

П.В. СЕРГЕЕВ, д-р техн. наук,

С.Л. БУКИН, канд. техн. наук,

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

С.Г. МАСЛОВ

(Украина, Красный Луч, ЦОФ «Миуссинская»)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОАГУЛЯЦИИ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ МОКРОМ ГРОХОЧЕНИИ УГЛЕЙ

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);
- 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 приводит 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 вандер-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 вандер-ваальсового взаимодействия; c – концентрация в суспензии электролита, который определяет характеристики ДЭС; χ и γ – параметры, зависящие от заряда угольных частиц и протяженности в пространстве ДЭС; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; A_r – константа Гамма-кера.

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.

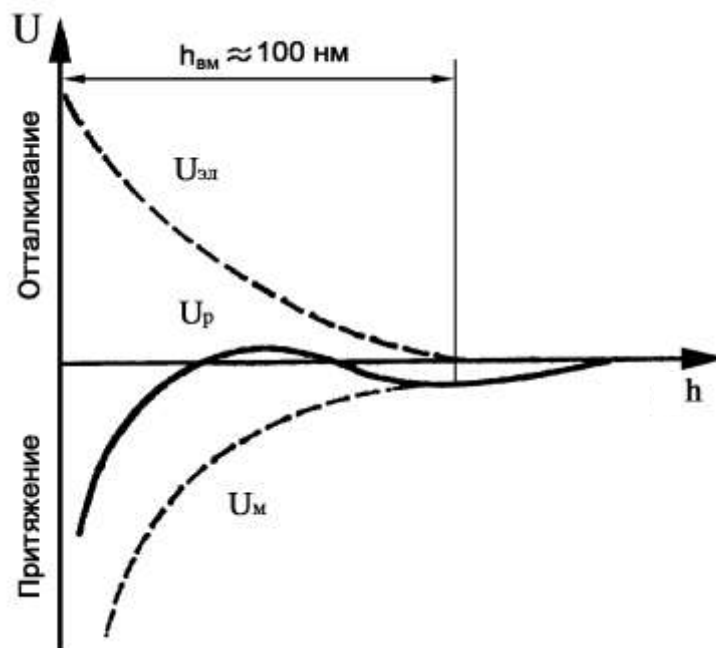


Рис1. Принципиальные кривые потенциальной энергии взаимодействия двух частиц в зависимости от расстояния между ними (теория ДЛФО).

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 дальней 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:

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

где F_m и $F_э$ – силы межмолекулярного ван-дер-ваальсового и ионно-электростатического взаимодействия между частицами соответственно, Н; r – радиус угольных частиц, м; ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость воды ($\varepsilon_a = 7,26 \cdot 10^{-10}$ Ф/м); φ – потенциал диффузной части ДЭС на поверхности угольных частиц, В; χ – обратный дебаевский радиус, $\chi = 1/\lambda$, где λ – толщина диффузного слоя ДЭС (в большинстве случаев $\chi = 1 \cdot 10^8$ м⁻¹); 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 $\varphi = 100$ мВ 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

