



$r_3 = 1,0$ мм, $R_{*3} = 65,3$ Ом. Значение a вычисляли по формуле

$$a = \exp \left[\frac{R_{*2} \ln 2r_1 - R_{*1} \ln 2r_2}{R_{*2} - R_{*1}} \right]$$

Оно составляет 0,001 мм. Результаты измерений (●) представлены на рис. 4. Здесь же кривая $R_* = f(r)$ построена в соответствии с (7) по формуле

$$R_* = \rho_0 \frac{l}{S} \ln \frac{2r}{a}$$

при $\rho_0 = 96$ мОм·м.

Как видно из рис. 4, между теоретической кривой и экспериментальными данными существует хорошая сходимость.

Таким образом, экспериментальная проверка полученной аналитической модели показала достаточ-

но высокую степень ее адекватности фактической функциональной связи между внешним удельным сопротивлением сыпучей смеси термоантрацита и размерами ее частиц.

1. Лакомский В. И. Математическая модель расчета удельного электрического сопротивления зернистого термоантрацита в зависимости от его фракционного состава // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 3. — С. 48–51.
2. Хольм Р. Электрические контакты. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. — 464 с.
3. Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. — М.: Гостехтеоретиздат, 1954. — 444 с.
4. Лакомский В. И., Лебедев В. А. Зависимость контактного электросопротивления термоантрацита от температуры и давления // Современная электрометаллургия. — 2004. — № 4. — С. 46–48.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

Поступила 13.04.2004

УДК 669.187.004.18

ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ В ЭЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРЕ

Б. Ф. Петров

Рассмотрена ситуация, сложившаяся с работой электрокальцинаторов ИЭТ-10-УХЛ-4 ПО «Сибэлектротерм» на Днепропетровском электродном заводе ОАО «Укрграфит». Проанализированы недостатки конструкции этих печей. В краткой форме представлены некоторые результаты совместной работы завода и Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, которые привели к созданию практически новой печи, лишенной недостатков старой конструкции. В ней обеспечивается полное перемещение термоантрацита и создан второй регулируемый очаг нагрева всей угольной шихты.

Situation has been considered which was occurred in operation of electric calcinators IET-10-UkhLD-4 of PO "Sibelectroterm" at Dnepropetrovsk electrode plant of OJSC "Ukrgraphit". Drawbacks of designs of these furnaces are analyzed. Some results of joint work of the plant and E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, which have led to the creation of almost new furnace having no drawbacks of the old design, are described briefly. The full movement of the anthracite in it is ensured and the second adjustable source of heating of all the coal charge is created.

Ключевые слова: электрокальцинатор; антрацит; термоантрацит; дросселирование; электрическая шахтная печь; угольная шихта; электрическое сопротивление; дроссель

Производство термоантрацита для нужд электродной промышленности, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 4794–97 (удельное электрическое сопротивление термоантрацита должно быть ниже 1000 мкОм·м), в настоящее время сосредоточено в шахтных электропечах конструкции, аналогичной выпускаемой норвежской фирмой ELKEM. В высокопроизводительных прокалочных печах барабанного типа, работающих на газовом топливе или мазуте, из-за сравнительно низкой температуры нагрева угля

не удастся получить термоантрацит с удельным электрическим сопротивлением ниже 1200 мкОм·м.

Преимущество шахтных электропечей состоит в том, что в них максимальную температуру нагрева угля можно без каких-либо затруднений довести до 2000 °С и выше, а чем выше температура прокалики антрацита, тем лучше качество термоантрацита и ниже его удельное электрическое сопротивление [1]. Однако указанная возможность высокотемпературного нагрева относится не ко всему углю, загруженному в печь, а только к небольшой части угольной шихты, расположенной под нижним электродом печи в осевой зоне печной шахты.

© Б. Ф. ПЕТРОВ, 2005

Наряду с данным преимуществом, шахтным электропечам присущ и ряд серьезных недостатков, главным из которых является существенная неоднородность свойств прокаленного в них термоантрацита [2]. В частности, удельное электрическое сопротивление (основная физическая характеристика термоантрацита, используемого для производства электродов) отличается в параллельных пробах более, чем в два раза — 520 и 1100 мкОм·м [3]. Причина столь высокой неоднородности свойств термоантрацита заключается в неоднородности температурного поля угольной шихты и специфической конфигурации печи.

