

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ТАЛЬКА С ПУЗЫРЬКАМИ ВОЗДУХА В ПРИСУТСТВИИ ДЕПРЕССОРА КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.А. Лавриненко<sup>1</sup>, Г.Ю. Гольберг<sup>1</sup>, Э.А. Шрадер<sup>1</sup>, Л.М. Саркисова<sup>1</sup>, И.Н. Кузнецова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИПКОН РАН, Москва, Россия, e-mail: gr\_yu\_g@mail.ru

**Аннотация:** Рассмотрены условия взаимодействия пузырьков воздуха с частицами талька, обработанными карбоксиметилцеллюлозой, применительно к флотации. На основании теоретического анализа с применением расширенной теории ДЛФО (Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека) установлено, что при отсутствии названного реагента частицы талька, обладающие высокой гидрофобностью, беспрепятственно закрепляются на пузырьках воздуха в области ближнего потенциального минимума, то есть на расстоянии менее 0,5–0,7 нм, благодаря тому, что результирующая сила, действующая на частицу, способствует ее сближению с пузырьком. При увеличении расхода карбоксиметилцеллюлозы уменьшается краевой угол смачивания и возрастает абсолютное значение электрокинетического потенциала талька. В результате появляется потенциальный барьер, препятствующий взаимодействию частиц талька с пузырьками воздуха. В области дальнего потенциального минимума с абсциссой порядка 5–8 нм образование флотационного комплекса затруднено, так как результирующая сила, действующая на частицу, препятствует сближению с пузырьком. Установлен характер зависимости пороговой концентрации карбоксиметилцеллюлозы, вызывающей образование потенциального барьера, от pH среды в диапазоне от 7 до 11 при ионной силе дисперсионной среды в пределах от 0,01 до 0,05 моль/л. Показано, что высота потенциального барьера возрастает с увеличением концентрации карбоксиметилцеллюлозы, увеличением pH и уменьшением ионной силы дисперсионной среды. Полученные зависимости позволяют определить концентрацию карбоксиметилцеллюлозы, позволяющую эффективно депрессировать тальк при известных значениях pH и ионной силы среды в условиях флотации.

**Ключевые слова:** тальк, депрессия, карбоксиметилцеллюлоза, расширенная теория ДЛФО, потенциальная энергия взаимодействия частицы с пузырьком, потенциальный барьер.

**Для цитирования:** Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю., Шрадер Э. А., Саркисова Л. М., Кузнецова И. Н. Поверхностные взаимодействия частиц талька с пузырьками воздуха в присутствии депрессора карбоксиметилцеллюлозы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 68–79. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_68.

### Talcum particle–air bubble attachment in the presence of carboxymethyl cellulose depressant

A.A. Lavrinenko<sup>1</sup>, G.Yu. Golberg<sup>1</sup>, E.A. Shrader<sup>1</sup>, L.M. Sarkisova<sup>1</sup>, I.N. Kuznetsova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources  
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: gr\_yu\_g@mail.ru

---

**Abstract:** Attachment of air bubbles and talcum particles treated with carboxymethyl cellulose is analyzed as a case-study of flotation. The analysis using the extended DLVO (Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek) theory finds out that in the presence of the mentioned agent, talcum particles possessing strong hydrophobic properties freely attach air bubbles in the region of the nearest potential minimum, i.e. at a distance smaller than 0.5–0.7 nm, as the resultant force applied to the particle promotes its approach to the bubble. At the increased consumption of carboxymethyl cellulose, the wetting angle reduces and the electrokinetic potential of talcum grows in modulus. As a result, a potential barrier appears and prevents talcum particle–air bubble interaction. In the range of the farther potential minimum with an abscissa of 5–8 nm, the particle–bubble attachment is complicated as the resultant force applied to the particle prevents its approach to the bubble. The relationship between the carboxymethyl cellulose concentration threshold, which causes origination of the potential barrier, and the medium pH in the range from 7 to 11 at the ionic strength of the dispersive environment from 0.001 to 0.05 mol/l is determined. The potential barrier grows in height with higher concentration of carboxymethyl cellulose, increasing pH and decreasing ionic strength of the dispersive environment. The obtained relationships allow finding the carboxymethyl cellulose concentration for efficient depression of talcum at the known values of pH and ionic strength under conditions of flotation.

