

УДК 622.7

Е.Н. Липная, П.П. Ананьев

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ЧАСТИЦ МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Семинар № 22

**Р**ассмотрим две частицы магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и кварца ( $\text{SiO}_2$ ) (рис. 1) с произвольными размерами  $d_1$ ,  $l_1$  и  $d_2$ ,  $l_2$  соответственно. Отношение их линейных размеров обозначим  $n_1$  и  $n_2$ , то есть  $\frac{l_1}{d_1} = n_1$  и  $\frac{l_2}{d_2} = n_2$ . Частицы нахо-

дятся на расстоянии  $r_0$  друг от друга и обладают поверхностным зарядом  $q_1$  и  $q_2$  соответственно. Причины образования электрического заряда на поверхности частиц могут иметь различную природу, а именно: за счет трибоэлектрического эффекта; пьезоэлектрического эффекта, возникающего при деформировании кварца и других минералов – пьезоэлектриков; за счет наличия дислокаций, имеющих нескомпенсированный заряд; эффекта Степанова, характеризующий появление поверхностного заряда при деформации ионов кристаллов и др.

В положении равновесия ближайшие частицы должны отстоять друг от друга не далее, чем расположена точка перегиба  $r_1$  на кривой, изображающей зависимость энергий притяжения и отталкивания ( $W$ ) двух частиц между собой, в зависимости от расстояния между ними и имеет вид, приведенный на рис. 2, где  $r_0$  – это равновесное расстояние между частицами, когда равнодействующая энергий отталкивания и притяжения между частицами минимальна, то есть система находится в потенциальной яме [4].

Известно, что сила взаимодействия между узлами кристаллической решетки в минерале равна производной энергии их взаимодействия по расстоянию, взятой со знаком минус, то есть  $F = -\frac{\partial W}{\partial r}$ .

Эта зависимость имеет вид, приведенный на рис. 3. При расстоянии между узлами кристаллической решетки  $r < r_0$  преобладают силы отталкивания между ними, а при  $r > r_0$  – силы притяжения.

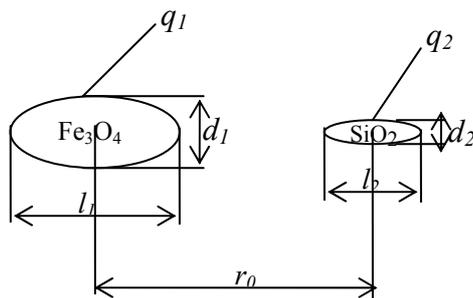
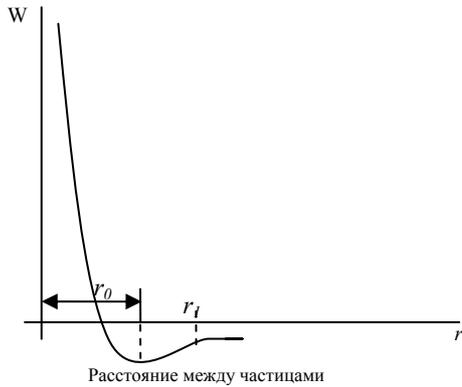
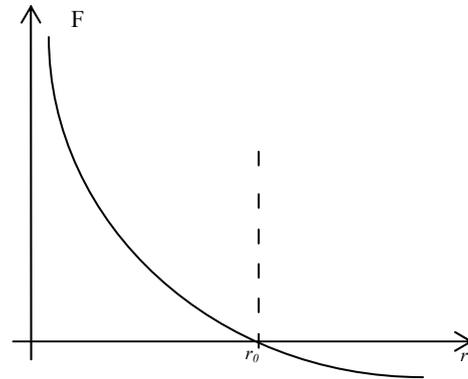


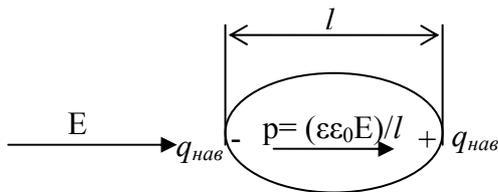
Рис. 1. Система двух частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{SiO}_2$ .



**Рис. 2. Зависимость энергии взаимодействия двух частиц от расстояния между ними**



**Рис. 3. Зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между узлами кристаллической решетки минералов**



**Рис. 4. Частица, помещенная в электрическое поле**

Естественно предположить, что сила взаимодействия между частицами, имеющими различный заряд, подчиняется аналогичной зависимости.

