

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

В. И. Лакомский, Г. А. Цыбульский

Предложена новая аналитическая модель функциональной зависимости удельного электрического сопротивления сыпучей смеси от размеров ее частиц. Приведены результаты экспериментальной проверки полученной модели для оценки внешнего удельного сопротивления дробленого термоантрацита.

New analytic model of a functional dependence of specific electric resistance of bulk mixture on sizes of its particles is offered. Results of experimental check-out of the obtained model for the evaluation of external specific resistance of a crushed thermoanthracite are given.

Ключевые слова: сыпучая смесь; электропроводность; удельное электрическое сопротивление; математическая модель; термоантрацит

В электродной промышленности всего мира широко используется метод электроконтактного нагрева для отжига сыпучего антрацита и подготовки продуктов его переработки — термоантрацита — в процессе производства угольных электродов. В связи с этим проблема расчета удельного электрического сопротивления сыпучего углеродного материала с различным фракционным составом несмотря на предпринятую ранее попытку [1] остается пока весьма актуальной. Сложность решения этой проблемы, с которыми сталкиваются исследователи, заключается в разработке математической модели дисперсной системы термоантрацита, которая как можно лучше отображала бы электропроводность реальной сыпучей смеси.

В смесях сыпучих углеродных материалов электрический ток протекает как по зернам материала, так и по местам их возможного контакта. Поэтому при разработке математической модели необходимо достоверно представить перенос электрических зарядов по массе зерна и адекватно отобразить реальный перенос зарядов через границу раздела двух твердых тел.

В классической работе Рогнара Хольма [2] приведена приближенная формула расчета удельного сопротивления металлического порошка, сжимаемого поршнем в замкнутом цилиндрическом пространстве:

$$\rho_{\text{см}} = c \left(\frac{a}{b} - \frac{1}{2r} \right), \quad (1)$$

где c и b — константы; a — приведенное значение радиуса элементарных контактных пятен (так на-

зываются a -пятна по Хольму); r — средний радиус зерен металлического порошка. Для того, чтобы воспользоваться этой формулой необходимо знать численные значения всех этих коэффициентов, что вполне приемлемо, если речь идет об определении удельного электрического сопротивления с помощью известных стандартизованных приборов. Однако эта формула не пригодна для инженерных расчетов, если имеют дело с сыпучими смесями различного фракционного состава.

В работе [1] предложена более простая и пригодная для инженерных расчетов формула

$$\rho_{\text{см}} = \rho_0 \frac{r}{a}, \quad (2)$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление материала зерен. В материаловедении дисперсных систем эту величину принято именовать как внутреннее, а $\rho_{\text{см}}$ как внешнее удельное сопротивление сыпучего материала. Уравнение (2) в отличие от (1) весьма удобно для экспресс-оценки значения $\rho_{\text{см}}$, но, как будет показано ниже, в случае мелкозернистой сыпучей смеси оно дает завышенные результаты. В связи с этим в настоящей работе предпринята попытка найти новое аналитическое выражение, хорошо отображающее реальную картину электропроводности сыпучей смеси, состоящей из мелких зерен.

Электрическое сопротивление отдельного зерна сыпучей смеси

Оценим вначале сопротивление одного зерна, включенного в электрическую цепь постоянного тока. Для простоты расчета (как это делается при моделировании дисперсных систем [3]), форму зерна



примем шарообразной. На шаровом слое рассмотрим две плоские контактные площадки радиусом a (рис. 1, а). Эти площадки представим себе как контактные поверхности зерна, через которые осуществляется перенос электрических зарядов с нижнего соседнего зерна в рассматриваемое зерно, а из него в верхнее.

На рис. 1, а видно, что расстояние $2h$ между площадками в зерне связано с радиусами шара r и контактной площадки a очевидной зависимостью

$$a^2 = r^2 - h^2. \quad (3)$$

Для электрического тока шаровидное зерно будет являться проводником с переменным сечением. Можно себе представить, что линии электрического тока при входе последнего через контактную площадку в объем шара вначале будут расширяться, а затем, пройдя диаметрально сечение шара, сжиматься для того, чтобы через контактное пятно перейти в следующее зерно. Для определения сопротивления зерна при такой схеме протекания тока поступим следующим образом. Мысленно разделим шаровой слой между плоскими площадками на множество элементарных слоев, каждый из которых имеет толщину dx . Радиусы оснований слоев обозначим через r_x (рис. 1, б). Сопротивление dR одного такого элементарного слоя можно определить по общеизвестной формуле для проводника круглого сечения

$$dR = \rho_0 \frac{dx}{\pi r_x^2}. \quad (4)$$

Из рис. 1, б видно, что $r_x^2 = r^2 - x^2$. С учетом этого, запишем уравнение (4) в удобном для последующего интегрирования виде

$$dR = \frac{\rho_0}{\pi} \frac{dx}{r^2 - x^2}.$$

Проинтегрировав последнее выражение в пределах от $x = 0$ до $x = h$ и умножив полученный результат на 2, придем к уравнению, описывающему сопротивление всего рассматриваемого шарового слоя толщиной $2h$:

$$R_{ш} = \frac{2\rho_0}{\pi} \int_0^h \frac{dx}{r^2 - x^2} = \frac{\rho}{\pi r} \ln \left(\frac{r+h}{r-h} \right).$$