**Key words:** talcum, depression, carboxymethyl cellulose, extended DLVO theory, potential energy of particle–bubble attachment, potential barrier.

**For citation:** Lavrinenko A. A., Golberg G. Yu., Shrader E. A., Sarkisova L. M., Kuznetsova I. N. Talcum particle–air bubble attachment in the presence of carboxymethyl cellulose depressant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):68-79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_68.

---

## Введение

Одной из существенных проблем современной технологии обогащения рудного сырья является повышение селективности флотации малосульфидных медно-никелевых руд с высоким содержанием флотоактивных силикатных минералов, главным образом талька [1]. Гидрофобность этого минерала обусловлена тем, что на его поверхности в нейтральной и щелочной среде преобладают силоксановые функциональные группы, весьма слабо взаимодействующие с водой [2]. Это обуславливает сравнительно большое значение краевого угла смачивания талька ( $\theta$ ), которое, по различным данным, находится в пределах от 60 до 90° [3–5]. В результате при флотации сульфидных руд тальк извлекается в концентрат, тем са-

мым создавая затруднения для последующих пирометаллургических процессов получения металлов.

Проблеме депрессии талька при флотации сульфидных руд посвящены публикации отечественных и зарубежных авторов [1, 5–15]. Рассматриваются различные реагенты, способствующие уменьшению гидрофобности талька: гуаровая смола, танины, модифицированный хитозан, модифицированные лигнинны, крахмал, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), полиакриламид и ряд других. Эти реагенты, как природные, так и синтетические, представляют собой полимеры с карбоксильными и гидроксильными функциональными группами. Адсорбция указанных реагентов на поверхности частиц талька приводит к уменьшению значения  $\theta$  и одновременному увеличе-

нию абсолютной величины электрокинетического потенциала ( $\zeta$ ). В результате уменьшается гидрофобное притяжение и возрастает электростатическое отталкивание между частицами талька и пузырьками воздуха. В настоящей работе рассматривается количественная оценка возможности притяжения или отталкивания при взаимодействии частиц талька и пузырьков воздуха в присутствии КМЦ. При этом учитывали, что результаты экспериментальных исследований по флотации оталькованной малосульфидной платинометаллической руды, выполненные в ИПКОН РАН [15], показали сравнительно высокую эффективность депрессии талька реагентом «Депрамин 347», представляющим собой полимер КМЦ с относительно высокими молекулярной массой и долей отрицательно заряженных функциональных групп.

В настоящее время механизм взаимодействия депрессирующих реагентов с тальком в целом изучен, однако остаются неясными количественные закономерности взаимосвязи между условиями, препятствующими взаимодействию частиц талька и пузырьков воздуха, и свойствами фаз флотационной системы, а также расходом реагента.

Работа проведена с целью установить зависимость концентрации КМЦ, обеспечивающей депрессию талька, от свойств дисперсионной среды в условиях флотации на основе анализа энергии и сил взаимодействия частиц талька с пузырьками воздуха, исходя из величины потенциального барьера.

### Теоретический расчет взаимодействия частиц талька с пузырьками воздуха

В настоящей работе рассмотрена система, состоящая из частицы талька, движущейся вертикально вниз, и пузырька воздуха, движущегося навстречу ей. Учи-

тывали комплекс поверхностных взаимодействий в этой системе, причем в расчетах использовали значения  $\theta$  и  $\zeta$ , определенные по результатам лабораторных исследований [15]. Суммарную потенциальную энергию парного взаимодействия двух объектов  $U$  (в данном случае — частицы и пузырька) определяли по расширенной теории ДЛФО [16–18]:

$$U = U_E + U_M + U_H = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon r_1 r_2 (\varphi_1^2 + \varphi_2^2)}{r_1 + r_2} \cdot \left( \frac{2\varphi_1 \varphi_2}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \ln \left( \frac{1 + e^{-kh}}{1 - e^{-kh}} \right) + \ln(1 - e^{-2kh}) \right) - \frac{A_{123}^* r_1 r_2}{6h(r_1 + r_2)} - \frac{K_H r_1 r_2}{6h(r_1 + r_2)} \quad (1)$$

где  $U_E$ ,  $U_M$ ,  $U_H$  — соответственно электростатическая, молекулярная и гидрофобная составляющие энергии взаимодействия, Дж;  $\varepsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость (для воды при  $T = 298$  К:  $\varepsilon = 80$ );  $r_1, r_2$  — радиусы взаимодействующих объектов, м;  $\varphi_1, \varphi_2$  — соответствующие значения потенциалов поверхностей, В;  $h$  — расстояние между поверхностями объектов, м;  $A_{123}^*$  — константа Гамакера для взаимодействия двух объектов (индексы 1 и 2) через прослойку дисперсионной среды (индекс 3), Дж;  $k$  — параметр Дебая,  $m^{-1}$ .