Условием взаимодействия двух частиц (флокуляция за счет сил электростатического притяжения) является  $F_{эл} > F_{отталк}$ . Условием дефлокуляции (разрушение флокул) является  $F_{отталк} > F_{эл}$ .

Рассмотрим, как изменяются заряды на поверхности частиц при помещении их в электрическое поле с напряженностью, изменяющейся во времени как  $E(t)$ . Незаряженный диполь начинает поляризоваться и на поверхности частиц возникают наведенные заряды  $q_{нав}$  (рис. 4), где  $p$  – поляризация внутреннего поля [5].

При этом момент поляризации ( $M_p$ ) частицы равен:

$$M_p = p \times V = \frac{4}{3} \pi \varepsilon_0 \varepsilon E d^2 = \frac{4}{3} \pi \varepsilon_0 \varepsilon E \frac{l^2}{n^2}. \quad (1)$$

С другой стороны момент поляризации равен:

$$M_p = q_{нав} \times l. \quad (2)$$

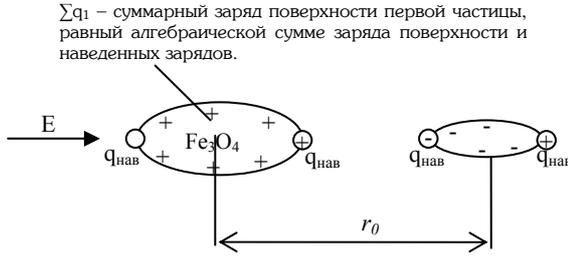
Из приведенных уравнений следует, что

$$q_{нав} = \frac{M_p}{l} = \frac{4}{3} \pi \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E l^2}{n^2 l} = \frac{4}{3} \pi \varepsilon_0 \varepsilon E \frac{l}{n^2}. \quad (3)$$

Заряды поверхности системы двух частиц при помещении их в электрическое поле примут значения, приведенные на рис. 5.

Обозначим  $q$  - заряд поверхности без воздействия электрическим полем;  $\bar{q}$  - удельная плотность заряда.

**Рис. 5. Заряды поверхности системы двух частиц находящейся в электрическом поле**



Найдем суммарный заряд поверхности каждой из частиц без воздействия электрического поля.

$$q_1 = \bar{q}_1 2\pi d_1 \left( d_1 + \frac{l_1^2}{\sqrt{l_1^2 - d_1^2}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{l_1^2 - d_1^2}}{l_1} \right) \right) = \bar{q}_1 2\pi d_1^2 \left( 1 + \frac{n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - 1}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{n_1^2 - 1}}{n_1} \right) \right) -$$

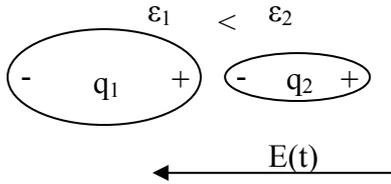
для частицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (4)

$$q_2 = \bar{q}_2 2\pi d_2 \left( d_2 + \frac{l_2^2}{\sqrt{l_2^2 - d_2^2}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{l_2^2 - d_2^2}}{l_2} \right) \right) = \bar{q}_2 2\pi d_2^2 \left( 1 + \frac{n_2^2}{\sqrt{n_2^2 - 1}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{n_2^2 - 1}}{n_2} \right) \right) -$$

для частицы  $\text{SiO}_2$  (5)

Тогда сила электростатического взаимодействия частиц в электрическом поле будет равна

$$F_{эл} = \frac{\Sigma q_1 \Sigma q_2}{\epsilon_0 r^2} = \frac{(q_1 + q_{1нав})(q_2 + q_{2нав})}{\epsilon_0 r^2}, \quad (6)$$



$$q_{1нав} = \epsilon_0 \epsilon_1 E(t) d_1^2, \quad (7)$$

$$q_{2нав} = \epsilon_0 \epsilon_2 E(t) d_2^2, \quad (8)$$

Тогда суммарный заряд поверхности частиц с учетом направления подачи электрического поля будет равен

$$\Sigma q_1 = \bar{q}_1 2\pi d_1^2 \left( 1 + \frac{n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - 1}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{n_1^2 - 1}}{n_1} \right) \right) - \epsilon_0 \epsilon_1 E(t) d_1^2, \quad (9)$$

$$\Sigma q_2 = -\bar{q}_2 2\pi d_2^2 \left( 1 + \frac{n_2^2}{\sqrt{n_2^2 - 1}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{n_2^2 - 1}}{n_2} \right) \right) + \epsilon_0 \epsilon_2 E(t) d_2^2. \quad (10)$$

