема системы DAPS на заводе фирмы Nippon Steel:

1 – бункеры для коксующегося угля; 2 – сухой классификатор; 3 – нагреватель для получения горячего воздуха; 4 – пылевидный уголь; 5 – пылеуловитель с рукавными фильтрами; 6 – крупные классы угля; 7 – бункеры для крупных классов угля; 8 – угольные бункеры системы DAPS; 9 – распределительные бункеры; 10 – бункер для окускования; 11 – винтовой питатель; 12 – устройство окускования; 13 – грохот; 14 – линия возврата

Steel разработали полномасштабную (производительность 280 т/ч) агрегатную установку сушки и классификации угля:

- для сушки и классификации угля используют сушилку с псевдооживленным слоем. Разработана система, в которой мелкий уголь, механически сцепленный с крупными частицами, удаляется («отмывается») в псевдооживленном слое;

- за секцией с псевдооживленным слоем находится секция классификации, где коксующийся уголь разделяется на мелкие и крупные классы;

- отсортированный мелкий уголь собирается в пылесборнике и направляется в валковый пресс, где подвергается брикетированию. Для брикетирования этой фракции настроили следующие параметры процесса: предельное давление прессования 2000 кг/см² (200 МПа), максимальный размер частиц мелкого угля 0,3 мм;

- брикетированный мелкий уголь смешивается с крупными классами и направляется на коксовую батарею как шихта DAPS для коксования.

Считают, что качество кокса повышается системой DAPS в результате повышения плотности загрузки, что обусловлено пониженной влажностью шихты и повышенной дилатацией благодаря окускованию мелких классов угля.

Влияние влажности угля

Оптимальное распределение влаги необходимо для обеспечения качества кокса, для решения задач снижения расхода топлива, продления срока службы коксовой батареи и уменьшения загрязнения среды. В коксовом производстве влияние влажности угольной шихты, где речь идет главным образом о влажности в рабочем состоянии, можно укрупненно отнести к трем категориям.

А. Характеристики/качество угольной шихты:

- насыпная плотность угольной загрузки;
- измельчаемость угольной загрузки.

В. Рабочие параметры коксовой печи:

- условия погрузочно-транспортных операций;
- отложение графита на своде камеры;
- условия образования коксового газа;
- характеристики газа в объеме загрузки/давление распираия;
- теплотворная способность коксового газа;
- расход тепла.

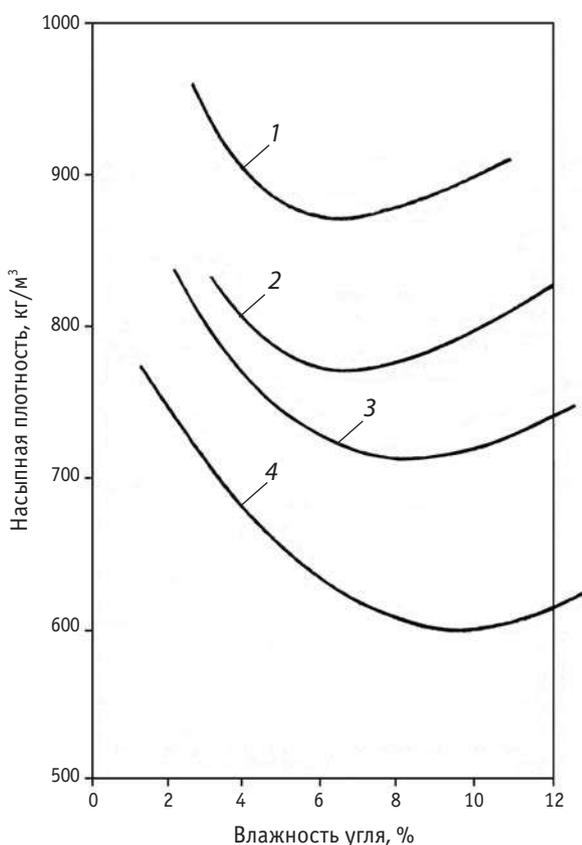
С. Характеристики кокса:

- крупность кокса;
- прочность кокса;
- усадка кокса;
- себестоимость кокса.

1. Насыпная плотность угольной загрузки.