Если рассматривать поперечное сечение шахты печи, то можно обнаружить, что наиболее высокая температура фиксируется в центре (на оси печи), а у стенок она едва достигает на выходе из печи 950 °С. В вертикальном сечении шахты печи распределение температуры по оси следующее: самая высокая температура угля зафиксирована в зоне нагрева под верхним электродом; по направлению к нижнему электроду температура, хотя и слабо, но все же понижается.

Следует отметить, что рассматриваемая конструкция печи не позволяет автоматизировать ее работу.

Электрические шахтные печи подобного типа эксплуатируются в промышленности уже более 25 лет. Тем не менее, до сих пор не предложено ни одного кардинального решения, позволяющего исключить их недостатки, кроме паллиативных вариантов решений [4], предложенных сотрудниками фирмы ЕЛКЕМ, согласно которым часть угля (и довольно значительная) должна выделяться из общего потока прокаленного угля и снова пропускаться через печь для дополнительной термообработки.

На Днепропетровском электродном заводе ОАО «Укрграфит» после пуска в эксплуатацию цеха электрокальцинированного антрацита самостоятельно пришли к выводу о необходимости работы по схеме двойной прокалики угля для получения марочного термоантрацита. С целью снижения при этом удельного расхода электроэнергии решили возможным работать не на токах 13...15 кА, как рекомендует завод-изготовитель печей, а на половинной мощности печи при токах 6...7 кА. Тем не менее, и в этом случае двойная прокалика термоантрацита все равно приводит к перерасходу электроэнергии. Приходится затрачивать на производство одной тонны электродного термоантрацита до 1400 кВт·ч электроэнергии. При этом снижается паспортная производительность печей, повышаются трудозатраты в расчете на тонну продукции.

Чтобы найти способы борьбы с этими недостатками электрокальцинаторов конструкции ПО «Сибэлектротерм», Днепропетровский электродный завод и Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины несколько лет назад организовали творческий коллектив и приступили к поиску решений, направленных на улучшение однородности

свойств производимого в электрокальцинаторах электродного термоантрацита.

Исследование температурного поля кальцинатора, выполненное с помощью термопарных зондов на трех горизонтах печной шахты, показало, что наиболее высокая температура (независимо от мощности печи) создается в зоне, расположенной по оси печи под верхним электродом. Повышение мощности печи сказывается главным образом на размерах зоны нагрева, а температура угля в указанной зоне при этом растет весьма умеренно. Указанную зону нагрева угля обнаружили и другие исследователи [3, 5, 6]. Разница в их результатах заключается только в расположении зоны по высоте печи.

Установлено, что эта зона (рис. 1) является единственным очагом интенсивного нагрева угля в печи. По нашему мнению, в ней рассеивается основная доля электрической энергии, подводимой к кальцинатору. Выделенная тепловая энергия из зоны высокой температуры распространяется по всей массе дробленого угля благодаря теплопроводности. Температура угля в радиальном направлении на уровне зоны стремительно падает от зоны нагрева к стенкам печи. Разумеется, в таких условиях пристенные массы угля будут значительно холоднее центральных. Кроме теплового потока, направленного на периферию шахты дробленого антрацита, тепловая энергия из зоны нагрева распространяется и в направлении к нижнему электроду печи. Однако этот поток, по сравнению с радиальным, весьма мал. Объясняется это тем, что центральная зона печи на всем протяжении до нижнего электрода, хотя и слабо, но сама нагревается электрическим током, протекающим между верхним и нижним электродами.

Причины размещения зоны наиболее высоких температур именно в этом месте шахты печи следующие: во-первых, антрацит, поступивший в печь через загрузочное устройство печи, приобретает в результате нагрева восходящими газами сухой перерогонки угля достаточную электропроводность; во-вторых, зерна угля испытывают слабое давление лежащих выше слоев угольной шихты и поэтому контактное электросопротивление между зернами угля довольно высокое, следовательно, высоким будет и контактное падение напряжения U_k при переходе электрического тока от зерна к зерну; в-третьих, высокое значение U_k приводит к весьма существенному росту контактной температуры, поскольку последняя находится в квадратичной зависимости от U_k ; в-четвертых, в связи с близостью к верхнему электроду зафиксирована самая высокая плотность электрического тока по угольной шихте.