Используя соотношение $a^2 = r^2 - h^2$ и приняв во внимание, что $a \ll r$, окончательно получим

$$R_{ш} = \frac{2\rho_0}{\pi r} \ln \frac{2r}{a}. \quad (5)$$

Из этой формулы видно, что с уменьшением радиуса r зерна сыпучей смеси электрическое сопро-

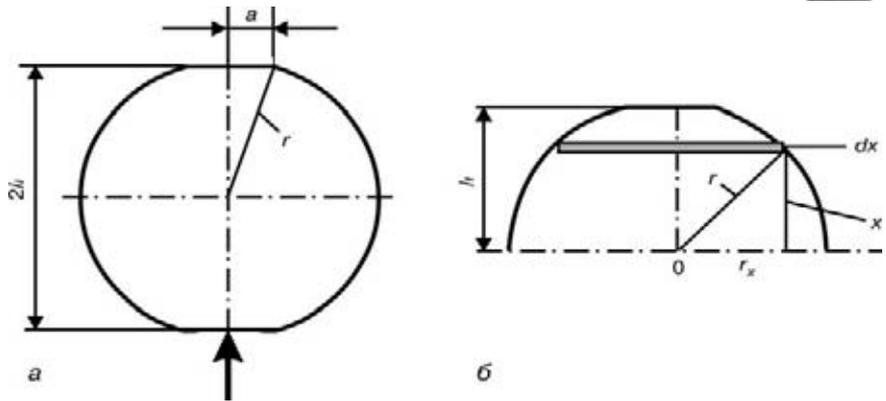


Рис. 1. Схема шарообразного зерна для расчета его электрического сопротивления: темная стрелка — направление электрического тока; остальные обозначения см. в тексте

тивление шара $R_{ш}$ увеличивается согласно нелинейному закону. Радиус контактной площадки a также влияет на сопротивление зерна, но значительно слабее.

По сравнению с работой [1], где отдельно рассматривалось сопротивление массы зерна и межзеренное контактное сопротивление или сопротивление стягивания по Хольму, здесь впервые в одном уравнении (5) представлены оба эти параметра. Не трудно увидеть, что в этом уравнении, по сравнению с (1), смещены акценты в части сопротивления массы зерна и контактного сопротивления.

Удельное электрическое сопротивление дисперсного материала

Прежде, чем приступить к описанию внешнего удельного сопротивления дробленого материала, остановимся на понятии о контактном сопротивлении. В теории контактов его рассматривают как сумму двух независимых друг от друга сопротивлений — стягивания и пленочного. Первое рассмотрено выше и, как видно из (5), нами учтено. Второе представляет собой сопротивление, оказываемое током при прохождении его через тонкие разнообразие пленки, образующиеся на контактной поверхности твердого тела в результате адсорбции различных газов и прежде всего кислорода. На поверхности металлических контактов адсорбированный кислород со временем переходит в оксидные пленки, обладающие существенным электрическим сопротивлением. Если толщина пленки не превышает 0,5 нм, то под действием туннельного эффекта ток довольно просто преодолевает эту преграду. При небольшом утолщении пленок наблюдается также их электрический пробой (фриттинг-эффект). Если же толщина пленки намного увеличится, то металлический контакт вообще может выйти из строя.

Что же касается такого материала как термоантрацит, то действие адсорбированного кислорода на формирование пленочного сопротивления совершенно не изучено. В данном случае на пленочное сопротивление существенное влияние может оказать влага, но от нее легко избавиться путем незначительного нагрева угля [4]. В связи с этим мы в своем дальнейшем анализе пленочное сопротивление на зернах термоантрацита учитывать не будем.

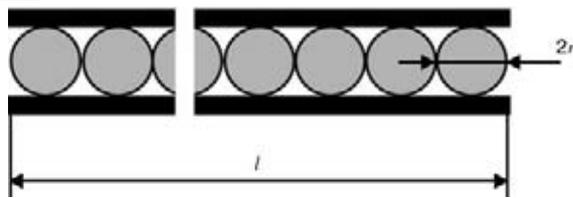


Рис. 2. Схема укладки зерен между токопроводящими плоскопараллельными пластинами

Для условий электроконтактного нагрева такое допущение вполне приемлемо.