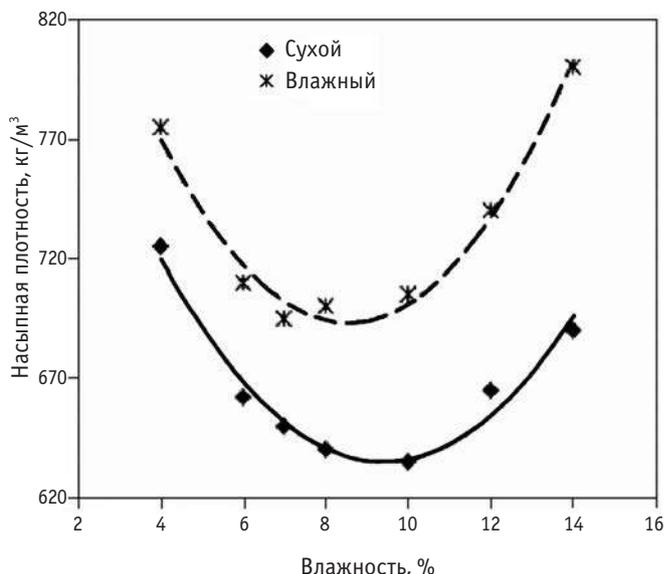
Насыпная плотность измельченного угля и ее разброс могут сильно повлиять на производительность коксовой печи и качество кокса. Влажность – один из наиболее важных параметров среди многочисленных переменных, влияющих на насыпную плотность угольной шихты и определяющих качество и выход готового кокса. Насыпная плотность достигает максимума у сухого угля и снижается до минимума [5] в зависимости от крупности при влажности в интервале 6–10 %, а затем вновь повышается с дальнейшим повышением влажности (рис. 3). График насыпной плотности, определяемой в мерной емкости, показан на рис. 4 [4].

В среднем насыпная плотность угольной шихты на сухую массу при загрузке печей насыпью составляет 700–780 кг/м³, а при загрузке трамбованной шихты – 900–1000 кг/м³. При равномерной плотности шихты, загруженной в печи, получают кокс равномерной прочности. Для этого шихта должна иметь одинаковую по объему влажность; для сглаживания разброса и достижения однородности в шихту также добавляют масло. Через



Р и с. 3. Влияние влажности и крупности угля на насыпную плотность:

1 – дробленый неподготовленный уголь, класс ≤ 35 мм; 2 – коксующийся уголь, класс ≤ 20 мм; 3 – угольная мелочь, класс ≤ 10 мм; 4 – угольная мелочь, класс ≤ 3 мм



Р и с. 4. Влияние влажности на насыпную плотность угля

повышение насыпной плотности шихты добавкой воды достигают повышения производительности по углю и более легкого хода при выдаче кокса благодаря меньшему вспучиванию угольной загрузки, но при этом увеличивается время коксования и расход тепла на получение готового кокса.

Плотность загрузки влажного угля всегда ниже, чем сухого. При любом размере частиц шихты, загруженной в печь, масса загрузки снижается при повышении влажности до 8–9 %, а при более высокой вновь повышается. Следовательно, необходимо поддерживать влажность шихты на таком уровне, который способствовал бы оптимизации всех связанных с ней параметров.

2. Измельчаемость угольной загрузки. Перед загрузкой в коксовую печь угли, поступающие из разных источников, подлежат смешиванию и измельчению до достижения заданной крупности. Согласно требованиям, установленным для угольных шихт на заводе компании SAIL в Бокаро, 82 % угля составляют классы < 3,2 мм при минимальном образовании пылевидной фракции (< 0,5 мм). Энергозатраты на измельчение зависят от характеристики измельчаемости каждого отдельного угля. Повышение влажности ведет к снижению размолоспособности углей данной стадии метаморфизма [7]. Это, в свою очередь, затрудняет достижение однородности измельчения и снижает текучесть угля. В конечном итоге это приводит к закупорке перегрузочного лотка ленточного конвейера при транспортировке угля от молотковых дробилок к печам.

3. Факторы, связанные с транспортировкой.

Повышение влажности угольной шихты ведет к повышенным тепловым потерям на испарение и на перегрев пара. Влага способствует связыванию мелких частиц силами поверхностного натяжения и уменьшению проходного сечения люков, через которые шихту загружают сверху в коксовую печь.

Влага способствует уменьшению пылевыведения при загрузке и, таким образом, замедляет закупоривание элементов системы газоотвода, в том числе стояков и газосборника. Водяной пар, образующийся в печной камере, также способствует конвективному и лучистому теплообмену. Однако избыточная влага подвергает огнеупорную кладку печи термическому удару.