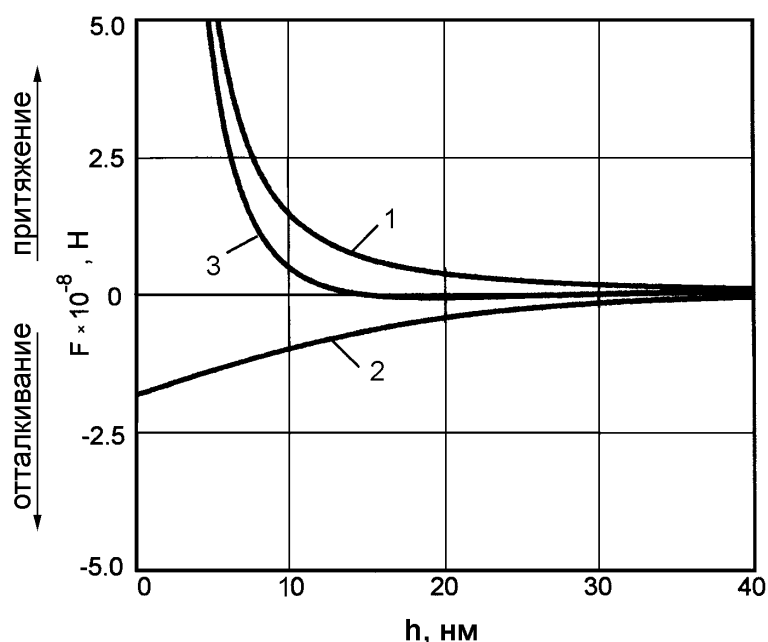


Рис.2 Силы взаимодействия (F) между угольными частицами в зависимости от расстояния между ними (h):

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

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 пока-

зано в работе [7], энергетический барьер отталкивания возникает при потенциале поверхности угольных частиц более 20-50 мВ.

На рис.3 представлены зависимости $F_p(h)$ для двух одинаковых частиц угля диаметром 100 мкм и потенциалом их поверхности в диапазоне $\varphi = 10$ -150 мВ. Как видно, уменьшение потенциала поверхности угольных частиц φ с 150 до 10 мВ приводит к увеличению расстояния фиксации частиц в первичном

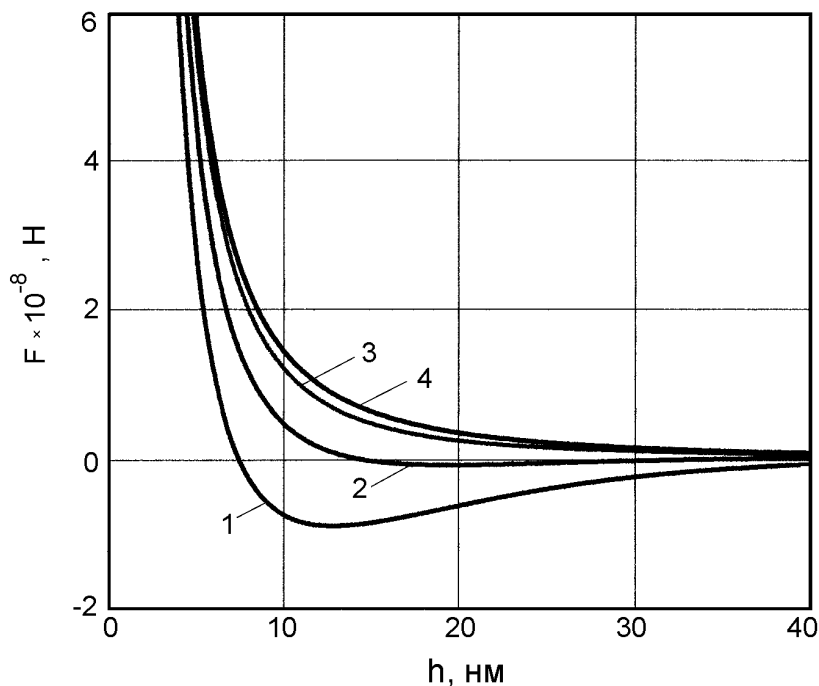


Рис. 1.3 Зависимости $F_p(h)$ для угольных частиц с различным потенциалом поверхности, φ :
1 – 150 мВ; 2- 100 мВ; 3 – 50 мВ; 4 – 10 мВ.

энергетическом минимуме с 7-8 до 35-40 нм, т.е. вероятность образования коагуляционных структур первого типа возрастает в 5 раз. 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.

