

**П.В. СЕРГЕЕВ**, д-р техн. наук,

**С.Л. БУКИН**, канд. техн. наук

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет),

**С.Г. МАСЛОВ**

(Україна, Красний Луч, ЦОФ "Миусинська")

## **ЗАКОНОМЕРНОСТІ КОАГУЛЯЦІЇ ТОНКОДИСПЕРСНИХ ЧАСТИЦ ПРИ МОКРОМУ ГРОХОЧЕННІ УГЛІЙ**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* В последние годы значительно расширилась сфера применения вибрационных грохотов, которые вытесняют традиционно используемые для операции разделения по крупности тонких фракций полезных ископаемых такие машины и аппараты, как гидроциклоны и гидравлические классификаторы. Тонкое грохочение широко используется при переработке техногенных угольных месторождений, в технологических схемах обогащения руд черных и цветных металлов. На некоторых предприятиях флотацию заменяют тонким грохочением, нередко операцию тонкого грохочения объединяют с операцией обезвоживания. Однако вследствие малоэффективной работы грохотов значительно расширяется фронт грохочения, высоки капитальные и эксплуатационные расходы.

Как показывают многочисленные исследования и практика обогащения с увеличением концентрации в исходной гидросмеси тонкодисперсных частиц эффективность мокрого грохочения углей по крупности менее 100-200 мкм резко снижается. Значительная часть тонкодисперсного материала остается в надрешетном продукте грохота вследствие налипания на более крупных частицах, а также слипания (коагуляции) частиц между собой. Поэтому повышение эффективности мокрого грохочения углей с повышенным содержанием тонкодисперсных частиц является актуальной научно-технической задачей.

*Анализ исследований и публикаций.* Для тонкого мокрого грохочения применяют виброгрохоты с полупогружным ситом, грохоты с непосредственным возбуждением сита, пружинные грохоты и целый ряд других. В то же время наибольшее распространение получили вибрационные грохоты инерционного типа. Наиболее совершенные инерционные грохоты выпускает американская фирма Деррик. Наблюдаются устойчивые тенденции повышения интереса к этим грохотам в России. Однако следует признать, что до настоящего времени в Украине проблема тонкого грохочения сыпучих материалов, и в частности углей, остается нерешенной.

В работе [1] проведен анализ конструкций и результаты работы вибрационных грохотов для мокрого тонкого грохочения и определены наиболее перспективные направления развития этих машин, существенно повышающих технологические показатели:

– использование законов колебаний негармонического характера (например, полигармонических);

**Збагачення корисних копалин, 2011. – Вип. 46(87)**

## **Підготовчі процеси збагачення**

– применением устройств интенсивной гидродинамической промывки;  
– использованием высокоэффективных и надежных просеивающих поверхностей.

При реализации этих выводов процесс мокрого тонкого грохочения на перспективном виброгрохоте может быть представлен в виде следующих последовательных этапов: 1 – мокрое грохочение суспензии с высоким содержанием твердых частиц проходовой фракции; 2 – гидродинамическая промывка надрешетного продукта; 3 – мокрое грохочение суспензии с низким содержанием частиц проходовой фракции; 4 – обезвоживание надрешетного продукта.

Интенсифицируя каждый этап можно ожидать существенное повышение эффективности всего технологического процесса мокрого тонкого грохочения.

Исследованию отдельных элементов процесса посвящен ряд работ. Например, в статье [2] рассмотрена связность зернистого материала рассматривается с позиции теории аутогезии, установлено, что аутогезия зерен влажного материала обусловлена в основном силами капиллярного сцепления. С целью разрыва водных прослоек между частицами при грохочении влажных материалов крупностью менее 3-5 мм необходимо создание высоких динамических ускорений сита. Однако полученные результаты не позволяют объяснить поведение тонких твердых частиц в первой фазе процесса мокрого грохочения.

*Постановка задачи.* Целью настоящей работы является исследование закономерностей коагуляции в воде тонкодисперсных угольных частиц крупностью менее 100 мкм. Это позволит разработать динамические режимы грохочения подобных материалов с учетом их физико-химических свойств.

*Изложение материала и результаты.* В случае грохочения угля по крупности 100-200 мкм тонкодисперсные частицы выступают в роли трудных и затрудняющих процесс зерен. Кроме того, для водных суспензий этих частиц характерны все свойства грубодисперсных коллоидных систем, к которым согласно [3] относятся водные дисперсии с размером частиц твердой фазы до 100 мкм. Наиболее важными из коллоидных свойств тонкодисперсных частиц являются их высокая внешняя удельная поверхность, а также электрокинетические явления, обусловленные наличием на поверхности коллоидных частиц в воде двойного электрического слоя ионов (ДЭС).