Запыленность и текучесть угля определяют в первую очередь поверхностной влагой угля. В сухой сезон одним из наиболее эффективных и экономичных способов ограничения пылевыведения служит применение разбрызгивателей (спринклеров), которые увеличивают количество поверхностной влаги во внешнем слое штабеля угля. Эту дополнительную влагу добавляют только на поверхность штабеля и только по мере необходимости. Общая влага угля при этом существенно не изменяется.

В дождливый сезон мелкозернистые угли впитывают влагу и слипаются, усложняя транспортные операции при разгрузке вагоноопрокидывателями. Угли таких типов образуют прочный «пирог», который налипает на стены железнодорожных вагонов, так что его приходится отделять толчками и ударами. Такая масса закупоривает также проходные сечения бункеров и перегрузочных лотков, что увеличивает объем ручных операций.

4. *Отложение графита на своде печи.* Влага угля влияет также на образование графитовых отложений в коксовых печах. Пар, образующийся из рабочей влаги шихты, создает окислительную среду с высокой химической активностью в контакте с раскаленной поверхностью графитовых отложений на стенах. Поэтому отложение графита на своде печи значительно более мощное, чем на стенах.

Однако на батареях с коксовыми печами с **инжекцией газов загрузки**, т. е. загрузки при закрытой крышке стояка, заграфичивание свода создает более сложные проблемы [8], чем на батареях с печами без инъекции. Примечательно, что на печах с загрузкой шихты с высокой влажностью не сталкиваются с трудностями, связанными с отложением графита на своде. Усиленное отложе-

ние графита при низкой влажности загружаемой шихты можно объяснить следующими причинами [9]:

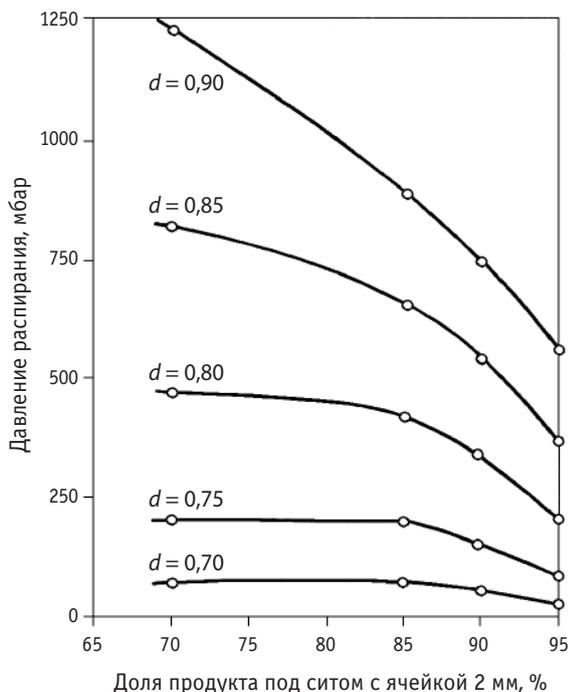
- увеличенный выход газов при коксовании вследствие большей массы угольной загрузки;
- меньший эффект разбавления газов при коксовании парами воды;
- повышенная температура в подсводовом пространстве вследствие более высокой температуры угольной загрузки с низкой влажностью по сравнению с загрузкой влажной шихты.

С другой стороны, согласно предположению Кребса и др. [10], отложение графита в печной камере связано с присутствием угольной мелочи. Так, считают, что вынос мелочи (материала с частицами размером менее < 100 мкм) усиливается вследствие пониженной влажности.

Механизм отложения графита в свободном пространстве печных камер [9] изучали в условиях применения системы СМС на основе измерений в промышленной печи. Средняя влажность шихты при работе системы СМС составляла 6,3 % (мас.), а при загрузке влажной шихты – 9,1 % (мас.). Установили, что масса графитовых отложений при работе системы СМС на 45–75 % больше, чем при коксовании влажной шихты. Основная масса отложений на начальной стадии процесса коксования формировалась из выносимой угольной мелочи. Обнаружили также, что при работе системы СМС графитовые отложения в нижней части стояка состояли приблизительно на 20 % из материала, образованного из выносимой мелочи. Влияние летучих угля на графитовые отложения при работе системы СМС оказалось сильнее, чем при коксовании влажной шихты.

5. *Давление распираания.* Чтобы обеспечить нужное качество получаемого кокса, исходный уголь должен обладать определенной способностью к вспучиванию и усадке. Как отмечали выше, насыпная масса угольной загрузки зависит от влажности и размера частиц. Максимальное давление распираания можно значительно снизить [5] посредством снижения насыпной плотности и более тонким измельчением угля (рис. 5).

