



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ОАО «УКРАИНСКИЙ ГРАФИТ»

Б. Ф. Петров, С. В. Кутузов, О. Ю. Уразлина, В. В. Быковец

Рассмотрены физические процессы, происходящие в промышленной печи (электрокальцинаторе), предназначенной для получения на основе антрацитов углеродистого материала с определенными электрическими свойствами. Приведены результаты прямых экспериментальных исследований, описаны недостатки существующей конструкции печи, обоснованы ее конструктивные изменения.

Physical processes proceeding in an industrial furnace (calcinator) designed for producing carbon-graphite materials, based on anthracite, with definite electrical properties are considered. Results of direct experimental investigations are given, drawbacks of existing design of the furnace are described and its design changes are proved.

Ключевые слова: антрацит; прокаливание; электрокальцинатор; электротермоантрацит; удельное электрическое сопротивление

Продукция электродного завода состоит, как правило, из трех групп: графитированные изделия, угольные изделия и углеродные товарные массы.

В группу угольных изделий входят подовые и боковые блоки алюминиевых электролизеров, выпуск которых на предприятии наибольший. Сравнительно большой объем в производстве угольных изделий занимают блоки для футеровки лещади и стенок горна доменных печей. Изготавливают также угольные электроды для сталеплавильных печей малой емкости и печей по производству кристаллического кремния.

Товарные углеродные массы выпускают для последующего использования в качестве самоспекающихся электродов Содерберга в ферросплавных печах, печах для производства карбида кальция, плавящихся абразивов и т. п.

Основным компонентом угольной продукции электродных заводов и углеродных масс является термоантрацит. Например, в шихте подовых блоков алюминиевых электролизеров содержание термоантрацита достигает 60, а иногда и 70 %.

Главное технологическое требование, предъявляемое к этому материалу, — низкое удельное электропроводности антрацита можно только путем его прокаливания, разумеется, без доступа воздуха и при высоких температурах. По аналогии с обжигом известняка, эта процедура получила название кальцинации.

В первой половине прошлого столетия обжиг антрацита осуществляли в шахтных и барабанных печах с газовым обогревом [1]. Однако при этом из-за сравнительно низкой температуры (1573... 1673 К), достигаемой в таких печах, удавалось снизить

удельное электросопротивление антрацита лишь до 1000 мкОм·м.

В последней четверти прошлого столетия в результате интенсивных поисковых работ норвежской фирмы «Элкем» появились шахтные электрические печи для кальцинации антрацита. Максимальная температура нагрева угля в них превышает 2273 К, а степень графитации антрацита достигает 20... 30 %. Благодаря столь высокому значению температуры товарный электротермоантрацит из этих печей имеет весьма низкое удельное электросопротивление — примерно 250 мкОм·м [2].

По химическому возрасту антрацит является самым старым из каменных углей. Его залежи отличаются большой неоднородностью свойств. Добытый уголь из разных шахт или даже из одной, но разных лав, отличается степенью метаморфизма, дисперсностью и слоистостью структуры, что в дальнейшем определяет его годность к переделу в электротермоантрацит.

Антрацит относится к углям высокой плотности, его истинная (пикнометрическая) плотность достигает 1,70... 1,80 г/см³ [3]. Для сравнения, самая высокая рентгеновская плотность графита составляет 2,265 г/см³, а у графитированных электродов так называемой высокой плотности она равна 2,20... 2,22 г/см³.

Антрацит представляет собой твердый углерод с аморфным строением. Кристаллографически он состоит из весьма мелких кристалликов, именуемых карбоидами, т. е. продуктов разрушения ароматической структуры органических веществ, из которых произошел антрацит [4]. Указанные кристаллики имеют структуру, близкую к таковой графита. Средние размеры кристалликов графита по оси *c* графитного гексагона составляют 1,1... 1,6, а по оси *a* — 1,8... 3,2 нм. Те же параметры у ацетиленовой

сажи равны 1,5 и 2,0 нм. Карбиды обычно складываются в более крупные сферолиты, размер которых достигает 600 нм, а те в свою очередь в цепочки и хлопья — структуры высшего порядка, которые при нагревании (от 1800 и особенно при 2200 °С) довольно быстро, хотя и в две стадии, превращаются в графит [5].