Итак, для определения внешнего удельного сопротивления дробленого материала найдем сначала сопротивление одного слоя зерен одинакового размера. С этой целью уложим плотно зерна между двумя хорошо проводящими металлическими квадратными пластинами, как это показано на рис. 2. Длину сторон l обеих пластин выберем такой, чтобы вдоль нее разместилось достаточно большое количество n зерен, т. е. $l = 2nr$. Поскольку в электрическую цепь все зерна одного слоя включены параллельно, то сопротивление всего слоя будет составлять $\bar{R} = R_{\text{ш}}/n^2$. Оценим теперь электрическое сопротивление R_* зернистого материала, плотно уложенного в емкость, имеющую форму куба с непроводящими боковыми стенками, длина ребра которого также равна l . Электрическое сопротивление R_* представляет собой сумму n последовательно включенных сопротивлений \bar{R} . Следовательно, можно записать $R_* = n\bar{R} = R_{\text{ш}}/n$. Отсюда легко перейти к внешнему удельному сопротивлению сыпучей смеси $\rho_{\text{см}}$:

$$\rho_{\text{см}} = R_* l \quad (6)$$

Используя (5) и (6) с учетом $l = 2nr$, ниже получаем

$$\rho_{\text{см}} = \frac{4}{\pi} \rho_0 \ln \frac{2r}{a} \cong \rho_0 \ln \frac{2r}{a} \quad (7)$$

Это соотношение можно рассматривать как новое аналитическое решение поставленной в настоящей работе задачи. Как и в [1], внешнее удельное сопротивление сыпучей смеси определяется внутренним удельным сопротивлением, размерами зерна дробленого материала и контактной площадки. Однако зависимость $\rho_{\text{см}}$ от r и a в этом случае проявляется значительно слабее.

Экспериментальная проверка полученной модели

С целью проверки адекватности полученной аналитической модели (7) реальной функциональной связи $\rho_{\text{см}}$ с r нами проведены три серии измерений сопротивления зерен термоантрацита трех фракций. При этом размеры зерен в каждой фракционной группе мало отличались друг от друга (например, $r_1 = 0,2 \dots 0,5$ мм; $r_2 = 0,5 \dots 0,8$ мм; $r_3 = 0,8 \dots 1,2$ мм). Если эти зерна имеют довольно близкие размеры, то

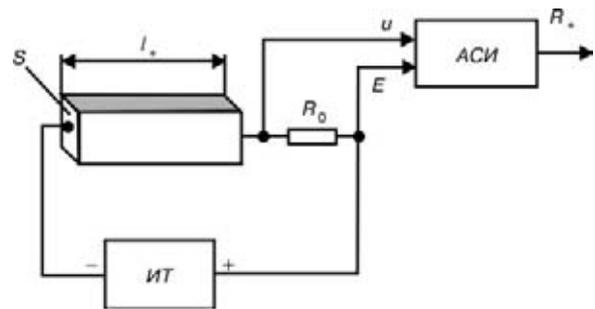


Рис. 3. Упрощенная схема измерения электрического сопротивления порошкообразного термоантрацита

можно принять, что радиусы контактных площадок a на всех зернах будут также практически одинаковыми.

Термоантрацит для приведенных экспериментов получен на предприятии «Украинский графит», степень его отжига была не известна. Измерения проводили на специальной установке, схема которой представлена на рис. 3. На этой схеме имеются следующие обозначения: S и l_* — соответственно площадь поперечного сечения контейнера для сыпучего материала ($S = 8,75 \cdot 10^{-4}$ м²) и его длина ($l_* = 0,118$ м); R_0 — эталонное сопротивление, равное 30 Ом; ИТ — источник тока; АСИ — автоматизированная система измерений, построенная на базе микро-ЭВМ LSI-11/02.

Алгоритм расчета сопротивлений R_* по автоматически измеренным значениям напряжений E и u строился по формуле

$$R_* = \frac{u}{E - u} R_0.$$

В результате измерений получены следующие пары усредненных значений (усреднение проводилось по ста измерениям для каждой фракции): $r_1 = 0,35$ мм, $R_{*1} = 56,3$ Ом; $r_2 = 0,65$ мм, $R_{*2} = 64,5$ Ом;

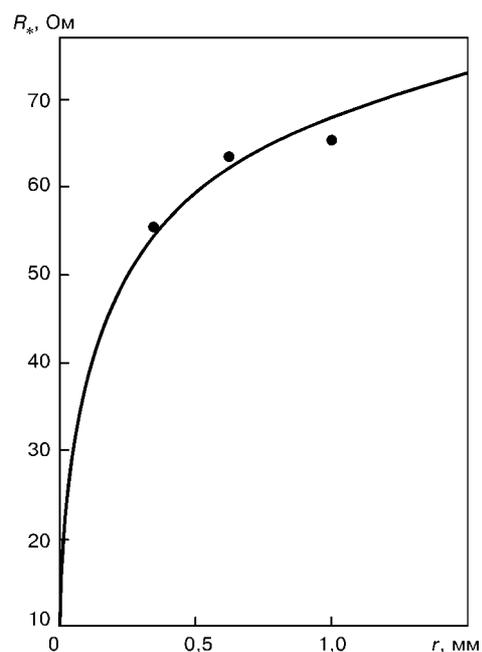


Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления дробленого термоантрацита от радиуса зерна



$r_3 = 1,0$ 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 прокаточных 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 прокали 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