Величину  $k$  (при температуре  $T = 298$  К) рассчитывали по формуле:

$$k = 3,29 \cdot 10^9 \sqrt{C}, \quad (2)$$

где  $C$  — концентрация электролита в дисперсионной среде, моль/л;  $K_H$  — константа гидрофобного взаимодействия двух объектов, Дж, согласно [18], зависящая от краевого угла смачивания  $\theta$  следующим образом:

$$K_H = a e^{b\theta}, \quad (3)$$

### Значения экспериментальных констант $a$ и $b$ согласно [18]

Values of experimental constants  $a$  and  $b$  according to [18]

Краевой угол смачивания $\theta$	$a$	$b$
$\theta < 86,89^\circ$	$2,732 \cdot 10^{-21}$	0,04136
$86,89^\circ < \theta < 92,28^\circ$	$4,888 \cdot 10^{-44}$	0,6441
$\theta > 92,28^\circ$	$6,327 \cdot 10^{-27}$	0,2172

где  $a, b$  — экспериментальные постоянные, зависящие от величины  $\theta$  (значения приведены в таблице).

В настоящей работе значение  $\theta$  рассчитывали на основании приведенных в работе [15] экспериментальных данных по силе отрыва пузырька воздуха от частиц талька ( $F_D$ ) в присутствии КМЦ по формуле [19]:

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{F_D}{2\pi b \sigma}}, \quad (4)$$

где  $\bar{b}$  — радиус пузырька, м;  $\sigma$  — поверхностное натяжение, Н/м (принято равным 0,07 Н/м).

Потенциал поверхности  $\phi$  рассчитывали на основании данных по значениям  $\zeta$  для талька [15, 20–22] и воздуха в воде [23] по формуле, приведенной в работе [24]:

$$\begin{aligned} & \frac{-\zeta}{\sqrt{\ln \frac{1+B \cosh(|z|\bar{e}\zeta/kT)}{1+B}}} = \\ & \int_{\phi}^{\zeta} \frac{d\phi}{\sqrt{\ln \frac{1+B \cosh(|z|\bar{e}\phi/kT)}{1+B}}} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\bar{e}$  — заряд электрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $z$  — заряд иона;  $k$  — постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $B$  — безразмерная величина, рассчитываемая по формуле:

$$B = \frac{2C}{C_0 - C}, \quad (6)$$

где  $C_0$  — растворимость данного электролита в воде, моль/л.

На основании анализа системы сил выявлено, что на частицу талька с адсор-

бированными макромолекулами КМЦ, расположенную вблизи пузырька воздуха, действуют следующие силы:

- сила взаимодействия с пузырьком, определяемая по расширенной теории ДЛФО ( $F_{\text{ДЛФО}}$ ), величина и направление этой силы зависят от расстояния ( $h$ ):

$$F_{\text{ДЛФО}} = \frac{\partial U}{\partial h} = \kappa U_E - \frac{U_M + U_H}{h}, \quad (7)$$

- гравитационная сила ( $F_G$ ), направленная вертикально вниз:

$$F_G = (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}}) V g, \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  — плотность частицы и воды соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем частицы, м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения (9,8 м/с<sup>2</sup>);

- сила вязкого трения  $F_C$ , направленная вертикально вверх:

$$F_C = 6\pi r_1 \mu v, \quad (9)$$

где  $\mu$  — вязкость воды ( $10^{-3}$  Па·с);  $v$  — конечная скорость падения частицы, м/с.