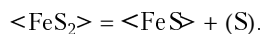
В антраците, как и в любом каменном угле, можно выделить органическую часть, представленную преимущественно углеродом (в расчете на сухую массу он составляет 93,5... 97,0 %) и примеси в виде кислорода, азота, золы, влаги, серы. Кроме того, в антраците обнаруживают углеводороды, которые при нагревании разрушаются и улетучиваются чаще всего в виде водорода и метана. Летучих составляющих в антраците сравнительно мало, всего 2... 8 %.

Состав отходящих технологических газов электрокальцинатора обычно представляет собой 10... 12 % H_2 , 5... 7 % CO , 0,2... 0,4 % CH_4 , 9... 10 % CO_2 .

Антрациты малозольные угли. Согласно ГОСТ 28986–91, в обогащенном антраците Донецкого угольного бассейна, предназначенном для производства угольных электродов, массовая доля золы не должна превышать 5, а серы — 2 %.

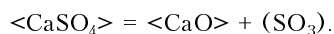
Зола антрацита состоит главным образом из оксидов железа, кремния и алюминия. Сера присутствует в виде дисульфида железа, сульфата кальция и серы, связанной с органической основой антрацита.

При нагревании из угля удаляется органическая и сульфидная сера. Дисульфид железа FeS_2 уже при 673 К начинает разлагаться путем отщепления одного атома серы от дисульфида:



Если эта реакция протекает в присутствии кислорода или серного ангидрида SO_3 , который здесь выступает как окислитель, то элементарная и органическая сера окисляется до SO_2 .

Сульфат кальция при нагреве диссоциирует по следующей реакции:



Серный ангидрид SO_3 начиная от 1273 К разлагается, и при 1573 К этот процесс полностью завершается. При прокалке антрацита в электрическом кальцинаторе серный ангидрид в газовой фазе отсутствует, зафиксирован лишь ангидрид сернистой кислоты SO_2 и (редко) сернистый водород H_2S .

При кальцинации антрацита в электропечи происходит глубокая очистка угля от серы. Содержание серы в термоантраците обычно уменьшается до 0,13, чаще — до 0,09... 0,11 %. Эта сера в термоантраците присутствует в виде моносульфида железа FeS .

Конструкция печей не отличается от обычных шахтных агрегатов какими-либо оригинальными конструкторскими решениями (рис. 1). Обычно это верхний 1 и нижний 5 электроды на вертикальной оси печи, футерованная цилиндрическая шахта 3, фактически открытый колошник печи с трубой, отводящей газы сухой перегонки угля 2. Более или менее оригинальным выглядит герметизированное нижнее устройство 6 для выгрузки из печи готового термоантрацита. Дробленый антрацит определенного фракционного состава располагается в печи