Высокая внешняя удельная поверхность тонкодисперсных частиц угля приводит к возникновению явления ортокинетической коагуляции – прилипания тонких частиц к крупным той же природы [4]. В процессе грохочения это явление связано с налипанием тонкодисперсных частиц на поверхности более крупных зерен надрешетного продукта и сопровождается снижением эффективности грохочения по подрешетному продукту.

Эффективность грохочения тонкодисперсных частиц также зависит от их агрегативной устойчивости. Потеря агрегативной устойчивости за счет коагуляции тонкодисперсных угольных частиц между собой с образованием коагуляционных структур, остающихся в надрешетном пространстве грохота – еще одна причина снижения эффективности мокрого грохочения.

Формирование ДЭС на поверхности тонких угольных частиц в воде при-

водит к возникновению между ними специфических ионно-электростатических взаимодействий, обусловленных наличием на поверхности частиц зарядов. Вследствие одинаковой природы угольные частицы, как правило, обладают в суспензии зарядом одного знака. При этом на малых расстояниях между одноименно заряженными частицами возникают ионно-электростатические силы отталкивания, обусловленные взаимным перекрытием диффузных слоев ДЭС.

Поведение тонкодисперсных частиц в водной суспензии можно описать с позиций современной теории устойчивости лиофобных коллоидов – теории ДЛФО. Согласно этой теории, агрегативная устойчивость твердой фазы суспензии определяется результатом совместного действия межмолекулярных ван-дер-ваальсовых сил притяжения и ионно-электростатических сил отталкивания между одноименно заряженными угольными частицами [4, 5]. В зависимости от баланса этих сил в зоне контакта возникает либо положительное расклинивающее давление, препятствующее коагуляции угольных частиц, либо отрицательное, содействующее этой коагуляции.

Выражение для суммарной энергии взаимодействия двух угольных частиц  $U_p$  крупностью больше 1 мкм (радиус которых намного превышает толщину диффузной части ДЭС) и потенциалом поверхности в несколько десятков милливольт имеет следующий вид:

$$U_p = U_{эл} + U_m = \frac{64 \cdot c \cdot R \cdot T}{\chi} \cdot \gamma^2 \cdot \exp(-2 \cdot \chi \cdot h) - \frac{A_r}{h^3}, \quad (1)$$

где  $U_{эл}$  – энергия ионно-электростатического взаимодействия;  $U_m$  – энергия межмолекулярного ван-дер-ваальсового взаимодействия;  $c$  – концентрация в суспензии электролита, который определяет характеристики ДЭС;  $\chi$  и  $\gamma$  – параметры, зависящие от заряда угольных частиц и протяженности в пространстве ДЭС;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $A_r$  – константа Гамакера.

Как вытекает из уравнения (1), зависимость  $U(h)$  для  $U_{эл}$  имеет экспоненциальный, а для  $U_m$  – обратно степенной характер. Поэтому суммарная зависимость  $U_p(h)$  имеет сложный характер. Типичный пример зависимости  $U_p(h)$  приведен рис.1 [3]. Как видно, на очень малых расстояниях (от десятых долей до нескольких нанометров) между частицами возникает притяжение, которое обуславливает их необратимую коагуляцию в первичном энергетическом минимуме. На средних расстояниях ( $h \approx 10-100$  нм) между угольными частицами возникает электростатический барьер отталкивания. На больших расстояниях возникает вторичный энергетический минимум, обусловленный тем, что степенная функция ( $U_m$ ) убывает значительно медленнее, чем экспоненциальная ( $U_{эл}$ ). В результате между частичками возникает дальнейшее взаимодействие – притяжение. Частицы при этом фиксируются на расстоянии  $h_{вм}$ , которое отвечает вторичному энергетическому минимуму.