При коксовании шихты в печной камере [11] вспучивание расплавленного угля создает на стены камеры нагрузку, которую называют «давлением коксования». Так как чрезмерное давление распираания повышает усилие, необходимое для выталкивания коксового пирога, а в некоторых случаях приводит к эксплуатационным проблемам, таким как тугой ход или «бурение», которое повреждает стены печи, одним из наиболее



Р и с. 5. Давление распираания в функции насыпной плотности и крупности шихты

важных аспектов процесса коксования следует считать контроль и ограничение давления распираания.

Исходя из этого, на Nippon Steel разработали процессы загрузки подсушенной шихты для коксования, такие как СМС и DAPS. При снижении влажности шихты до 5–6 % с использованием системы СМС и до 2–4 % с системой DAPS достигнут эффект снижения расхода тепла на коксование, повышения производительности печей и качества кокса.

Поскольку снижение влажности шихты ведет к повышению насыпной плотности загрузки в печной камере, а это значительно повышает давление распираания, в процессах с загрузкой подсушенной шихты совершенно необходимо с высокой точностью регулировать влажность угля, чтобы избежать повреждения стен коксовых печей.

б. Образование коксового газа. Механизм реакции в газовой фазе, которая протекает в коксовой печи, предложен И. Г. Зубилиным и др. [12]; он предполагает, что в течение первых 2–3 ч коксования графитовый слой на высокотемпературной поверхности огнеупорной кладки и в своей пористой структуре внутри коксовой печи в контакте с паровым окислителем создает термодинамически обусловленную реакционную зону паровой газификации графитового отложения с протеканием реакции по уравнению



Механизм описан как пиролиз высвобождаемого сухого коксового газа в контакте с графитовым отложением в пористом объеме греющих стен печной камеры, с полным сгоранием образующегося водорода в системе нагрева и образованием пара (H_2O). Иными словами, окислительная паровая газификация графитового отложения в пористом объеме стен приводит к образованию водорода и дополнительного монооксида углерода с их последующим сгоранием в системе зажигания и образованием водяного пара и диоксида углерода.

Из этого следует, что с повышением влажности коксуемой шихты увеличивается объем коксового газа (в особенности CO и H_2).

В монографии Кустова устанавливается зависимость между увеличением выхода коксового газа и повышением влажности угольной шихты, подвергаемой коксованию. При коксовании влажных шихт (с рабочей влажностью до 11 %) в условиях промышленного процесса увеличение выхода коксового газа в результате газификации углерода конвертируемой рабочей влажностью шихты с образованием монооксида углерода и водорода составляет $\leq 28 \text{ м}^3/\text{т}$ влажной шихты (т. е. 2,5–2,8 м^3 на каждый 1 % рабочей влажности). В диапазоне рабочей влажности 9–11 % увеличение выхода коксового газа на 1 % рабочей влажности составляет 5,2 м^3 .

При повышении рабочей влажности шихты сверх 11 % увеличение выхода коксового газа прекращается. Автор полагает, что это может быть связано с достижением критической массы влаги в шихте, которая с точки зрения энергопотребления на газификацию сопоставима с количеством тепла, аккумулируемого кирпичной кладкой греющей стены, какое требуется для ее испарения, перегрева и создания эндотермического эффекта реакции конверсии, и со снижением температуры поверхности стены ($< 700 \text{ } ^\circ\text{C}$).

7. Характеристика внутреннего газового давления и давления на стену. Авторы работы [13] исследовали влияние влажности угольной шихты на внутреннее газовое давление. Они провели эксперименты по коксованию отдельных углей разных марок и многокомпонентных шихт на режимах с разными параметрами в опытной печи с подвижной стенкой для изучения давления распираания. Измеряли внутреннее газовое давление и соответствующую температуру угольной загрузки в осевой плоскости камеры коксования. Оценивали также влияние состава шихты, ее влажности и температуры греющей стенки на внутреннее газовое давление.