Результирующая сила, действующая на частицу ( $F_p$ ), определяется как геометрическая сумма  $F_{\text{ДЛФО}}$ ,  $F_G$  и  $F_C$ :

$$\vec{F}_p = \vec{F}_{\text{ДЛФО}} + \vec{F}_G + \vec{F}_C. \quad (10)$$

В настоящей работе выполнены расчеты энергии взаимодействия ( $U$ ) и результирующей силы ( $F_p$ ) по уравнениям (1) и (8) соответственно. Значения параметров, входящих в расчетные уравнения, приняты исходя из условий, при которых проводилась флотация оталькованной малосульфидной медно-никелевой руды согласно [15]:

- радиусы частицы талька и пузырька воздуха — соответственно  $10^{-5}$  и  $5 \cdot 10^{-4}$  м;

- концентрация КМЦ ( $q$ ) — от 0 до 250 мг/л;
- ионная сила ( $I$ ) — от 0,01 до 0,05 моль/л в пересчете на сульфат натрия;
- рН — в пределах от 7 до 11;
- значение константы Гамакера в водной среде для талька —  $1,8 \cdot 10^{-20}$  Дж [4, с. 39; 25, с. 104], для воздуха —  $3,7 \cdot 10^{-20}$  Дж [26, с. 409].

На основании данных по строению макромолекул КМЦ и поверхностных свойств частиц талька наиболее вероятным представляется следующее качественное описание процесса взаимодействия этих объектов в нейтральной и щелочной средах. При сближении с частицей талька аполярные участки макромолекулы, включающие углерод-углеродные связи, притягиваются к гидрофобной базальной поверхности талька. В то же время полярные гидроксильные и карбоксильные группы КМЦ вследствие отталкивания одноименно заряженными силанольными и силоксановыми группами поверхности ориентируются в сторону дисперсионной среды, тем самым увеличивая по абсолютной величине отрицательный заряд частиц. При этом с увеличением доли карбоксиль-

ных групп в макромолекуле абсолютная величина заряда возрастает. Таким образом, адсорбция макромолекул КМЦ на тальке способствует увеличению электростатического отталкивания и уменьшению гидрофобного притяжения между частицами этого минерала и пузырьками воздуха.

В качестве примера на рис. 1 приведены кривые зависимости  $F_p$  от  $h$  при различных значениях рН,  $I$  и  $q$ . При этом знак минуса для величины  $F_p$  соответствует притяжению, а знак плюса — отталкиванию.

На рис. 1 видно, что притяжение между частицей талька и пузырьком воздуха возникает на расстоянии менее 1,5–3,0 нм, а с увеличением расстояния результирующая сила становится положительной, но близкой к нулю. Характер расчетных кривых  $F_p$  от  $h$  мало зависит от концентрации КМЦ, рН и ионной силы. Значения  $F_r$  и  $F_c$  не зависят от  $h$ . При установившемся режиме падения частицы, другими словами, при достижении конечного значения скорости падения ( $v$ ), в отсутствие взаимодействия частицы с другими объектами, эти две силы взаимно уравниваются. Абсолютная величина каждой из этих

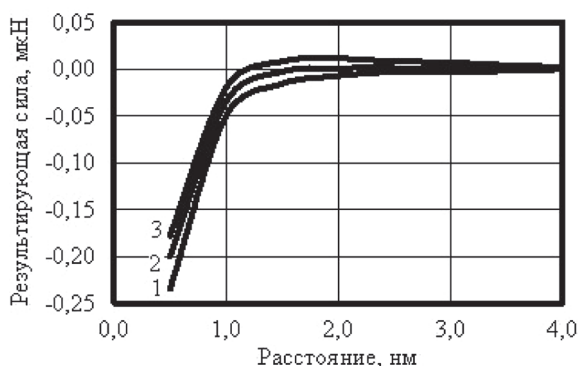


Рис. 1. Зависимость результирующей силы, действующей на частицу талька, от расстояния до поверхности пузырька воздуха: 1 — рН 7,  $I = 0,01$  моль/л,  $q = 0$  мг/л; 2 — рН 9,  $I = 0,03$  моль/л,  $q = 50$  мг/л; 3 — рН 11,  $I = 0,05$  моль/л,  $q = 150$  мг/л

Fig. 1. Resultant force applied to talcum particle versus distance to air bubble surface: 1 — рН 7,  $I = 0,01$  mol/l,  $q = 0$  mg/l; 2 — рН 9,  $I = 0,03$  mol/l,  $q = 50$  mg/l; 3 — рН 11,  $I = 0,05$  mol/l,  $q = 150$  mg/l

сил составляет примерно  $7 \cdot 10^{-5}$  мкН, что примерно на 3 порядка меньше по сравнению с  $F_{\text{длфо}}$ , поэтому  $F_{\text{г}}$  и  $F_{\text{с}}$  практически не влияют на взаимодействие частицы с пузырьком при относительно малых  $h$  (менее 1,5–2,0 нм).