На наш взгляд, образование зоны высокотемпературного нагрева угля не происходит мгновенно, а развивается во времени. Вначале, как это показано на прозрачной модели кальцинатора [7, 8], электрический ток прокладывает себе путь по какой-то случайно выбранной цепочке зерен термоантрацита. Проходя по этому пути, ток разогревает зерна цепочки термоантрацита. Поскольку термоантрацит

отличается отрицательным температурным коэффициентом электросопротивления [9], то с повышением температуры его сопротивление падает, и ток в цепочке возрастает. Так продолжается до тех пор, пока степень нагрева зерен угля в электрической цепочке не достигает белого каления. Затем резко возрастает радиационный поток тепла от нагретой цепочки к окружающим соседним зернам термоантрацита, поскольку интенсивность излучения нагретого тела зависит от его температуры в четвертой степени. В результате этого нагреваются близлежащие зерна термоантрацита, и электрический ток распространяется по угольной шихте и теперь уже протекает по нескольким электрическим мостикам, расширяя сечение пути своего следования. Завершится этот процесс тогда, когда будет достигнуто установившееся значение тока трансформатора.

Как следует из экспериментов и практики работы кальцинаторов, электрический ток в этих условиях не может служить оперативным средством управления работой печи. Управление, согласно рекомендациям изготовителя печи, производится следующим образом. Задается определенный уровень тока, который в процессе работы печи автоматически колеблется между установленными минимальным и максимальным значениями. При подаче в печь порции «сырого» антрацита ток самопроизвольно понижается до установленного минимума, затем по мере нагрева угля возрастает до максимального уровня. Указанные значения тока свидетельствуют об изменении тепловой обстановки только в зоне максимального нагрева угля и практически не влияют на температуру всей массы угольной шихты. Температурное поле в периферийных участках угля в шихте печи при этом остается практически без изменений.

В этих условиях регулирование работы печи производится посредством порции угля, выгружаемого и загружаемого в печь, а также интервала между включениями дозаторов, т. е. путем изменения производительности печи.

Чтобы избавиться от неоднородности свойств термоантрацита, производимого в электрокальцинаторе, необходимо перемешивать дробленую угольную шихту в печи, для чего следовало, во-первых, создать работоспособную конструкцию перемешивающего устройства, во-вторых, выбрать материал, из которого изготавливались бы элементы этого устройства. Высокая температура и резко восстановительные условия в печи существенно затрудняли выбор материала, способного обеспечить достаточный ресурс перемешивающего устройства.

Самым простым решением являлась бы установка в шахте кальцинатора между верхним и нижним электродами дросселя (шайбы), через который пропускаться бы вся масса угольной шихты. Дроссель должен иметь в верхней части конусную поверхность, чтобы, кроме вертикальной, придать зернам угля горизонтальную составляющую движения. Это устройство, несомненно, обеспечивало бы переме-