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

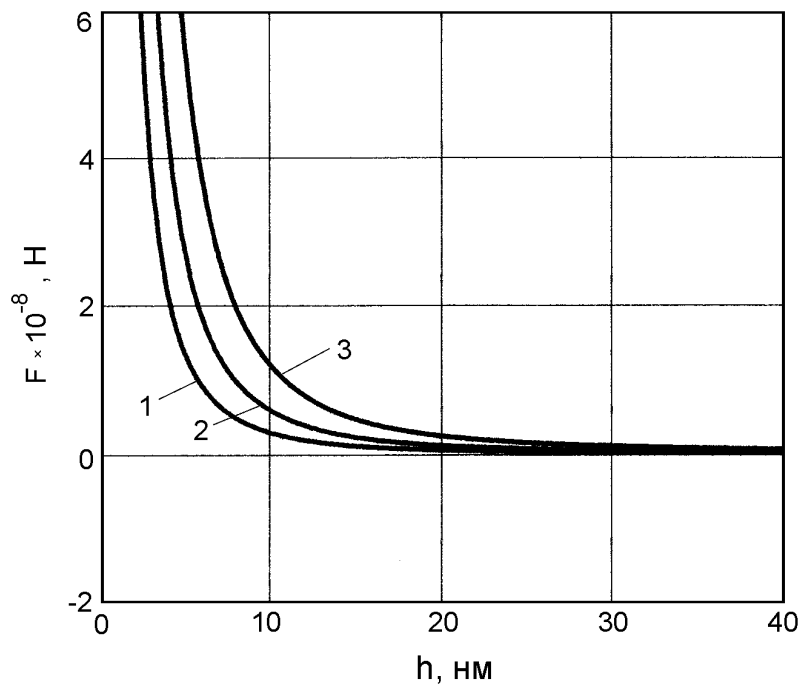


Рис.4 Зависимости $F_p(h)$ для угольных частиц различной крупности:
1- $d = 100$ мкм; 2 - $d = 50$ мкм; 3 - $d = 25$ мкм.

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; ω - 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 ρ - 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 $\delta = 1500 \text{ кг/м}^3$ при значениях $\chi = 1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$ и $A_r = 3,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ (см.рис.5).

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 (см.рис.5б). 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.