На рис. 2 в качестве примера представлены кривые зависимости  $U$  от  $h$  при pH 9, ионной силе 0,03 моль/л. Здесь, как и на рис. 1, знак минуса соответствует притяжению, а знак плюса – отталкиванию. Значения  $U$  приведены в единицах  $kT$  ( $1 kT \approx 4 \cdot 10^{-21}$  Дж).

Как видно на рис. 2, в отличие от силы потенциальная энергия взаимодействия существенно зависит от концентрации КМЦ. При сравнительно малых значениях  $q$  кривая зависимости  $U$  от  $h$  находится целиком в области отрицательных значений  $U$ . Однако, начиная с некоторого порогового значения ( $q_0$ ), на потенциальной кривой появляется барьер. В соответствии с представлениями, принятыми в коллоидной химии, при высоте барьера свыше  $10kT$  взаимодействие затруднено. При этом область значений  $U > 0$  соответствует значениям  $h$  в пределах 1–4 нм. Это означает, что частица и пузырек при этих

условиях не могут сблизиться на расстояние менее 1–2 нм, когда результирующая сила, действующая на частицу, направлена в сторону пузырька и таким образом будет затруднено образование флотационного комплекса. Такое изменение характера взаимодействия частицы талька и пузырька воздуха обусловлено тем, что с увеличением концентрации КМЦ при прочих равных условиях уменьшается притяжение и возрастает отталкивание между частицами талька и пузырьками воздуха за счет уменьшения значения  $\theta$ , и, следовательно, уменьшения энергии гидрофобного притяжения между частицей и пузырьком. С увеличением концентрации КМЦ возрастает абсолютное значение  $\zeta$ -потенциала частиц, и это приводит к увеличению энергии электростатического отталкивания между частицей и пузырьком.

На указанной кривой также существует дальний потенциальный минимум с абсциссой порядка 5–8 нм, но в этой области расчетная результирующая сила, действующая на частицу, препятствует сближению с пузырьком, поэтому образование флотационного комплекса затруднено.

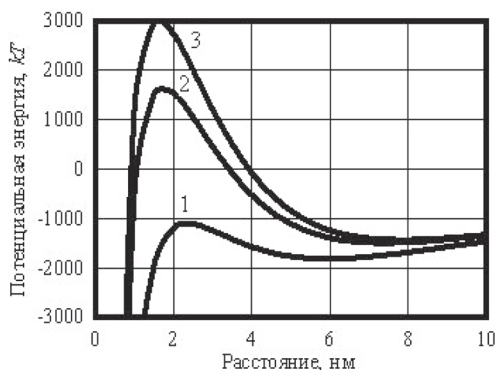


Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии взаимодействия частицы талька диаметром 20 мкм и пузырька воздуха от расстояния между ними при pH 9, ионной силе 0,03 моль/л и различных концентрациях КМЦ: 1 –  $q = 0$  мг/л; 2 –  $q = 100$  мг/л; 3 –  $q = 200$  мг/л

Fig. 2. Potential energy of interaction between talcum particle 20  $\mu\text{m}$  in diameter and air bubble as function of their spacing at pH 9, ionic strength of 0,03 mol/l and different concentrations of CMC: 1 –  $q = 0$  mg/l; 2 –  $q = 100$  mg/l; 3 –  $q = 200$  mg/l



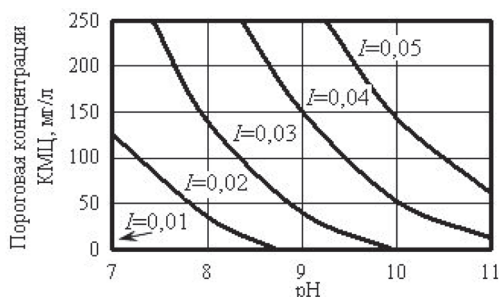


Рис. 3. Зависимость пороговой концентрации КМЦ, обеспечивающей возникновение потенциального барьера частиц талька с воздухом, от pH дисперсионной среды при значениях ионной силы ( $I$ ), моль/л  
 Fig. 3. Ultimate CMC concentration for potential barrier to appear between talcum particles and air bubbles versus pH of dispersive environment at different ionic strengths ( $I$ ), mol/L

Зависимость расчетных значений  $q_0$  от pH при ионной силе от 0,01 до 0,05 моль/л представлена на рис. 3; от ионной силы при pH от 7 до 11 — на рис. 4.