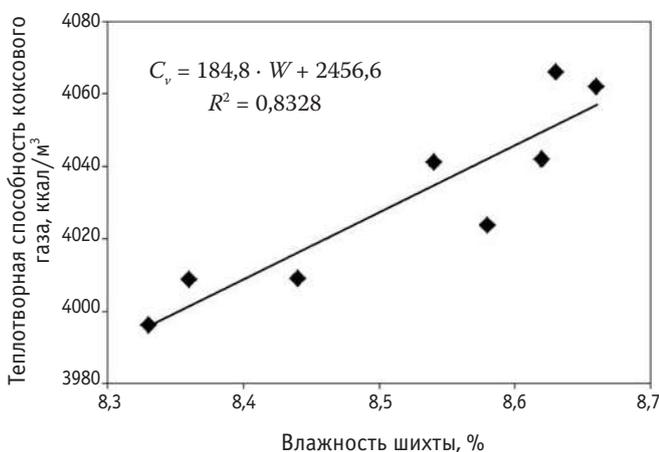
При коксовании отдельных углей наблюдали повышение внутреннего газового давления с повышением коксуемости и снижением выхода летучих веществ. Обнаружили также, что характеристика внутреннего газового давления при коксовании многокомпонентных шихт зависит от долей различных углей в шихте и экспоненциально повышается со снижением влажности. Наконец, она обнаруживает тенденцию к снижению с повышением температуры греющей стенки.

В одном из исследований, проведенных для установления связи между давлением расpirания и влажностью угля, полученные результаты показали, что при загрузке влажного американского угля Беркли греющая стенка под давлением расpirания получала максимальное перемещение 14 мм [14], а при загрузке подогретого угля деформация увеличивалась до 55 мм. В другом исследовании, где оценивали коксовую батарею с 6-м печами [15], сделали вывод, что оптимальной (с минимальным давлением расpirания) представляется влажность в интервале 4–6 %. Выше и ниже этого интервала давление расpirания повышается.

8. *Теплотворная способность коксового газа.* Наблюдали, как в период дождей, когда влажность угольной шихты на металлургическом заводе SAIL в Бокаро повышается до $\geq 8,5$ %, повышается теплотворная способность C_v коксового газа. График теплотворной способности и влажности шихты (рис. 6) демонстрирует сильную корреляционную связь:

$$C_v = 184,8 \cdot W + 2456,6; \quad R^2 = 0,8328. \quad (1)$$

При тщательном исследовании данных установили, что в коксовом газе повышалось содер-



Р и с. 6. Зависимость теплотворной способности коксового газа от влажности шихты

жание метана (CH_4), что приводило к повышению его теплотворной способности. Это можно объяснить таким образом, что выделяющийся пар образует защитную пленку вокруг молекул метана, присутствующего в коксовом газе, и таким образом препятствует его конверсии в монооксид углерода, диоксид углерода и водород.

9. *Расход тепла.* При работе оборудования для регулирования влажности шихты на заводе Тоба, Япония, [16] отметили, что снижение влажности шихты до уровня 6,0 % дает эффект снижения расхода тепла на коксование ~ 74 Мкал/т угля. При качестве угля с показателями $R_{o,r}$ 97 % (произвольный показатель отражения) и максимальной текучести 70 % базовой/оригинальной шихты с применением системы СМС получали кокс с тем же уровнем прочности, что и из базовой шихты.

Еще в одном исследовании отходящее тепло отводили и утилизировали для снижения влажности угля до 4 % и сообщили об экономии тепла 80 Мкал /т угля [17]. В коксовом цехе завода компании SAIL в Бокаро для снижения влажности шихты на 1 % требуется 125 Мкал тепла на печь. Для этого нужно 31 м^3 коксового газа. В денежном выражении это соответствует затратам на энергоносители 9,5 млн рупий/год. При более низкой влажности сокращается также выброс NO_x в атмосферу благодаря меньшей потребности в отопительном газе.

10. *Крупность кокса.* Исследование Британской ассоциации исследования кокса (BCRA) показало [18], что крупность кокса, полученного из угля с высоким выходом летучих веществ ($V^{laf} = 28\text{--}37$ %), слабо зависела от влажности в диапазоне 2–14 %. Этот результат был подтвержден при коксовании в промышленной печи шихты с влажностью 3,0–11,5 %. Однако когда шихту подсушивали с 12,5 до 5 %, регистрировали снижение средней крупности кокса с 64 до 57 мм. Общее заключение BCRA по результатам крупномасштабных испытаний было таково, что для представительной группы британских углей термическая подготовка шихты не оказывает влияния на крупность кокса.