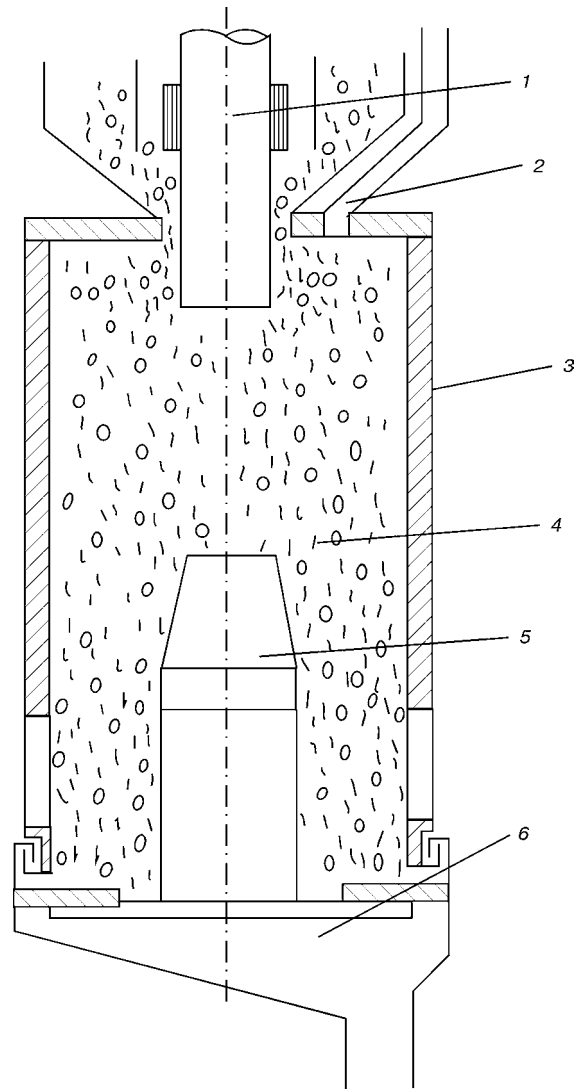


Рис. 1. Схема электрокальцинатора (обозн. поз. 1–6 см. в тексте)

в виде столба шихты 4, в которую заглублены верхний и нижний электроды.

Каждая печь оснащена мощным трансформатором ЭОДЦНШМ-4000/10 с секционированной первичной обмоткой. Рабочий ток печи составляет 12... 15, максимальный — 20 кА; напряжение на электродах — 52... 60 В. Установленная мощность печи достигает 1600 кВт.

Печь работает в дискретном режиме подачи «сырого» антрацита на колошник печи и выгрузки такого же количества готового термоантрацита через специальное устройство в донной части печи. Кроме электрического тока, подаваемого в печь, производительность (масса порции угля и интервал времени между грузовыми операциями) также является технологическим параметром регулирования «хода» печи [6, 7].

Электрический ток, проходя через электропроводный столб шихты, находящийся в межэлектродном пространстве, должен нагревать уголь. При этом из угля выделяется влага, летучие газовые примеси, сера, которые, устремляясь к колошнику печи, нагревают лежащие выше слои угля. Структура антрацита при этом уплотняется, повышается его твердость и (самое главное) возрастает электропроводность.

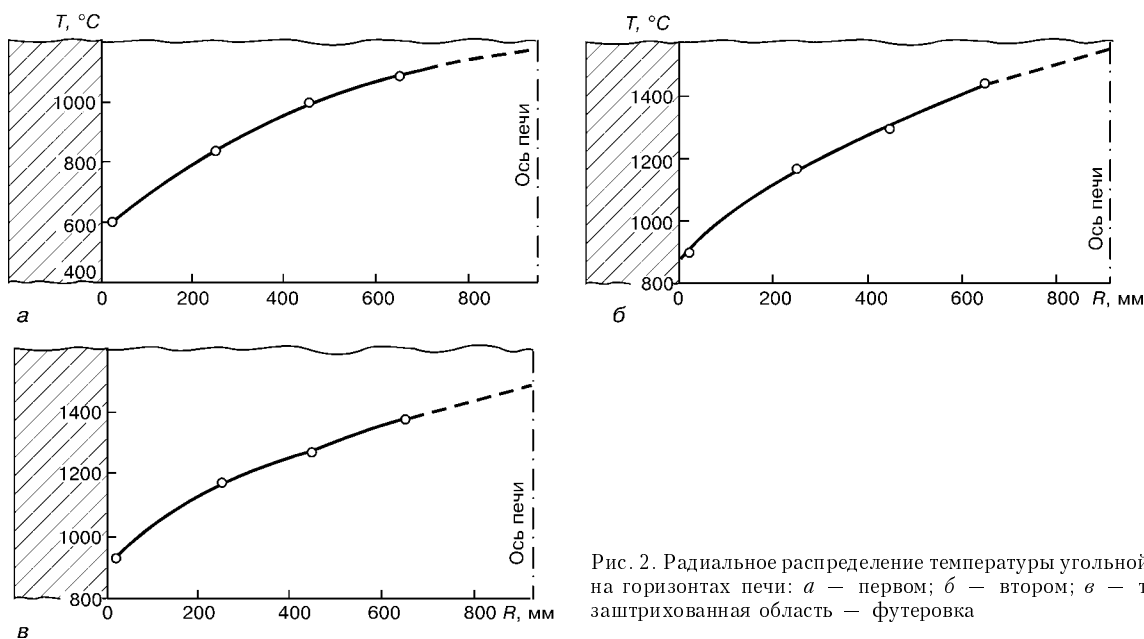


Рис. 2. Радиальное распределение температуры угольной шихты на горизонтах печи: а — первом; б — втором; в — третьем; заштрихованная область — футеровка