Для того чтобы упростить выражения (9) и (10), введем обозначения

$$k_1 = 1 + \frac{n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - 1}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{n_1^2 - 1}}{n_1} \right), \quad (11)$$

$$k_2 = 1 + \frac{n_2^2}{\sqrt{n_2^2 - 1}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{n_2^2 - 1}}{n_2} \right), \quad (12)$$

выражения примут следующий вид:

$$\Sigma q_1 = \bar{q}_1 2\pi d_1^2 k_1 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 E(t) d_1^2, \quad (13)$$

$$\Sigma q_2 = -\bar{q}_2 2\pi d_2^2 k_2 + \varepsilon_0 \varepsilon_2 E(t) d_2^2. \quad (14)$$

Подставляя значения (13) и (14) в формулу (6), получим силу электростатического взаимодействия рудной и нерудной частицы:

$$F_{\text{эл}} = \frac{(2\pi \bar{q}_1 d_1^2 k_1 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 E d_1^2)(-2\pi \bar{q}_2 d_2^2 k_2 + \varepsilon_0 \varepsilon_2 E d_2^2)}{\varepsilon_0 r_0^2}, \quad (15)$$

$$F_{\text{эл}} = \frac{1}{r_0^2 \varepsilon_0} \left\{ -4\pi^2 \bar{q}_1 \bar{q}_2 d_1^2 d_2^2 k_1 k_2 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 E d_1^2 \bar{q}_2 2\pi d_2^2 k_2 + 2\pi \bar{q}_1 d_1^2 k_1 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E d_2^2 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 d_1^2 d_2^2 \right\},$$

$$F_{\text{эл}} = \frac{1}{r_0^2 \varepsilon_0} \left\{ -4\pi^2 \bar{q}_1 \bar{q}_2 d_1^2 d_2^2 k_1 k_2 + 2\pi \varepsilon_0 E d_1^2 d_2^2 (\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1) - \varepsilon_0^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 d_1^2 d_2^2 E^2 \right\},$$

раскрыв скобки и преобразовав выражение получим:

$$F_{\text{эл}} = \frac{d_1^2 d_2^2}{r_0^2 \varepsilon_0} \left\{ 2\pi \varepsilon_0 E (\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1) - (4\pi^2 \bar{q}_1 \bar{q}_2 k_1 k_2 + \varepsilon_0^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 E^2) \right\}. \quad (16)$$

Вес частицы кварца (мелкая частица):

$$m_2 g = \frac{4\pi d_2^2}{3} l_2 \rho_2 g = \frac{4\pi}{3} d_2^3 n_2 \rho_2 g \quad (17)$$

Для оценки силы взаимодействия частиц выразим отношение силы электростатического взаимодействия частиц к весу малой (нерудной) частицы:

$$\frac{F_{\text{эл}}}{m_2 g} = \frac{d_1^2 d_2^2 2\pi}{r_0^2 \frac{4\pi}{3} d_2^3 n_2 \rho_2 g} \left\{ E (\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1) - \left( \frac{2\pi \bar{q}_1 \bar{q}_2}{\varepsilon_0} k_1 k_2 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 E^2}{2\pi} \right) \right\} \quad (18)$$

$$\bar{F} = \frac{F_{\text{эл}}}{m_2 g} = \frac{3d_1^2}{2r_0^2 d_2 n_2 \rho_2 g} \left\{ E (\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1) - \left( \frac{2\pi \bar{q}_1 \bar{q}_2}{\varepsilon_0} k_1 k_2 \right) - \left( \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{2\pi} \right) E^2 \right\} \quad (19)$$

Введем обозначения:

$$a = \frac{2\pi \bar{q}_1 \bar{q}_2}{\varepsilon_0} k_1 k_2, \quad (20)$$

$$b = \varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1, \quad (21)$$

$$c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{2\pi}, \quad (22)$$

тогда

$$\bar{F} = \frac{3d_1^2}{2r_0^2 d_2 n_2 \rho_2 g} \{-a + bE - cE^2\}, \quad A = \frac{3d_1^2}{2r_0^2 d_2 n_2 \rho_2 g}. \quad (23)$$

Для определения максимального и минимального значения поля  $E(t)$  необходимо решить квадратное уравнение:

$$-a + bE - cE^2 = 0, \quad cE^2 - bE + a = 0, \quad E = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}$$

Следовательно,

$$E_{\text{max}} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}, \quad E_{\text{min}} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c} \quad (24)$$