В Западной Германии при исследовании на опытной печи углей с выходом летучих 20 и 30 % установили, что при сушке или подогреве шихты снижалась доля кокса классов > 100 и > 80 мм. При коксовании угля с более высоким выходом летучих и загрузке влажной шихты доля классов > 100 мм составляла 45 %, а после подогрева шихты – 25 %. Обнаружили, что подогрев приводит

к повышению на 3–6 мм средней крупности кокса из шихт на основе углей из США, но не влияет на среднюю крупность шихт из хорошо коксующихся углей Польши. Сообщали, что в промышленной практике коксохимического завода Оргрив (Orgreve), Великобритания, подогрев практически не влиял на среднюю крупность или долю в нем классов > 75, > 50 и > 25 мм.

Исследование процесса предварительного подогрева угля в Bergbau Forschung GmbH, описанное в нескольких публикациях, показало в целом увеличение доли класса 40–80 мм в коксе по сравнению с коксом из влажных шихт. Аналогичные результаты публиковали в США в связи с использованием процесса Precarbon и в сообщении INCAR (Национальный институт угля, Испания) [15].

Таким образом, в определенных случаях снижение влажности способствует повышению средней крупности кокса.

11. Прочность кокса. При коксовании в узкокамерных печах необходимой предпосылкой к получению прочного кокса является образование пластического слоя толщиной ≥ 20 мм во время превращения угля в кокс [19]. Кроме того, в высококачественных шихтах из коксующихся углей интервалы пластичности отдельных углей в шихте перекрываются, так что формируется широкий общий интервал пластичности, а температура повторного затвердевания превышает 475 °С. Для образования высококачественного кокса угли в такой шихте должны иметь высокую температуропроводность, так как прочность кокса достигает наивысшего уровня на конечной стадии превращения полукокса в кокс при температурах ~ 1000 °С.

Пластический слой движется в направлении от пристеночных зон камеры коксования к осевой плоскости, вытесняя впереди себя из угольной загрузки влагу, которая конденсируется вблизи осевой плоскости при 100 °С.

Исследования показали, что повышение влажности шихты сверх 8 % приводит к уменьшению толщины пластического слоя и в конечном итоге препятствует образованию прочного кокса. При повышенной влажности шихты снижается скорость нагрева в интервале температур 300–500 °С, что приводит к образованию более тонкого пластического слоя и меньшему вспучиванию. Кроме того, температурный градиент в окрестности температур повторного затвердевания приобретает большую крутизну из-за повышенной трещиноватости образованного кокса [20].

12. Усадка/вспучивание кокса. При приготовлении сухой или маловлажной шихты насыпная плотность загрузки остается очень высокой. При высокой плотности усиливается вспучивание массы кокса [2]. Это приводит к меньшей усадке кокса, к более высокому давлению раspiраия, действующему на стены печной камеры, и к затрудненной выдаче кокса.

13. Себестоимость производства кокса. Для снижения издержек в производстве кокса необходимо снизить в первую очередь затраты на материалы и эксплуатационные затраты.

Обе составляющие затрат можно снизить понижением влажности угольной шихты. Однако снижение влажности сопровождается усилением пылеобразования, поэтому установили нижний предел влажности шихты ~ 5 %, и он хорошо поддерживается при работе системы СМС. Для снижения влажности до минимально возможного уровня (~ 2 %) на фирме Nippon Steel разработали и успешно внедрили систему DAPS. В этой системе мелкие классы угля отделяются от подсушенной шихты и подвергаются окускованию в отдельной технологической установке.

Установили, что с системой DAPS производительность на 21 % выше, чем при обычном способе загрузки, а качество кокса по показателю CSR выше на +5,6 ед., при этом достигнута 15%-ная экономия энергии.

Кроме того, за счет повышения качества кокса стало возможным увеличить долю дешевых (слабококсующихся и некоксующихся) углей. В результате общие производственные затраты удается снизить на 8–11 %.

Заключение

Влажность – показатель, который влияет как на условия транспортировки угля, так и на рабочий режим и эффективность оборудования коксового цеха. Сравнительно с другими столь же важными характеристиками угольной шихты влажность легко поддается регулированию.