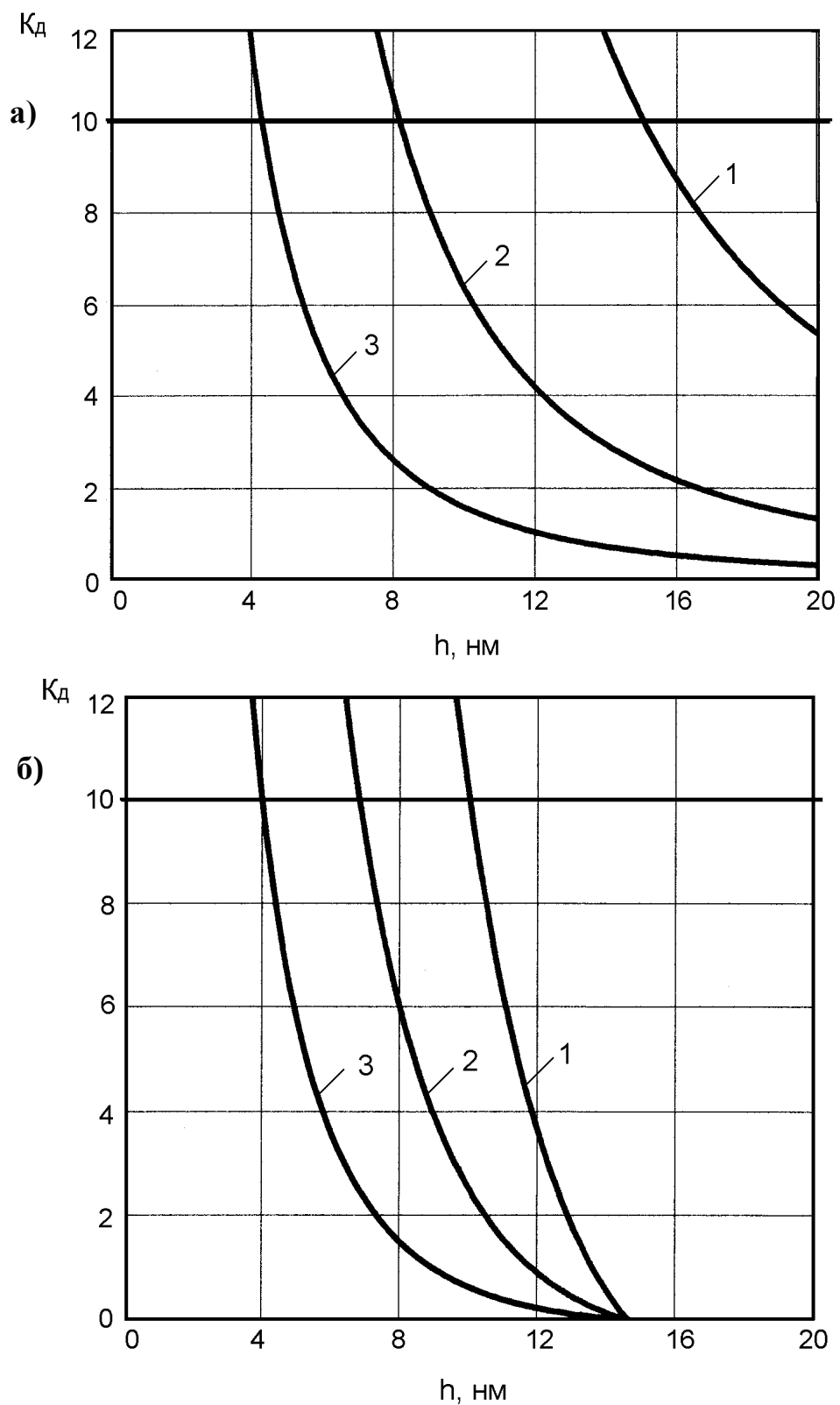


Рис.5 Зависимости коэффициента динамичности K_d режима грохочения от расстояния между угольными частицами h в коагулированной структуре при условии распада этих структур:
 1- частицы $d = 25$ мкм; 2 – 50 мкм; 3 – 100 мкм;
 а – потенциал частиц $\phi = 50$ мВ; б - $\phi = 100$ мВ.

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 образования 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. трудов XVII международной научно-технической конференции. Донецк, - 2010. –С. 169-171.
2. **Сергеев П.В., Букин С.Л., Соломичев Н.Н.** Влияние на процесс грохочения структурно-механических свойств зернистых материалов // Труды ДонГТУ. – Вып. 7, 1999. – 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. дисерт. на здоб. наук. ступ. докт. техн. наук. – Дніпропетровськ, 2008.- 36с.

Надійшла до редколегії

УДК 622.7

Сергеев П.В., Букин С.Л., Маслов С.Г. Закономерности коагуляции тонкодисперсных частиц при мокром грохочении углей // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн.зб.- 2011.- вип. С. .

На основе теории устойчивости лиофобных тонкодисперсных систем (теории ДЛФО) дан анализ закономерностей коагуляции угольных частиц крупностью менее 100 мкм в водной среде. Определены условия необратимой коагуляции этих частиц в процессе мокрого грохочения. Установлены предельные значения коэффициента динамичности режима грохочения, при которых достигается разрушение коагуляционных структур.

На основі теорії стійкості ліофобних тонкодисперсних систем (теорії ДЛФО) дано аналіз закономірностей коагуляції вугільних частинок крупністю менше 100 мкм у водному середовищі. Визначені умови незворотної коагуляції цих частинок в процесі мокрого грохочення. Встановлені граничні значення коефіцієнта динамічності режиму грохочення, при яких досягається руйнування коагуляційних структур.