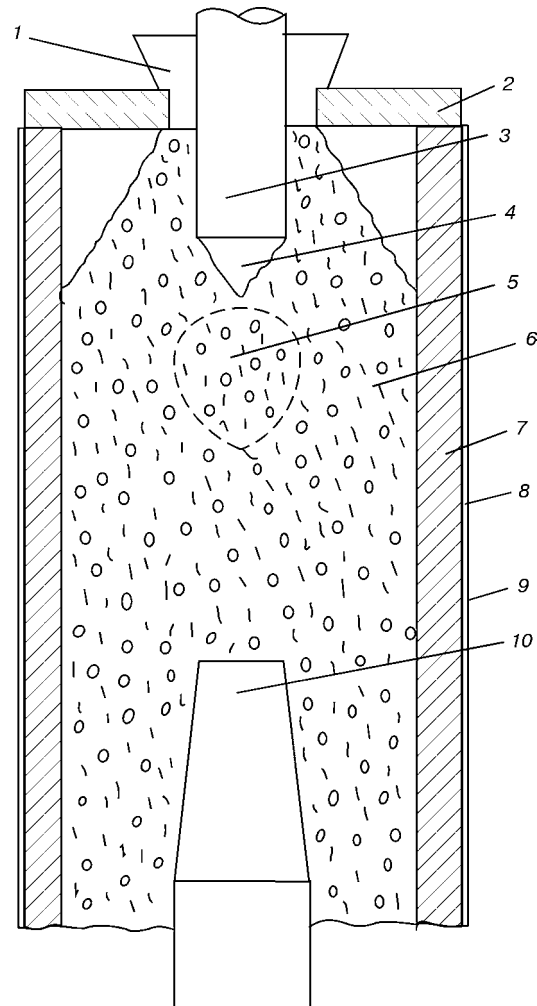


Рис. 1. Схема расположения зоны интенсивного нагрева угольной шихты в шахтной печи конструкции фирмы ELKE: 1 — загрузочное устройство; 2 — пробка из жаропрочного бетона; 3 — верхний электрод; 4 — подэлектродная пустота; 5 — зона интенсивного нагрева термоантрацита; 6 — угольная шихта; 7 — огнеупорная футеровка; 8 — муллитовая вата; 9 — стальной кожух печи; 10 — нижний электрод

шивание дробленого угля при прохождении всей сыпучей шихты через дроссель. Следует подчеркнуть, что перемешивание угольной шихты происходило бы без какой-либо затраты энергии извне. Дробленый уголь пересыпался бы из наддроссельного в поддроссельное пространство под действием гравитационного поля Земли.

Поскольку дроссель размещается в электрическом поле печи, его необходимо изготавливать из неэлектропроводного материала для исключения шунтирования электрического тока по массе дробленого угля. Ток должен протекать только по угольной шихте, ибо активным нагревательным элементом печи является сам электропроводный уголь.

Вначале обсуждалось предложение изготавливать дроссель из огнеупорного материала. Большинство огнеупоров сохраняет свои электроизоляционные свойства даже при высоких температурах. Однако в условиях работы электрокальцинатора огнеупоры, изготовленные из оксидов, будут реагировать с углеродом термоантрацита и восстанавливаться до

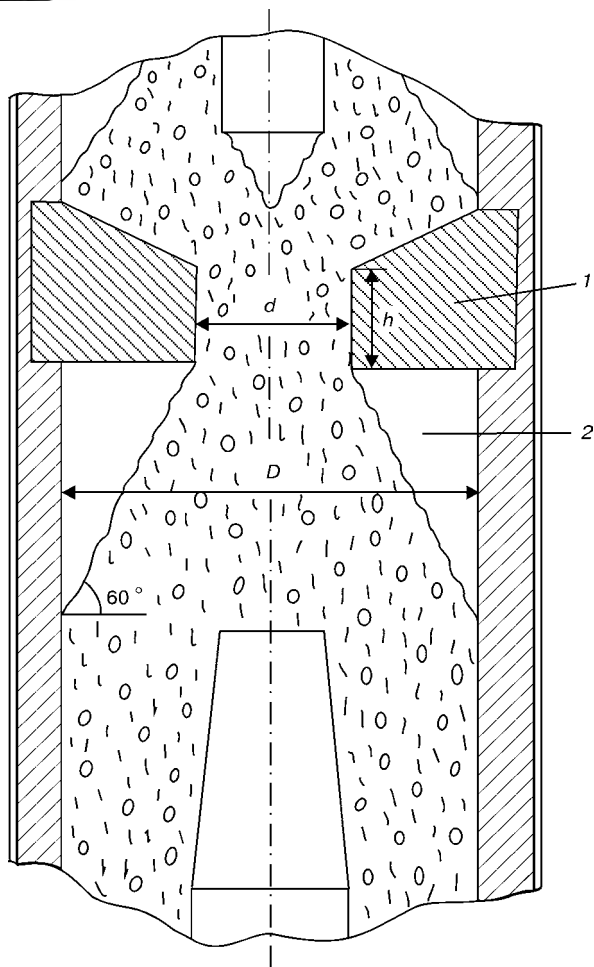


Рис. 2. Схема образования конуса угольной шихты в поддрессельном пространстве печи: 1 — дроссель (шайба); 2 — поддрессельное пустое пространство

карбидов. В связи с этим срок их службы станет весьма коротким.

Выбрать соответствующий материал для изготовления дросселя помогло тщательное изучение природы поведения сыпучих материалов при вертикальном перемещении их из одной емкости в другую через отверстие меньшее, чем диаметр емкости. В этих условиях дисперсный материал, которым является дробленый антрацит, при выходе из отверстия образует так называемый конус естественного откоса.