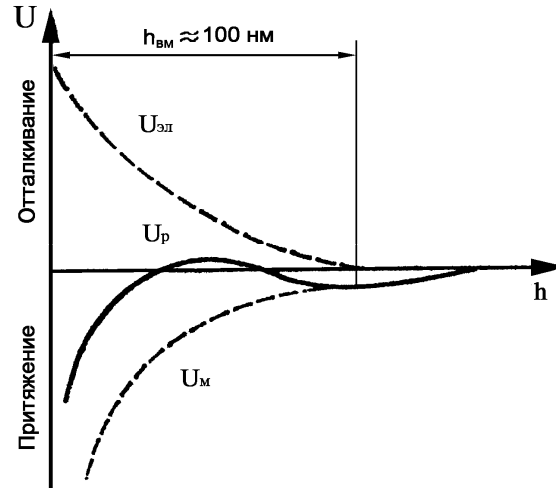


Рис. 1. Принципиальные кривые потенциальной энергии взаимодействия двух частиц в зависимости от расстояния между ними (теория ДЛФО)

Из уравнения (1) вытекает, что высота потенциального барьера и устойчивость частиц к коагуляции в первичном минимуме повышаются с увеличением размера частиц. Увеличение размеров частиц приводит также к возрастанию глубины вторичного энергетического минимума. Следовательно, по мере увеличения крупности тонкодисперсных частиц возрастает вероятность их дальнейшей коагуляции во вторичном минимуме. Коагуляция в первичном минимуме характерна для наиболее тонких частиц.

Таким образом, в процессе коагуляции угольные частицы могут фиксироваться на расстояниях, соответствующих либо первичному, либо вторичному минимуму энергетических кривых  $U(h)$ . В процессе мокрого грохочения создаваемый динамический режим колебаний должен обеспечивать разрушение коагуляционных структур обоих типов. В работе [6] показано, что энергия разрыва связей при фиксации частиц в коагулированной структуре в первичном энергетическом минимуме на два порядка больше, чем при фиксации частиц в положении вторичного минимума. Следовательно, наибольшую трудность для режима грохочения будут создавать коагуляционные структуры первого типа с фиксацией частиц в первичном энергетическом минимуме.

С целью оценки возможностей разрушения коагуляционных структур первого типа в процессе мокрого грохочения углей на вибрационных механических грохотах более детально остановимся на анализе условий их возникновения, а также факторов, влияющих на прочность этих структур. В соответствии с той же теорией ДЛФО сила взаимодействия двух сферических угольных частиц коллоидных размеров (до 100 мкм) в водной среде  $F_p$  определяется из выражения:

$$F_p = F_m + F_э = \frac{A_r \cdot r}{12 \cdot h^2} - \varepsilon_a \cdot r \cdot \varphi^2 \cdot \chi \cdot e^{-\chi \cdot h} \cdot \frac{1}{1 + e^{-\chi \cdot h}}, \quad (2)$$

## Підготовчі процеси збагачення

где  $F_m$  и  $F_э$  – силы межмолекулярного ван-дер-ваальсового и ионно-электростатического взаимодействия между частицами соответственно, Н;  $r$  – радиус угольных частиц, м;  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость воды ( $\epsilon_a = 7,26 \cdot 10^{-10}$  Ф/м);  $\phi$  – потенциал диффузной части ДЭС на поверхности угольных частиц, В;  $\chi$  – обратный дебаевский радиус,  $\chi = 1/\lambda$ , где  $\lambda$  – толщина диффузного слоя ДЭС( в большинстве случаев  $\chi = 1 \cdot 10^8$  м<sup>-1</sup>);  $h$  – расстояние между частицами, м;  $A_r$  – константа Гамакера, Дж.

На рис. 2 показаны кривые  $F(h)$ , полученные на основании уравнения (2) с использованием программы MathCAD. Зависимости получены для частиц угля диаметром 100 мкм, при потенциале их поверхности  $\phi = 100$  и константе Гамакера  $A_r = 3,5 \cdot 10^{-19}$  Дж. Как видно, сближение частиц сопровождается существенным ростом сил взаимодействия  $F_m$  и  $F_э$ . На расстоянии  $h \approx 15$  нм силы межмолекулярного ван-дер-ваальсового притяжения становятся преобладающими над ионно-электростатическими силами отталкивания. Это приводит к коагуляции угольных частиц в первичном энергетическом минимуме. При этом, чем меньше расстояние между частицами в коагулированных структурах, тем больше результирующая сила притяжения  $F_p$  и тем прочнее эти структуры. На расстояниях  $h = 15-20$  нм результирующие силы притяжения становятся бесконечно малыми. При  $h$  более 20 нм доминируют силы отталкивания  $F_э$ . Это приводит к возникновению энергетического барьера, препятствующего коагуляции угольных частиц в первичном энергетическом минимуме. Как показано в работе [7], энергетический барьер отталкивания возникает при потенциале поверхности угольных частиц более 20-50 мВ.