Поступающий на обработку «сырой» антрацит не является электропроводным материалом. Его удельное электрическое сопротивление (УЭС) имеет очень высокие значения — $1 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^{10}$ мкОм·м. По сути, это электроизолятор, а не проводник. Поэтому после капитального ремонта первые включения печи выполняются при загрузке готового, полученного ранее в этой же печи, а не «сырого» антрацита.

В установленном режиме работы печи нагрев угля осуществляется следующим образом. Поступившая на колошник свежая порция угля в неэлектропроводном состоянии нагревается горячими газами возгонки угля. При этом значение УЭС угля падает очень быстро. Зависимость УЭС сырого антрацита от температуры экспоненциальная. Опускаясь с шихтой, порция угля нагревается. По достижении температуры, при которой шихта сможет (хотя и слабо) проводить электрический ток, порция угля включается в общий процесс прямого электрического нагрева.

С этого момента ее следует рассматривать как полупродукт термоантрацита, а не «сырой» уголь. Темп падения уровня УЭС этого угля с повышением температуры теперь изменится. Вместо экспоненциального он станет линейным, но по мере нагревания уголь повышает свою электропроводность. Отмеченное представляется очень важным с точки зрения организации печных процессов. Без этого явления вряд ли происходило бы столь значительное изменение электрических свойств антрацита.

Если проанализировать распределение температуры по поперечному сечению угольного столба шахты печи, то, разумеется, наиболее высокое ее значение будет зафиксировано в центральной зоне печи, из которой теплота в результате теплопроводности сыпучей угольной шихты распространяется к стенкам печи. Таким образом, в шахте печи установится стационарное температурное поле, через которое сверху вниз проходит поток угля со средней линейной скоростью $4,5 \dots 8,5$ мм/мин. Причем вертикальный поток угля перемещается без горизонтального смещения. Таким образом, антрацит, про-

ходящий через центральную зону печи, нагревается до более высокой температуры, чем уголь в периферийных участках печи. Следовательно, антрацит из центральной зоны подвергнется более глубокому прокаливанию и поэтому будет иметь меньшее значение УЭС. Качество угля, прошедшего через более холодную зону печи, будет существенно ниже, значение его УЭС будет более высоким.

Анализ работы электрокальцинатора показал, что в самой конструкции печи изначально заложена возможность получения термоантрацита неоднородного качества. С целью повышения стабильности его качества в 2000 г. в ОАО «Украинский графит» были начаты работы по совершенствованию технологии производства электротермоантрацита и конструкции печи.

На первом этапе определены и проанализированы тепловые и электрические условия работы кальцинатора как электрического агрегата прямого нагрева. С помощью термометрических зондов измерено радиальное распределение температуры на трех горизонтах печи.

Цель данного исследования заключалась в определении очага нагрева антрацита при принятых режимах прокалывания.

С учетом того, что под нижним торцом верхнего электрода в центре печи при диаметре электрода 500 мм возникает конус пустоты высотой 430 мм, первый горизонт измерений располагали на уровне 500 мм ниже указанного торца. Этот уровень был точкой отсчета для остальных двух горизонтов. Вторым горизонтом устанавливали на 500 мм, третий — на 1100 мм ниже первого.

Результаты экспериментальных измерений представлены на рис. 2.

Анализ данных измерений показал, что при линеизации графиков зависимости на первом горизонте темп уменьшения температуры от центра к периферии составлял $6,3$, на втором — $7,2$, а на третьем — $6,2$ град/см. Следовательно, наибольшая интенсивность теплового потока из центра печи к стенке шахты зафиксирована на втором горизонте измерений. С учетом усредненной линейной скорости

перемещения угля по вертикали можно легко определить среднюю скорость нагревания угля.