Оптимальный уровень влагосодержания угольной загрузки повышает производительность коксовой печи, качество кокса и ровность хода печей. Подытоживая сказанное, можно отметить следующее:

– влажность шихты можно понизить до 5–6 % (мас.) применением системы СМС и до 2–4 % (мас.) – с системой DAPS;

– влажность влияет на насыпную плотность угольной шихты и, следовательно, на качество кокса и выход продуктов коксования;

– повышение влажности снижает измельчаемость угля, давление распырания и внутреннее газовое давление;

– повышение влажности угольной шихты способствует подавлению пылевыведения при загрузке печей и, соответственно, меньшему забиванию проходных сечений в системе газоотвода, в том числе в стояках и газосборнике;

– на коксовых батареях, работающих на шихтах с высокой влажностью, не испытывают трудностей из-за отложения графита на своде печных камер;

– отмечали, что в сезон дождей, когда на заводе компании SAIL в Бокаро влажность угольной шихты достигает $\geq 8,5\%$, повышается теплоотворная способность коксового газа;

– при рабочей влажности 9–11 % повышение влажности на 1 % дает увеличение выхода коксового газа на $5,2 \text{ м}^3$;

– исследования показали, что повышение влажности шихты $> 8\%$ вызывает уменьшение толщины пластического слоя и тем самым препятствует образованию прочного кокса;

– процесс подогрева шихты перед коксованием, описанный во многих публикациях, продемонстрировал в целом увеличение доли класса 40–80 мм в коксе по сравнению с коксованием влажной шихты;

– в коксовом цехе завода компании SAIL в Бокаро снижение влажности шихты на 1 % требует затраты тепла 125 Мкал на печь, что эквивалентно увеличению затрат на энергоносители на 9,5 млн индийских рупий в год;

– при пониженной влажности уменьшается выброс NO_x в атмосферу;

– при переработке сухой или маловлажной угольной шихты усиливается вспучивание массы кокса, при этом уменьшается усадка и затрудняется выдача кокса из печей;

– использование системы DAPS позволяет снизить общие производственные издержки на 8–11 %.

Специалисты коксового производства во всем мире стремятся поддерживать оптимальный уровень влажности соответственно требованиям конкретного производства, технологическим режимам, качеству целевого и побочных продуктов, техническому состоянию и возрасту коксовых печей, условиям погрузочно-транспортных операций. Поэтому важно выбирать такой уровень влажности, который обеспечивал бы наибольшую экономическую выгоду, оцениваемую по показателям загрязнения окружающей среды, утилизации энергии и другим ожидаемым результатам.

Выражение благодарности

Авторы выражают благодарность руководству Sri M. P. Reddy SAIL-RDCIS и SAIL-BSL, в особенности Sri B. C. Roy, GM-RDCIS Bokaro Centre; Sri M. P. Reddy, GM (Уголь и Энергетика) – RDCIS Ranchi; Sri S. Pal, GM (Служба качества) металлургического завода Бокаро и Sri B. P. Verma, GM & In-charge (Коксовый цех и химическое отделение) металлургического завода Бокаро за помощь в инициировании и стимулировании написания этой статьи. Авторы благодарны также Late Sri Prashant Gupta, экс-руководителю RDCIS Bokaro Centre, за предоставление ряда полезных материалов по этой теме.

Список литературы

1. Speight J. G. Handbook of coal analysis. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005.
2. Wakuri S., Ohno M., Hosokawa K. New control system of coal moisture at coke oven. In: 45-th Ironmaking Conference, 6–9 April, 1986. Washington DC.
3. Wakuri S., Ohno M., Hosokawa K. et al. New moisture control system of coal for coking. Trans ISIJ, 1985; 25. P. 1111–1115.
4. Tanaka S., Okanishi K., Kikuchi A., Yamamura Y. Operation of dry-cleaned and agglomerated precompaction system (DAPS). In: Ironmaking Conference Proceedings; 56: Warrendale, Pennsylvania: Iron Steel Soc. – Ironmaking Division, 1997. P. 139–142.
5. Elliott M. A. Chemistry of coal utilization. Second Supplementary Volume. New York: John Wiley & Sons Inc., 1981.
6. Wakelin D. H. The Making, shaping and treating of steel (Ironmaking Volume). 11-th Edition. USA: United States Steel Corp., 1998.
7. Suarez-Ruiz I., Crelling J. C. Mining and beneficiation. In: Esterle JS. Applied coal petrology, Academic Press, Elsevier Ltd, 2008. P. 73–76.
8. Zavitz R. C. The role of spherulitic carbon in coke oven roof deposits. Dominion Foundries and Steel Limited, Hamilton, Canada, 1968. P. 268–275
9. Furusawa A., Nakagawa T., Maeno Y., Komaki I. Influence of coal moisture control on carbon deposition in the coke oven chamber. ISIJ Int. 1998. Vol. 38, № 12. P. 1320–1325.
10. Krebs V., Mareche J. F., Furdin G., Dumay D. Contribution to the study of carbon deposition in coke ovens. Fuel. 1994. Vol. 73, № 12. P. 1904–1910.
11. Nomura S., Arima T., Dobashi A., Doi K. Coking pressure control by selective crushing of high coking pressure coal. ISIJ Int. 2011. Vol. 51, № 9. P. 1425–1431.
12. Зубилин И. Г., Рудыка В. И., Тараканов А. А., Зубилина А. И. О механизме науглероживания – разуглероживания стен печных камер коксовых батарей // Кокс и химия. 2001. № 10. С. 7–10.
13. Lee W. J., Lee Y. K. Effect of coal blend and operating variables on internal gas pressure during coking in a coke oven. RIST J of R&D (South Korea). 2000. Vol. 14, № 1. P. 107–113.