На Днепропетровском электродном заводе ОАО «Укрграфит» для производства термоантрацита используют шихту фракционного состава 6... 25 мм. Конус естественного откоса для этой шихты, как установлено нами, составляет 60° . Следовательно, образование конуса естественного откоса угольной шихты под углом к горизонтали 60° автоматически приведет к созданию пустого поддрессельного пространства, которое разорвет электрическую цепь в столбе электропроводной шихты по кольцевому сечению, равному $\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$, где D — диаметр печи в свету; d — диаметр цилиндрического пространства дросселя (рис. 2).

Таким образом, требования к неэлектропроводности дроссельного материала лишены смысла, ибо

автоматически создаются условия протекания всего тока через угольную шихту в отверстии дросселя. А поскольку через отверстие дросселя проходит вся угольная шихта, то нагреваться током будет не часть шихты, как в печи фирмы ELKEM, а вся масса термоантрацита.

Из всех электропроводных и термостойких материалов мы остановили выбор на материале углеродных доменных блоков. Блоки марки ДБУ — это рядовое изделие нашего завода, содержащее более 60 % низкокачественного термоантрацита, что и требуется для работы дросселя. Материал дросселя должен отличаться удельным электрическим сопротивлением, превышающим соответствующий показатель для сыпучей угольной шихты при температуре 1500... 2000 °С, иметь низкий коэффициент термического линейного расширения и высокую износостойкость. Термоантрацит характеризуется высокой твердостью, и поэтому материал дросселя должен хорошо противостоять абразивному действию сыпучей угольной массы, скользящей по поверхности дросселя.

Для проверки рабочей идеи создания дросселя мы соорудили физическую модель электрокальцинатора в масштабе 1:4 (рис. 3). Шахта модели быстро и просто собиралась из модульных колец, используемых на заводе для других целей. Кольца представляли собой изделия из армированного жаропрочного бетона с замками. Внутренний диаметр колец составлял 480 мм, высота каждого кольца — 80 мм. Общая высота модели в связи с этим легко изменялась путем варьирования количества колец. Уровень установки дросселя, изготовленного специально для модели из графитированного электродного материала, изменяли путем перестановки колец. Дроссель размещали на расстоянии $1/3$, $1/2$ и $2/3$ межэлектродного промежутка.

Для определения степени перемешивания угольной массы на созданной физической модели производили следующие опыты. Антрацит фракционного состава 4... 6 мм разделили на две равные порции, одну из которых выкрасили в белый цвет. Равные количества черного и белого антрацита загружали в наддрессельное пространство модели, разделив их между собой отрезком трубы. Затем одновременно открывали отверстие в шайбе и извлекали трубу. Угольная шихта пересыпалась из пространства над дросселем в пространство ниже дросселя. После прохода шихты через отверстие в дросселе белый и черный антрацит разделяли и подсчитывали количество по-разному окрашенных зерен. Эксперименты показали соотношения белого и черного антрацита в смеси угля после прохода через дроссель как 50:50; 40:60 независимо от положения дросселя по высоте шахты модели. Состояние угольной шихты после пропускания через отверстие в шайбе можно было оценить и визуально — островки белого и черного угля отсутствовали, что свидетельствовало о хорошем перемешивании угольной шихты.

Кроме перемешивания угольной шихты, на указанной модели изучали изменение температуры угля при его переходе через цилиндрическое пространство дросселя. С учетом теплотехнических свойств жаропрочного бетона нагревали уголь малым током, недостаточным для достижения температур, сравнимых с рабочим режимом полного разогрева термоантрацита в электрокальцинаторе. Опыты проводили не в динамическом, а в статическом режиме. Как и ожидали, угольная шихта в цилиндрическом пространстве дросселя интенсивно нагревается. Так, например, вскоре после подачи электрического питания температура термоантрацита в наддроссельном пространстве достигла 400 °С, а на выходе из дросселя она составляла уже 620 °С. При продлении времени нагрева температура угля в цилиндрическом пространстве дросселя повышалась до 840, 920 и 1020 °С. В то же время температура угля в наддроссельном пространстве увеличивалась в гораздо меньшем темпе.

Нет сомнений в том, что при увеличении длительности нагрева током модели или повышении его значения мы достигли бы более высокой температуры. Однако опыты были прекращены из-за опасения термического разрушения керамических колец, из которых были сложены стенки модели.

Процесс контактного электронагрева термоантрацита в цилиндрическом пространстве дросселя можно представить следующим образом.

Как следует из рис. 2, объем цилиндрического пространства дросселя составляет $\frac{\pi}{4} d^2 h$, а масса угольной шихты, заполнившей это пространство, — $\frac{\pi}{4} d^2 h \gamma$, где γ — удельная насыпная масса угольной шихты принятого фракционного состава.