Так, на пути движения угля от торца верхнего электрода до первого горизонта скорость нагрева составляла 12,2, а между первым и вторым горизонтами — 5,5 град/мин. Судя по температуре на оси печи, антрацит вначале нагревается по мере опускания: на первом горизонте до 1443 К, на втором — до 1823 К. Затем антрацит слегка остывает. На третьем горизонте его температура достигала 1743 К.

Анализ приведенной информации показал, что при указанных режимах работы печи антрацит наиболее интенсивно нагревается в зоне, расположенной под верхним электродом. При опускании ниже первого горизонта антрацит продолжает нагреваться, но со значительно меньшей интенсивностью, после этого уголь остывает.

Второй этап экспериментов проведен на физической модели печи. Исследовали распределение плотности электрического тока по вертикальному и радиальному сечениям печной шахты. Плотность тока и одновременно локальную электропроводность угольной шихты изучали по методике, изложенной в работе [8].

На рис. 3 представлено распределение плотности тока на трех горизонтах термоантрацитово́й шихты в модели. На верхнем горизонте, располагающемся на 80 мм ниже торца верхнего электрода из-за близости к электроду обнаружена самая высокая плотность тока (до 1,24 А/см²). На этом же горизонте под электродом плотность тока в слое угля достигала лишь 0,37 А/см², поскольку ток с торца электрода в шихту не поступает из-за отсутствия прямого контакта электрод-шихта, а в 20 мм от футеровки плотность тока не превышала 0,26 А/см². На нижнем горизонте у нижнего электрода плотность тока составляла 1,10 А/см². Как и следовало ожидать, плотность тока на всех уровнях у стенки модели ниже, чем в центральных участках, что объясняется меньшей электропроводностью угля из-за его остывания у стенок.

Большой интерес представляют данные измерений удельного электросопротивления термоантрацитово́й шихты непосредственно в печи, т. е. в условиях существующего фракционного состава, температуры и локального давления лежащих выше слоев шихты. На уровне верхнего горизонта зафиксировано довольно высокое значение УЭС и существенная неоднородность шихты. Среднее арифметическое значение УЭС из пяти определений, выполненных равномерно по радиусу, составляет (6700 ± 2700) мкОм·м, что свидетельствует о колебаниях локальных значений УЭС до 40 %.

Измерения, выполненные на горизонте нижнего электрода, показали, во-первых, что за счет возросшего давления столба угля в нижней части шахты опытной модели зафиксированы более низкие значения УЭС — (2300 ± 300) мкОм·м, а во-вторых, что в этой части столба электрические свойства шихты более однородны (колебания локальных значений УЭС не выходят за пределы 13 %).

Все приведенные экспериментальные данные дают основание утверждать, что с прогревом шихты, когда температурное поле в печи становится более однородным, выравнивается и распределение элект-

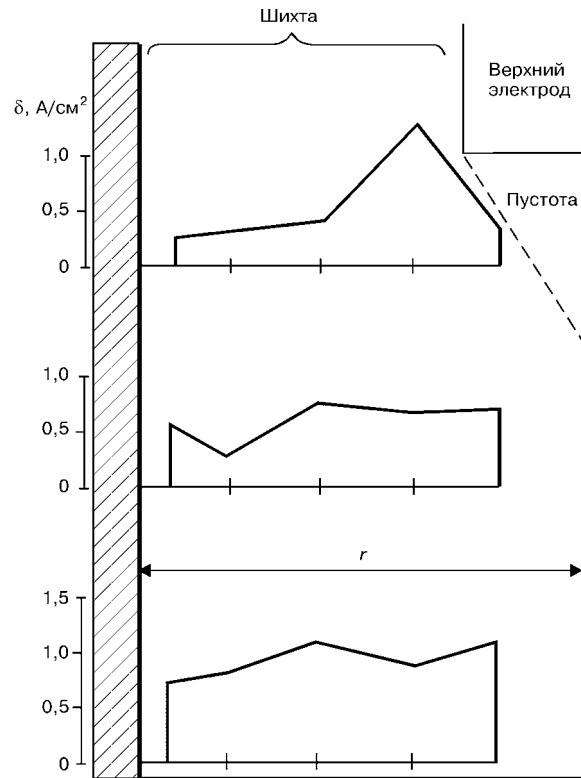


Рис. 3. Радиальное распределение плотности тока в физической модели печи

рического поля по радиальному сечению шахты печи. А поскольку шахта печи осесимметрична, то результаты радиальных замеров можно распространить и на диаметральное сечение печи, а также утверждать о достижении углем на выходе из печи если не полного, то весьма близкого к тепловому, равновесия.