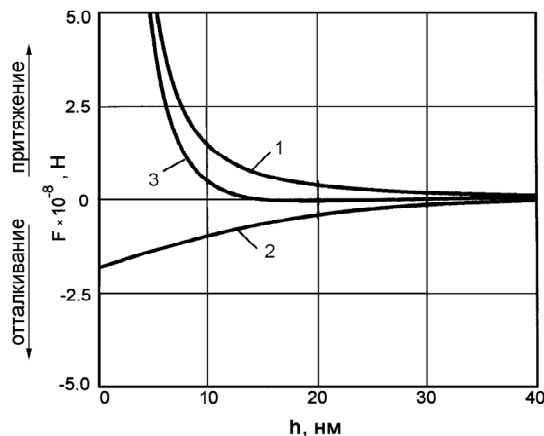


Рис. 2. Силы взаимодействия ( $F$ ) между угольными частицами в зависимости от расстояния между ними ( $h$ ):

- 1 – силы межмолекулярного ван-дер-ваальсового взаимодействия  $F_m$  (притяжения);
- 2 – силы ионно-электростатического взаимодействия  $F_э$  (отталкивания);
- 3 – результирующая сил взаимодействия  $F_p$

На рис. 3 представлены зависимости  $F_p(h)$  для двух одинаковых частиц угля диаметром 100 мкм и потенциалом их поверхности в диапазоне  $\phi = 10-150$  мВ. Как видно, уменьшение потенциала поверхности угольных час-

## Підготовчі процеси збагачення

тиці  $\varphi$  з 150 до 10 мВ приводить к увеличению расстояния фиксации частиц в первичном энергетическом минимуме с 7-8 до 35-40 нм, т.е. вероятность образования коагуляционных структур первого типа возрастает в 5 раз.

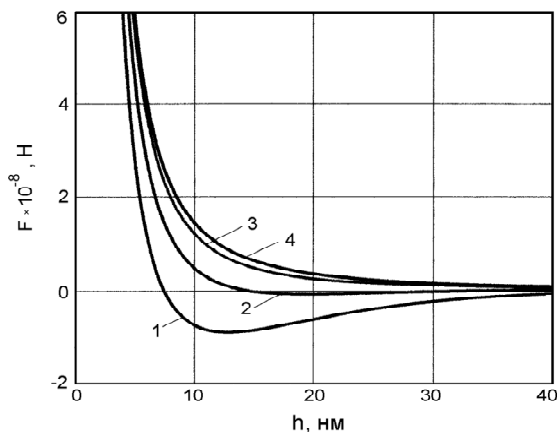


Рис. 3. Залежності  $F_p(h)$  для угольних частиць з різним потенціалом поверхні,  $\varphi$ : 1 – 150 мВ; 2 – 100 мВ; 3 – 50 мВ; 4 – 10 мВ

Следовательно, увеличение потенциала поверхности угольных частиц в водоугольной суспензии является предпосылкой повышения эффективности мокрого грохочения за счет резкого снижения вероятности образования коагуляционных структур из тонкодисперсных частиц. Увеличение потенциала поверхности частиц возможно за счет введения в водоугольную суспензию неиндифферентных реагентов-электролитов, содержащих ионы, способные избирательно сорбироваться на угольной поверхности. Эти ионы и повышают потенциал угольной поверхности.

На рис. 4 представлены зависимости  $F_p(h)$  для угольных частиц различной крупности. Потенциал поверхности частиц составлял 50 мВ.

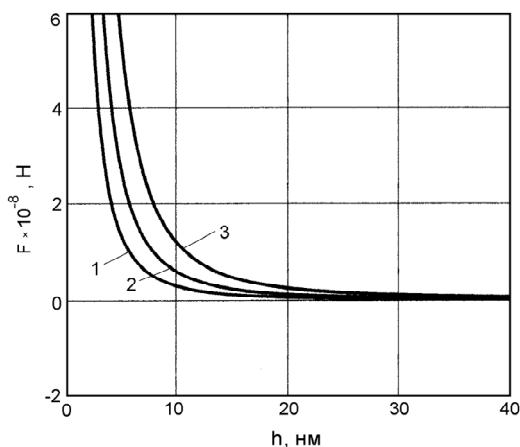


Рис. 4. Залежності  $F_p(h)$  для угольних частиць різної крупності: 1 –  $d = 100$  мкм; 2 –  $d = 50$  мкм; 3 –  $d = 25$  мкм

## Підготовчі процеси збагачення

Как видно, крупность угольных частиц в пределах  $d = 25-100$  мкм не оказывает существенного влияния на расстояние образования коагуляционных структур первого типа, которое составляет 20-30 нм. В тоже время с уменьшением крупности угольных частиц заметно возрастает прочность связи частиц в этих структурах. При фиксации частиц в коагуляционных структурах на расстояниях менее 5 нм прочность связи частиц крупностью 25 мкм по сравнению с частицами 100 мкм возрастает многократно.