14. Rohde W., Habermehl D., Kolitz V. Coking pressure and coal moisture – effects during carbonization – implications for a new coking reactor design. In: 47-th Ironmaking Conference, 17–20 April, 1988. Toronto.
15. Latshaw G. M., McCollum H. R., Stanley R. W. Wall pressure determination by measurement and interpretation of internal gas pressures in a six-meter coke battery. In: 43-rd Ironmaking Conference, 1–4 April, 1984. Chicago.
16. Katayama T., Kobayashi T., Tanaka T. et al. Operation of coal moisture control equipment of coke oven batteries at Chiba Works. In: 48-th Ironmaking Conference, 2–5 April, 1989. Chicago.
17. Recent heat recovery techniques in Ichi Kan Iron Incorporation. World Steel (JPN). 1986. № 6. P. 2–9.
18. Edwards D. G., Barber K. G. Coke lump size: Some of the influencing factors (a Literature Review). // Cokemak. Int. 2000. № 1. P. 87–92.
19. Callcott T. G. Principles for blending coals. BHP Technical Bulletin. November. 1979. Vol. 23, № 2. P. 49–53.
20. Chatterjee A., Rao P. V. T. Monograph on coal and coke at Tata Steel. Illustrated Edition. Jamshedpur, India : Tata Steel, 1992.

Статья поступила 08.02.2013 г.

COAL BLEND MOISTURE – A BOON OR BANE IN COKEMAKING?

© Das S. K., Nandy A. S., Paul A., Sahoo B. K., Chakraborty B., Das A.

A by-product coke making plant is required to supply sufficient coke of good quality and adequate gas of high calorific value for the integrated steel plant to be a going concern. The one element that influences the handling of coal and impacts the operation and efficiency of the plant is moisture. Compared to other important properties of the coal blend, moisture can be easily manipulated. The coal moisture can be increased simply by adding water through hose pipes. Also, it can be reduced to 5–6 mass % using Coal Moisture Control (CMC) and 2–4 mass % using Dry-cleaned & Agglomerated Pre-compaction System (DAPS).

Moisture content is one among the many variables affecting the bulk density of coal blend and those controlling the coke qualities and yield. Increase in moisture reduces coal grindability, coking pressure and internal gas pressure; helps in dust suppression during charging and hence reduces jamming of ascension pipes and hydraulic main. Batteries charging coals with high moisture content are not troubled with roof carbon deposits. It was observed that when moisture content in coal blend of SAIL-Bokaro Steel Plant increased to more than 8.50 %, the calorific value of coke oven gas improved. In the working moisture range of 9–11 %, the increase of the yield of coke oven gas per 1 % of working moisture is 5.2 m³. Studies have shown, however, that the increase in moisture content of coal beyond 8 % hampers strong coke formation. Pre-carbonization preheating process generally showed an increase in the proportion of 40–80 mm coke, compared with wet charges. For SAIL-Bokaro coke ovens, driving out 1 % moisture from coal blend requires 125 Mega-calories of heat/oven. With lesser moisture, the emission of NO_x in atmosphere will also be low. On using dry to low moisture coal blend, the swelling of coke mass increases leading to difficulty in oven pushings.

Hence, an optimum level of moisture content of charge coal needs to be maintained for improving coke oven productivity, coke quality and operational smoothness. The coke oven managers all around the globe maintain this optimum level according to their requirement, the operating conditions, the quality of product and by products, the oven health & age and the ease of handling.

Keywords: coal blend moisture; bulk density; roof carbon deposit; coke oven gas; coke quality; smooth operation.