Необходимые условия дефлокуляции находим, подставив значения (20), (21), (22):

$$b^2 > 4ac,$$

$$(\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1)^2 > \frac{8\pi \bar{q}_1 \bar{q}_2 k_1 k_2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_0 2\pi},$$

$$\begin{aligned} (\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1)^2 &> 4\bar{q}_1 \bar{q}_2 k_1 k_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2, \\ \varepsilon_1^2 \bar{q}_2^2 k_2^2 + \varepsilon_2^2 \bar{q}_1^2 k_1^2 + 2\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1 &> 4\bar{q}_1 \bar{q}_2 k_1 k_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2, \\ \varepsilon_1^2 \bar{q}_2^2 k_2^2 - 2\bar{q}_1 \bar{q}_2 k_1 k_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2 \bar{q}_1^2 k_1^2 &> 0, \end{aligned}$$

$$(\varepsilon_1 \bar{q}_2 k_2 - \varepsilon_2 \bar{q}_1 k_1)^2 > 0 \quad (25)$$

Из полученной зависимости видно, что она имеет параболический вид. Исследуем эту зависимость на экстремум, найдем точки пересечения с осью  $ox$ :

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial E} = 0, \quad b - 2cE = 0, \quad \bar{F} = \bar{F}_{\max} \text{ при } E_{cp} = \frac{b}{2c}.$$

Сила флокуляции (при  $E=0$ ) равна:

$$F = Aa \quad (26)$$

$$y = -a + bx - cx^2, \quad \text{при } x=0, \quad y = -a$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = b - 2cx \Rightarrow x = \frac{b}{2c}$$

$$y = -a + \frac{b^2}{2c} - \frac{b^2}{4c^2} = -a + \frac{b^2}{4c},$$

$$F_{\max} = A \left( \frac{b^2}{4c} - a \right) = \frac{b^2}{4c} A - aA \quad (27)$$

В рассмотренных формулах  $r_0$  – расстояние между центрами взаимодействующих частиц.

Напряженность электрического поля на расстоянии  $r_0$  от заряда  $q_1$ .

$$E = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_0^2} = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon \left( \Delta + \frac{l}{2} \right)^2}, \quad (28)$$

где  $\Delta$  – расстояние от поверхности заряженной частицы.

$$F_{\text{эл}} = q_2 E = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon \left( \Delta + \frac{l}{2} \right)^2}, \quad (29)$$

$$\text{где } q_1 = 2\pi \bar{q}_1 d_1 \left( d_1 + \frac{l_1^2}{\sqrt{l_1^2 - d_1^2}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{l_1^2 - d_1^2}}{l_1} \right) \right) = 2\bar{q}_1 \pi d_1^2 k_1 \quad (30)$$

$$q_2 = 2\pi \bar{q}_2 d_2 \left( d_2 + \frac{l_2^2}{\sqrt{l_2^2 - d_2^2}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{l_2^2 - d_2^2}}{l_2} \right) \right) = 2\bar{q}_2 \pi d_2^2 k_2 \quad (31)$$

$$r_0 = \Delta + \frac{l}{2} = \Delta + \frac{dn}{2}, \quad (32)$$

где значением  $\Delta$  можно пренебречь, т.к. расстояние между взаимодействующими частицами мало (порядок толщины ДЭС), тогда формула (23) будет иметь вид:

$$A = \frac{3d_1^2}{2d_2 n_2 \rho_2 g \frac{d_1^2 n_1^2}{4}} = \frac{6}{d_2 n_2 \rho_2 g n_1^2}. \quad (33)$$

Примем данные для примерной оценки величины напряженности электрического поля необходимой для дефлокуляции частиц: размер частицы магнетита (крупная частица)  $d_1 = 3 \cdot 10^{-5}$  м, размер частицы кварца (мелкая частица)  $d_2 = 3 \cdot 10^{-6}$  м, коэффициент, зависящий от формы частиц  $n_{1,2} = 3$ , плотность дислокаций в магнетите  $a_m = 6,71 \cdot 10^{11}$  шт/см<sup>2</sup> =  $6,7 \cdot 10^{15}$  шт/м<sup>2</sup>, плотность дислокаций в кварце  $a_k = 5,85 \cdot 10^{11}$  шт/см<sup>2</sup> [3].