Таким образом, с уменьшением крупности угольных частиц в суспензии вероятность их коагуляции в первичном потенциальном минимуме возрастает.

По-видимому, эффективность мокрого грохочения тонкодисперсного материала будет определяться соотношением между силами инерции частиц, стремящимися разрушить структуру материала на просеивающей поверхности, и силами, обеспечивающими сцепление (коагуляцию) частиц материала в этой структуре. В общем виде условие мокрого грохочения тонкодисперсной фракции исходного угля имеет вид:  $F_{ин} \geq F_p$ , где  $F_{ин}$  – сила инерции, действующая на частицы на просеивающей поверхности;  $F_p$  – результирующая сил взаимодействия между частицами.

Как известно,  $F_{ин} = m \cdot A \cdot \omega^2$ , где  $m$  – масса частицы;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega$  – частота колебаний.

Как показано выше,  $F_p$  для угольных частиц сферической формы находится из выражения:

$$F_p = \frac{A_r \cdot r}{12 \cdot h^2} - \varepsilon_a \cdot r \cdot \varphi^2 \cdot \chi \cdot e^{-\chi \cdot h} \cdot \frac{1}{1 + e^{-\chi \cdot h}},$$

Тогда для тех же частиц можно записать:

$$\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \rho \geq \frac{A_r \cdot r}{12 \cdot h^2} - \varepsilon_a \cdot r \cdot \varphi^2 \cdot \chi \cdot e^{-\chi \cdot h} \cdot \frac{1}{1 + e^{-\chi \cdot h}},$$

где  $\rho$  – плотность угля.

Разделив обе части неравенства на  $g$  и сделав небольшие преобразования, получим:

$$K_D \geq \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot g \cdot \rho \cdot r^3} \left( \frac{A_r \cdot r}{12 \cdot h^2} - \varepsilon_a \cdot r \cdot \varphi^2 \cdot \chi \cdot e^{-\chi \cdot h} \cdot \frac{1}{1 + e^{-\chi \cdot h}} \right), \quad (3)$$

где  $K_D = A \cdot \omega^2 / g$  – коэффициент динамичности.

С помощью программы MathCAD осуществлен графический анализ выражения (3) при условии полного разрыва коагуляционных структур из тонкодисперсных частиц угля плотностью  $\delta = 1500$  кг/м<sup>3</sup> при значениях  $\chi = 1 \cdot 10^8$  м<sup>-1</sup> и  $A_r = 3,5 \cdot 10^{-19}$  Дж (рис. 5).

**Збагачення корисних копалин, 2011. – Вип. 46(87)**

## Підготовчі процеси збагачення

На рис. 5а показаны зависимости  $K_D=f(h)$  для угольных частиц различной крупности с поверхностным потенциалом 50 мВ. Уменьшение расстояния между частицами в коагуляционных структурах первого типа требует значительной интенсификации динамического режима грохочения. Как видно, при обычных для механических грохотов режимах грохочения с  $K_D$  до 10, эффективный разрыв коагуляционных связей между частицами крупностью 25-100 мкм возможен при их фиксации в коагуляционных структурах на расстояниях не менее 4 нм. На меньших расстояниях наблюдается необратимая коагуляция, при которой разрыв связей между частицами внешним механическим воздействием невозможен. При этом предельное допустимое расстояние  $h$  возрастает с увеличением крупности частиц: от 4-5 нм для частиц крупностью 100 мкм до 15-16 нм в случае частиц крупностью 25 мкм.

Аналогичная закономерность наблюдается в случае частиц с потенциалом поверхности 100 мВ (рис. 5 б). Необратимая коагуляция также наблюдается при фиксации частиц в коагуляционных структурах на расстояниях менее 4 нм. Однако, как видно, при большем потенциале поверхности на расстояниях между частицами более 15-16 нм образование коагуляционных структур не происходит вообще из-за возникновения между частицами энергетического барьера отталкивания. Эта тенденция характерна для всего исследуемого диапазона крупности частиц.