Поскольку процесс нагрева термоантрацита в дросселе протекает во времени, определим исходя из производительности P кальцинатора время τ , в течение которого уголь подвергается нагреву в дросселе: $\tau = \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{P} h \gamma$. Электрическое сопротивление круглого столба угольной шихты диаметром d и высотой h составит $R = \frac{4}{\pi} \frac{h}{d^2} \rho_{см}$, где $\rho_{см}$ — удельное электрическое сопротивление термоантрацита в виде сыпучего материала при температуре несколько меньшей 2000 °С.

Количество теплоты, вложенное в термоантрацит в процессе его нагрева в дросселе проходящим через уголь током I за время τ , будет $W = I^2 R \tau$.

Составим уравнение теплового баланса:

$$\frac{4\pi\rho_{см}h^2d^2\gamma}{4\pi d^2 P} I^2 = \frac{\pi}{4} d^2 h \gamma C_p T, \quad (1)$$

где C_p — теплоемкость дробленого термоантрацита при постоянном давлении; T — температура угля.

После соответствующих сокращений и перестановок получим зависимость температуры нагрева



Рис. 3. Общий вид физической модели электрокальцинатора

угля в цилиндрическом пространстве дросселя от электрического тока, протекающего между электродами печи:

$$T = \frac{4}{\pi} \frac{h\rho_{см}}{d^2 PC_p} I^2. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что температура нагрева термоантрацита в цилиндрическом пространстве дросселя находится в прямой зависимости от тока в квадрате и определяется диаметром и высотой цилиндрического пространства дросселя, заданной производительностью печи, теплоемкостью и удельным электрическим сопротивлением сыпучей массы угля. Это очень важный вывод, поскольку он указывает на использование тока печи в качестве оперативного средства регулирования процесса прокали угля.

Таким образом, в печи существующей конструкции варьирование тока приводит к изменению температуры не всей массы угля, а только той части, которая находится в зоне интенсивного нагрева термоантрацита. Если же в печи установить дроссель, через который проходит вся угольная шихта, то изменение тока вызовет изменение температуры всей массы угля.

Следовательно, в реконструированном электрокальцинаторе технология прокали угля коренным образом меняется. Теперь процесс прокали угля необходимо вести по показаниям амперметра на пульте печи. Часовая производительность печи в нынешних условиях играет подчиненную роль. Установив значение P , исходя из заданного удельного электрического сопротивления конечного продукта

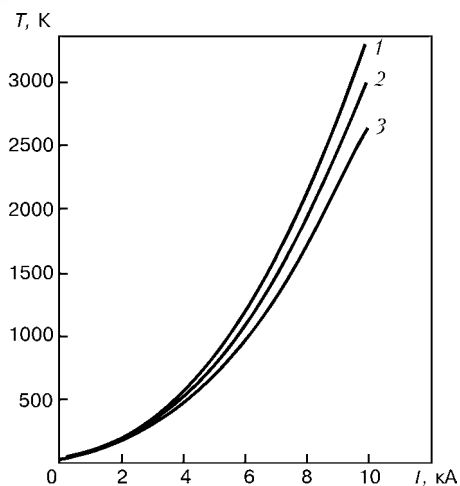


Рис. 4. Зависимости температуры термоантрацита от тока печи в процессе его нагрева в дросселе: 1 — идеальный случай (без тепловых потерь); 2 и 3 — соответственно 10 и 20% тепловых потерь в тело дросселя

выбирают значение тока печи I , отвечающее наиболее экономному режиму прокалики угля.

Далее все члены уравнения (2) можно разделить на конструктивные параметры дросселя d и h , технологические параметры печи P и I , свойства термоантрацита $\rho_{см}$ и C_p .

Наиболее эффективно на температуру нагрева угля влияет ток I и диаметр отверстия в дросселе d , поскольку оба эти члена уравнения (2) находятся во второй степени. Отличие между ними заключается в том, что диаметр d можно изменять только при замене дросселя, а ток печи I остается во всех случаях оперативным параметром управления работой печи. Увеличив значение тока I всего лишь на 5 %, мы поднимаем температуру прокалики угля от 1800 до 2000 °С. В то же время для получения аналогичного эффекта путем изменения производительности печи необходимо было бы снизить этот параметр на 11%.