Таким образом, в результате экспериментов на натурной печи и ее физической модели определена жесткая технологическая связь теплового и электрического полей обрабатываемого угля.

Сыпучая шихта электропроводящего угля нагревается путем выделения теплоты в местах контакта между отдельными кусками угля, т. е. в результате контактного нагрева. Обычно контактное сопротивление двух электропроводных соприкасающихся твердых тел складывается из сопротивления стягивания электросиловых линий в пятне реального контакта и сопротивления адгезионных пленок на контактной поверхности. В нашем случае, у термоантрацита, нагретого до нескольких сотен градусов, адсорбционные пленки исчезнут, останется только сопротивление стягивания.

В свое время Р. Хольм показал, что контактное пятно и прилегающий к нему материал контакта, особенно если область стягивания электросиловых линий существенно распространяется от пятна вглубь электропроводного материала, в процессе работы существенно перегреваются [9]. Температура перегрева контакта θ определяется контактным электрическим напряжением U , удельными теплопроводностью λ и электропроводностью ρ материала контакта. Экспериментальное определение λ представляет определенные трудности, поэтому предпочтительнее при аналитическом решении θ использовать число Лоренца L .

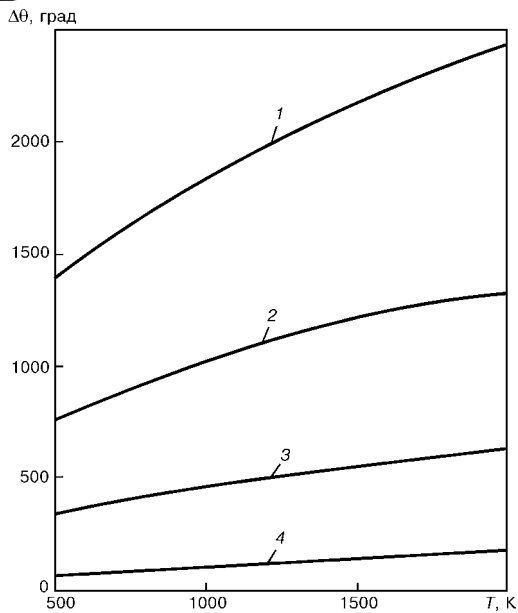


Рис. 4. Зависимость температуры перегрева контактов термоантрацита от температуры материала контакта и катодного падения напряжения, В: 1 – 2,0; 2 – 1,5; 3 – 1,0; 4 – 0,5

Углеродные материалы, в частности термоантрацит, как и металлы, характеризуются довольно устойчивым значением числа Лоренца L [10]. В связи с этим аналитическую зависимость можно представить таким образом:

$$\theta = \frac{1}{8} \frac{U^2}{LT}$$

Число Лоренца L для термоантрацита при 303 К по нашим расчетам, выполненным на основании экспериментальных данных [11], составляет $(1,107 \pm 0,109) \cdot 10^{-6} \text{ (В/К)}^2$. В отличие от графита, оно слабо зависит от температуры ($L = 0,00043 T^{-1,05}$). С учетом этого обстоятельства приведенное уравнение примет очень простой вид: $\theta = 290,7 U^2 T^{0,05}$.

Расчет значения перегрева мест контакта над температурой зерна термоантрацита выполнен нами и приведен на рис. 4, свидетельствующем о контактно-механизме нагрева сыпучего термоантрацита. Достаточно падения напряжения в 2 В на контакте зерен термоантрацита в верхней части столба шихты, где малое давление на контакты создают лежащие выше слои угля, чтобы при температуре 1000 К контакт перегрелся более чем на 1700 градусов, что повысит температуру места контакта в целом до 2800 К.