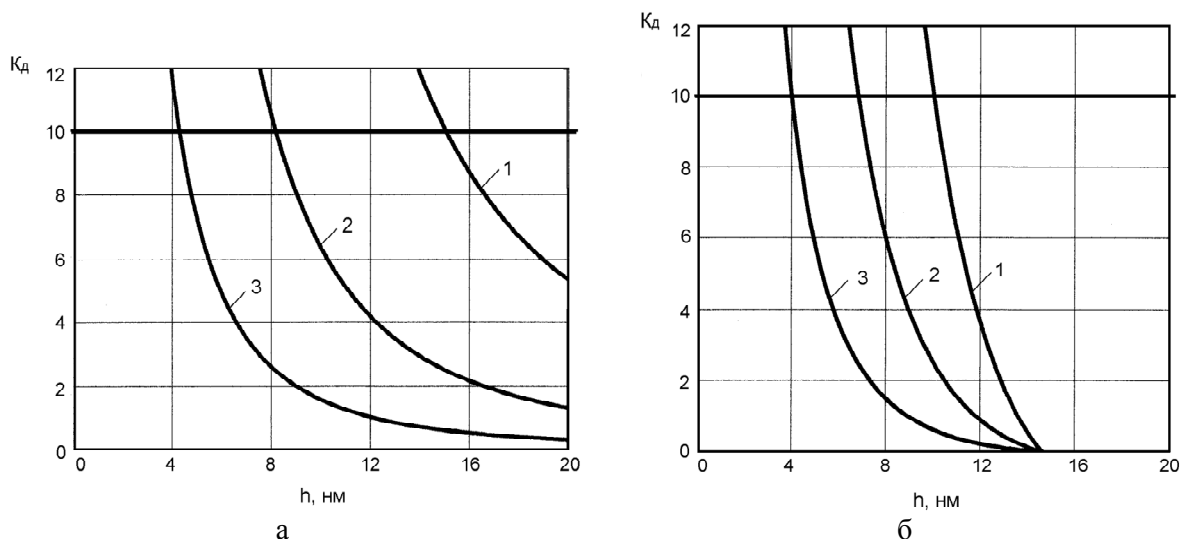


Рис. 5. Зависимости коэффициента динамичности  $K_D$  режима грохочения от расстояния между угольными частицами  $h$  в коагулированной структуре при условии распада этих структур:  
1 – частицы  $d = 25$  мкм; 2 – 50 мкм; 3 – 100 мкм;  
а – потенциал частиц  $\varphi = 50$  мВ; б –  $\varphi = 100$  мВ

### *Выводы*

1. Мокрое грохочение углей с повышенным содержанием тонкодисперсных частиц крупностью менее 100 мкм по классу 100-200 мкм требует существенного усиления динамического вибрационного режима вследствие образова-



ния коагуляционных структур, препятствующих переходу тонкодисперсных частиц в подрешетный продукт грохота.

2. При достижении режима грохочения с коэффициентом динамичности  $K_d$  до 10 возможно разрушение связи между угольными частицами при их фиксации на расстояниях не менее 4 нм. В противном случае наблюдается необратимая коагуляция угольных частиц.

3. Увеличение потенциала поверхности угольных частиц в водной суспензии с 10 до 150 мВ за счет введения неиндифферентного реагента-электролита снижает вероятность коагуляции тонкодисперсных частиц в первичном энергетическом минимуме примерно в 5 раз. При этом на расстояниях между частицами более 15-16 нм их коагуляция не происходит вследствие возникновения энергетического барьера отталкивания.

### **Список литературы**

1. **Маслов С.Г.** Инновационные решения в области тонкого грохочения сыпучих материалов // Машиностроение и техносфера: Сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк, 2010. – С. 169-171.

2. **Сергеев П.В., Букин С.Л., Соломичев Н.Н.** Влияние на процесс грохочения структурно-механических свойств зернистых материалов // Тр. ДонГТУ. – 1999. – Вып. 7. – С. 204-209.

3. **Фролов Ю.Г.** Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы). – М.: Химия, 1982. – 400 с

4. **Фридрихсберг Д.А.** Курс коллоидной химии. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.

5. **Дерягин Б.В.** Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. – М.: Наука, 1986. – 206 с.

6. **Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А.** Коагуляционные контакты в дисперсных системах. – М.: Химия, 1982. – 185 с.

7. **Сергеев П.В.** Розвиток наукових основ селективної флокуляції вугілля гідрофобними органічними реагентами: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Д.: НГУ, 2008. – 36 с.

© Сергеев П.В., Букин С.Л., Маслов С.Г., 2011

*Надійшла до редколегії 13.09.2011 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.І. Назимко*