Из представленных данных видно, что с увеличением pH при прочих равных условиях значение  $q_0$  монотонно убывает; это связано с возрастанием абсолютной величины отрицательного  $\zeta$ -потенциала талька и воздуха при увеличении pH. Значение ионной силы ( $I$ ) также существенно влияет на величину  $q_0$ . При  $I = 0,01$  моль/л потенциальный барьер возникает при pH 7,0–7,2 и весьма малом значении  $q_0$  — не более 5 мг/л. При  $I = 0,02$  моль/л диапазон значений

$q_0$  расширяется от 125 мг/л при pH 7 до 0 при pH 8,7. Дальнейшее повышение значения  $I$  смещает расчетные кривые в область более высоких значений pH. Увеличение значения  $q_0$  с ростом ионной силы обусловлено тем, что с уменьшением значения  $I$  при постоянном  $\zeta$ -потенциале значение  $\phi$ -потенциала возрастает, как это следует из анализа уравнения (5).

Расчетные данные, приведенные на рис. 3 и 4, позволяют ориентировочно выбрать расход КМЦ в качестве депрессора талька при флотации оталькованной сульфидной руды при известных или заданных значениях pH и ионной силы. При этом следует учитывать содержа-

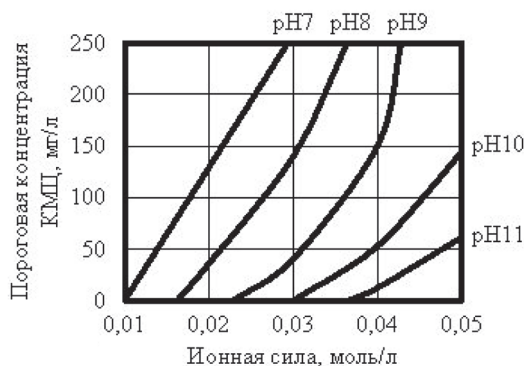


Рис. 4. Зависимость пороговой концентрации КМЦ, обеспечивающей возникновение потенциального барьера частиц талька с воздухом, от ионной силы дисперсионной среды при pH от 7 до 11  
 Fig. 4. Ultimate CMC concentration for potential barrier to appear between talcum particles and air bubbles versus ionic strength of dispersive environment at pH from 7 to 11

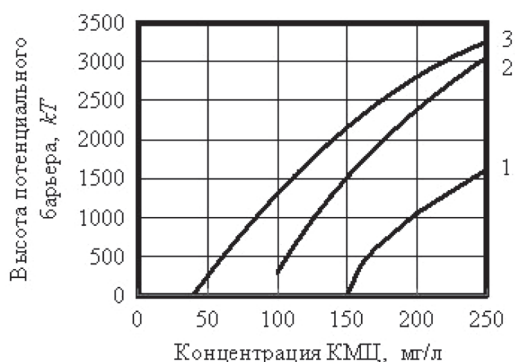


Рис. 5. Зависимость высоты потенциального барьера от концентрации КМЦ: 1 – pH 9,  $I = 0,04$  моль/л; 2 – pH 10,  $I = 0,04$  моль/л; 3 – pH 9,  $I = 0,03$  моль/л

Fig. 5. Potential barrier height as function of CMC concentration: 1 – pH 9,  $I = 0,04$  mol/l; 2 – pH 10,  $I = 0,04$  mol/l; 3 – pH 9,  $I = 0,03$  mol/l

ние талька в руде. Например, из данных, представленных на рис. 3, следует, что при pH 9 и ионной силе 0,04 моль/л для эффективной депрессии талька потребуется 150 мг/л КМЦ.