Экспериментальные исследования и анализ работы шахтного электрокальцинатора показали, что для повышения качества производимого в печи термоантрацита необходимо обязательно перемешивать угольную шихту и создать второй, управляемый, очаг нагрева угля. Достижение поставленных целей заключается в создании устройства, одновременно решающего эти задачи. На наш взгляд, такому требованию отвечает дроссель, устанавливаемый на пути движения угля в шахте печи. Материал дросселя, его конструктивные параметры, место установки и т. п. были определены в процессе работы на физической модели.

Установив в шахте печи дроссель, мы создали второй управляемый очаг нагрева термоантрацита и заставили весь уголь пройти через дроссель, основательно перемешав его.

Главными конструктивными параметрами дросселя являются диаметр его отверстия и длина цилиндрической части. Варьируя диаметр отверстия, можно регулировать процессы перемешивания угля, изменять плотность электросиловых линий в самом узком сечении столба шихты, и в результате — степень нагрева термоантрацита. С длиной цилиндрической части дросселя связано время пребывания угля во второй зоне нагрева. Посредством дросселя можно без ограничения повышать температуру нагрева угля. Однако высокий темп нагрева в дросселе может привести к излишнему растрескиванию и измельчению угля. Во избежание этого нежелательного явления выбирают оптимальный диаметр дросселя, а требуемой температуры нагрева термоантрацита достигают путем увеличения времени нагрева угля за счет удлинения цилиндрической части дросселя.

Таким образом, в результате кропотливой работы творческой бригады, состоящей из сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона и работников ОАО «Украинский графит» создан промышленный электрокальцинатор практически новой конструкции. Уже первые трехсуточные испытания электрокальцинатора с дросселем показали возможность экономии энергозатрат при производстве стандартного термоантрацита ($УЭС < 1000 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) более, чем в два раза. Дальнейшая работа бригады направлена на совершенствование конструкции дросселя.

1. *Мирошниченко Г. К.* Термическая обработка антрацита. — М.; Л.: Металлургиздат, 1941. — 208 с.
2. *Пат. RU 2167377.* МПК F 27 В1/09, F 27 D11/04. Способ и обжиговая печь для электрического обжига углеродсодержащего материала // И. А. Йохансен, А. Вагланн (НО). — Оpubл. 20.05.2001; Бюл. № 14.
3. *Розайлин М. И., Чалых Г. Ф.* Справочник по углеграфитовым материалам. — Л.: Химия, 1974. — 207 с.
4. *Веселовский В. С.* Угольные и графитные конструкционные материалы. — М.: Наука, 1966. — 227 с.
5. *Виргильев Ю. С., Пекальи Т. К.* Стадии процесса графитации углеродных материалов // Неорганич. материалы. — 1976. — 12, № 10. — С. 1791–1795.
6. *Солдатов А. И.* Электрокальцинированный антрацит. Особенности его производства и применения: Автореф. ... канд. техн. наук. — Харьков, 1991. — 20 с.
7. *Computer simulation of the anthracite calcining furnace* / R. T. Rui, R. Hachette, G. Simard et al. // Light Metals. — 1999. — № 1. — P. 609–616.
8. *Данцис Я. Б.* Методика исследования удельного электрического сопротивления промежутка электрод–под в рудно-термической печи // Исследования в области химической электротермии: Тр. ЛенНИИгипрохима. — Л.: Энергия, 1960. — Вып. 11. — С. 48–56.
9. *Хольм Р.* Электрические контакты. — М.: ИЛ, 1961. — 464 с.
10. *Лакомский В. И.* Постоянная Лоренца углеродного материала катодных блоков алюминиевого электролизера // Пробл. спец. электрометаллургии, 1998. — № 3. — С. 57–62.
11. *Dumes D., Lacroix P.* High temperature measurements of electrical resistivity and thermal conductivity on carbon materials used in aluminium smelter // Light Metals. — 1994. — P. 751–760.

ОАО «Украинский графит», Запорожье

Поступила 04.04.2005