Варьирование тока I и диаметра D способствует изменению удельной плотности тока в цилиндрическом пространстве дросселя. Этим и объясняется столь сильное воздействие этих параметров на температуру прокалики. Такой параметр дросселя, как высота его цилиндрической части h , оказывает влияние на длительность процесса нагрева каждой порции угля, размещающейся в цилиндрическом пространстве дросселя. Это кинетический фактор процесса нагрева. Время τ следует выбирать с таким расчетом, чтобы его хватило для прокалики самых крупных зерен термоантрацита. Если же выбранного времени для обработки антрацита недостаточно, то нужно несколько увеличить значение h . Изменяя его значение, следует помнить, что с увеличением h возрастает опасность шунтирования пути тока. Ток должен протекать по дробленой массе угля, находящегося в дросселе, а не по стенкам его цилиндрического пространства. Для расширения возможностей технолога следует использовать для дросселя материал с возможно низкой электропроводностью.

При составлении теплового баланса мы не учитывали потери теплоты из той части угля, что на-

ходится в цилиндрическом пространстве дросселя. Надо полагать, что в начале процесса нагрева потери будут ощутимыми, а затем при достижении теплового насыщения дросселя они существенно снизятся. Оценочный расчет тепловых потерь в тело дросселя показывает, что их значение не превышает 10 % общего тепловыделения в дросселе в условиях установившегося режима нагрева.

На рис. 4 представлены результаты расчета температуры нагрева угля в дросселе при различных тепловых потерях этого процесса. Было принято, что $P = 800$ кг/ч, а C_p при высоких значениях температуры составляет $0,47$ (Вт·ч)/(кг·град) [10]. На рисунке показана параболическая зависимость температуры нагрева термоантрацита в дросселе от тока. Увеличение в два раза значения тока печи приводит к четырехкратному повышению температуры нагрева угля. После установки в печи дросселя нет необходимости работать на токах 13...15 кА, как рекомендует завод-изготовитель. Достаточно всего 9...10 кА, чтобы нагреть весь уголь, загруженный в печь до температур, превышающих 2000 °С. Такой режим управления печью — ключ к экономии удельного расхода электроэнергии.

Первые испытания реконструированного электрокальцинатора показали, что можно получать термоантрацит с удельным электросопротивлением 680 мкОм·м при расходе 763,6 кВт·ч/т.

1. Филалков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. — М.: АспектПресс, 1997. — 718 с.
2. Неоднородность электротермоантрацита и ее оценка / А. И. Солдатов, В. Н. Бекасов, С. Д. Меньшикова и др. // Цвет. металлы. — 1990. — № 2. — С. 53–55.
3. Распределение температурных полей в шахте электрокальцинатора и их влияние на качество получаемого термоантрацита / А. С. Татищев, А. М. Мухититов, В. Н. Николаев и др. // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции: Сб. науч. тр. ГосНИИЭП. — Челябинск: Южно-уральское изд-во, 1985. — С. 27–31.
4. Пат. RU 2167377 C1, Норвегия. Способ и обжиговая печь для электрического обжига углеродсодержащего материала / Й. А. Йохансен, А. Ваттлани. — Оpubл. 22.10.98.
5. Солдатов А. И. Электрокальцинированный антрацит. Особенности его производства и применения: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Харьков, 1991. — 18 с.
6. Солдатов А. И., Мочалов В. В. Технологические аспекты получения электрокальцинированного антрацита с заданными свойствами: Сб. тр. НИИГрафита, ГосНИИЭП. — М., 1989. — С. 43–49.
7. Лакомский В. И., Быковец В. В. О контактном нагреве термоантрацита в электрокальцинаторе // Цвет. металлы. — 2004. — № 1. — С. 52–54.
8. Лакомский В. И., Григоренко Г. М. Особенности нагрева термоантрацита в электрическом поле переменного тока // Соврем. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 53–55.
9. Быковец В. В., Лакомский В. И. Удельное электрическое сопротивление термоантрацита // Там же. — 2003. — № 4. — С. 49–51.
10. Гриншпунт А. Г. Исследование комплексных характеристик антрацитов, используемых в составе электродных масс самообжигающихся электродов рудовосстановительных электропечей // Теория и практика металлургии. — 1998. — № 3. — С. 33–34.

ОАО «Украинский графит», Запорожье

Поступила 10.02.2005