В ряде работ проводятся исследования по определению заряда дислокации. Согласно [2], значение электрического заряда на единицу длины дислокации при комнатной температуре находится в диапазоне  $10^{-12} - 10^{-10}$  К/м. Для расчетов принимаем, что линейная плотность заряда дислокаций составляет в среднем  $10^{-10}$  К/м. Межатомное расстояние равно  $3 \cdot 10^{-10}$  м, тогда заряд межатомного расстояния можно определить:

$$q = 10^{-10} \text{ К/м} \cdot 3 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3 \cdot 10^{-20} \text{ К},$$

$$\text{а удельный заряд поверхности } \bar{q}_{1,2} = 6,7 \cdot 10^{15} \text{ шт/м}^2 \cdot 3 \cdot 10^{-20} \text{ К} = 20,1 \cdot 10^{-5} \text{ К/м}^2$$

Диэлектрическую проницаемость магнетита примем за  $\epsilon_1 = 60$ , кварца -  $\epsilon_2 = 4$ ;

Электрическая постоянная равна  $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$  ф/м.

Подставим значения в формулу (23) и найдем А:

$$A = \frac{6}{3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 3^2} = 0,03 \cdot 10^2 = 3.$$

$$\text{Если } E=0, \text{ тогда } \frac{F_{\text{эл}}}{m_2 g} = -Aa.$$

Если  $n_1 = n_2$ , то  $k_1 = k_2$ .

$$k_{1,2} = \left( 1 + \frac{n_{1,2}^2}{\sqrt{n_{1,2}^2 - 1}} \arcsin \left( \frac{\sqrt{n_{1,2}^2 - 1}}{n_{1,2}} \right) \right) = \left( 1 + \frac{9}{\sqrt{8}} \arcsin \frac{\sqrt{8}}{3} \right) = 1 + 3,18 \cdot 0,35 = 2,11.$$

Подставим значения в формулу (20), (21), (22) получим:

$$a = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20,1^2 \cdot 10^{-10} \cdot 2,11 \cdot 2,11}{8,8 \cdot 10^{-12}} = 12,8 \cdot 10^4,$$

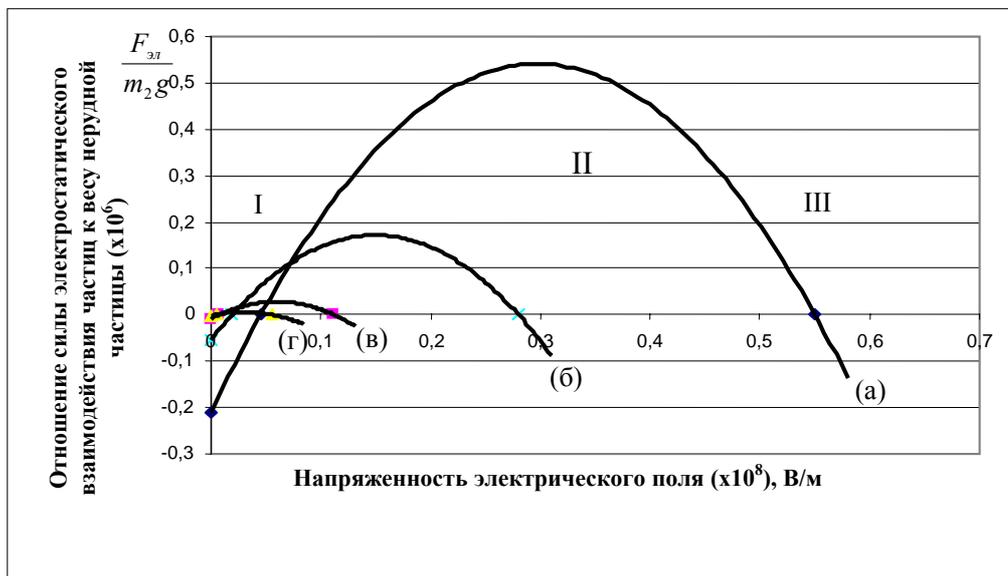
$$b = \epsilon_1 \bar{q}_2 k_2 + \epsilon_2 \bar{q}_1 k_1 = (60 + 4) \cdot 2,11 \cdot 20,1 \cdot 10^{-5} = 2,7 \cdot 10^{-2};$$

$$c = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2}{2\pi} = \frac{8,8 \cdot 60 \cdot 4 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 3,14} = 336,3 \cdot 10^{-12} = 3,36 \cdot 10^{-10}.$$

$$\text{При } E=0, \frac{F_{\text{эл}}}{m_2 g} = -12,8 \cdot 10^4 \cdot 3 = -38,4 \cdot 10^4 = -3,84 \cdot 10^5$$

(Сила флокуляции без учета воды ДЭС)

$$E_{\text{сп}} = \frac{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}{2}.$$



**Рис. 7.** Диапазон напряженности электрического поля, необходимый для дефлокуляции частиц магнетита и кварца. (I, III – зона больших и маленьких полей, где процесс дефлокуляции не происходит; II – зона, где происходит процесс дефлокуляции), плотность дислокаций в магнетите  $a_m = 6,7 \cdot 10^{15}$  шт/м<sup>2</sup> (а),  $a_m = 2,5 \cdot 10^{15}$  шт/м<sup>2</sup> (б),  $a_m = 0,5 \cdot 10^{15}$  шт/м<sup>2</sup> (в),  $a_m = 10^{15}$  шт/м<sup>2</sup> (г)

Подставляя оценочные данные в формулу (27), получим значение силы слияния частиц

$$F_{\max} = 3 \left( \frac{7,29 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 3,36 \cdot 10^{-10}} - 12,8 \cdot 10^4 \right) = 3(54 \cdot 10^4 - 12,8 \cdot 10^4) = 1,24 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчет значений  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$ :

$$E_{\max} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} + \sqrt{7,29 \cdot 10^{-4} - 172,03 \cdot 10^{-6}}}{6,72 \cdot 10^{-10}} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} + 2,36 \cdot 10^{-2}}{6,72 \cdot 10^{-10}} = 0,75 \cdot 10^8 \text{ В/м}$$

$$E_{\min} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} - \sqrt{7,29 \cdot 10^{-4} - 1,72 \cdot 10^{-4}}}{6,72 \cdot 10^{-10}} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} - 2,36 \cdot 10^{-2}}{6,72 \cdot 10^{-10}} = 0,05 \cdot 10^8 \text{ В/м}$$

Отношение силы электростатического взаимодействия частиц к весу нерудной частицы было оценено для различных значений напряженности электрического поля, в результате чего получена закономерность параболического характера, определяющая диапазон значений напряженности электрического поля необходимой для разрушения флоккул (рис. 7).

Диапазон значений напряженности электрического поля получен при следующих исходных данных: плотность дислокаций в кварце  $a_k = 5,85 \cdot 10^{15}$  шт/м<sup>2</sup>; удельный заряд поверхности  $\bar{q}_{1,2} = 6,7 \cdot 10^{15}$  шт/м<sup>2</sup>  $\cdot 3 \cdot 10^{-20}$  К =  $20,1 \cdot 10^{-5}$  К/м<sup>2</sup>; время необходимое для воздействий –  $0,4 \cdot 10^{-6}$  сек; удельное усилие отталкивания частиц –  $39 \cdot 10^3$  Н/м<sup>2</sup>.

Установленный диапазон рациональных значений величины внешнего электрического поля, обеспечивающий процесс дефлокуляции (зона отталкивания) в зависимости от плотности дислокаций (т.е. величины остаточных деформаций минералов), с учетом их диэлектрических свойств, размера и формы частиц показывает, что увеличение плотности дислокаций потребует больших значений напряженности электрического поля необходимой для обработки материала.

Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями, которые будут опубликованы в следующей статье.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тяпунина Н.А., Белозерова Э.П. Заряженные дислокации и свойства щелочногалогидных кристаллов // Успехи физических наук, том 156, вып.4, 1988, №12, С. 683-717.
2. Судзуки Т., Есиага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность: Пер. с япон. – М.: Мир, 1989. – С. 18-19, 155.
3. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Иванов В.Ю. Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей. – М.: МГУ, 2006. – С. 41-47.
4. Павинский П.П. Введение в теорию твердого тела: Учеб. пособие. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1979. – С. 73.
5. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1974. **ИДБ**

#### Коротко об авторах

Липная Е.Н. – аспирант, Московский государственный горный университет  
Ананьев П.П. – кандидат технических наук, генеральный директор НП «Центр инновационных горных технологий».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 22 симпозиума «Неделя горняка-2009». Рецензент д-р техн. наук, проф. Л.И. Кантович.



---

#### РУКОПИСИ,

#### ДЕПониРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

3. Эквист Б.В. Расчет параметров буровзрывных работ для предприятия ООО «Юнъягинское» с учетом сейсмостойкости расположенных рядом охраняемых объектов (685/05-09 – 16.03.09) 6 с.
4. Эквист Б.В. Метод определения горной породы и руды во взрывном забое (686/05-09 – 16.03.09) 1 с.