На рис. 5 показаны примеры кривых зависимости высоты потенциального барьера ( $H_B$ ) от концентрации КМЦ при различных значениях pH и  $I$ .

Представленные на рис. 5 кривые – монотонно возрастающие, выпуклые вверх. Такой характер кривых обусловлен, по-видимому, тенденцией к насыщению адсорбционного слоя молекулами реагента на поверхности частиц талька с увеличением  $q$  и  $I$ . С увеличением pH среды при прочих равных условиях высота барьера возрастает, что связано с ростом абсолютной величины  $\zeta$ -потенциала как талька, так и воздуха, следовательно, отталкивания между ними. По той же причине высота барьера возрастает с уменьшением ионной силы среды при прочих равных условиях.

### Заключение

Анализ взаимодействия частиц талька и пузырьков воздуха при действии КМЦ, выполненный на основании расширенной теории ДЛФО, позволил ус-

тановить, что при отсутствии и сравнительно малых концентрациях названного реагента частицы талька, обладающие высокой гидрофобностью, беспрепятственно закрепляются на пузырьках воздуха в области ближнего потенциального минимума, то есть на расстоянии менее 0,5–0,7 нм, благодаря тому, что результирующая сила, действующая на частицу, главным образом за счет молекулярного и гидрофобного притяжения, способствует ее сближению с пузырьком и образованию флотационного комплекса. Начиная с порогового значения концентрации КМЦ, когда высота потенциального барьера становится равной 10  $kT$ , затрудняется взаимодействие частицы с пузырьком. В области дальнего потенциального минимума с абсциссой порядка 5–8 нм образование флотационного комплекса также затруднено, так как результирующая сила, действующая на частицу, препятствует сближению с пузырьком.

Установлено, что пороговая концентрация КМЦ убывает с увеличением pH и возрастает с увеличением ионной силы среды. Определен характер зависимости пороговой концентрации КМЦ от pH среды в диапазоне от 7 до 11 и при ионной силе дисперсионной среды



от 0,01 до 0,05 моль/л, что позволяет определить концентрацию КМЦ, обеспечивающую эффективную депрессию талька при известных значениях pH и ионной силы дисперсионной среды. Так-

же показано, что высота потенциально-го барьера монотонно возрастает с ростом концентрации КМЦ, увеличением pH и снижением ионной силы дисперсионной среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов И. А. Обогащение медно-никелевых руд. — М.: Издательский дом «Руда и металлы», 1998. — 224 с.
2. Аксененко Е. В., Тарасевич Ю. И. Гидрофобность базальной поверхности талька // Коллоидный журнал. — 2014. — Т. 76. — № 4. — С. 526—532.
3. Нуштаева А. В. Определение угла избирательного смачивания полидисперсных изоморфных твердых частиц // Успехи современного естествознания. — 2019. — № 1. — С. 13—17.
4. Wallqvist V. Interactions between non-polar surfaces in water: Focus on talc, pitch and surface roughness effects: Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden: the Royal Institute of Technology, 2009. 152 p.
5. Guo-hua Gu, Zhixiang Chen, Kaile Zhao, Siyu Song, Shuangke Li, Chong-qing Wang The effect of a novel depressant on the separation of talc and copper-nickel sulfide ore // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2019, vol. 55, no. 1, pp. 116—127.
6. Матвеева Т. Н., Громова Н. К., Ланцова Л. Б. Исследование адсорбции таннинсодержащих органических реагентов на стибните, арсенопирите и халькопирите при флотации комплексных золотосодержащих руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 3. — С. 134—142.
7. Красавцева Е. А., Горячев А. А. Обзор способов депрессии талька при флотации медно-никелевых руд // Труды Кольского научного центра РАН. — 2019. — Т. 10. — № 6(1). — С. 149—154.
8. Wei Deng, Longhua Xu, Jia Tian, Yuehua Hu, Yuexin Han Flotation and adsorption of a new polysaccharide depressant on pyrite and talc in the presence of a pre-adsorbed xanthate collector // Minerals. 2017, vol. 7, no. 3.
9. Qian G., Bo F., Danping Z., Jujie G. Flotation separation of chalcopyrite from talc using carboxymethyl chitosan as depressant // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2017, vol. 53, no. 2, pp. 1255—1263.
10. Manono M., Corin K., Wiese J. The effect of the ionic strength of process water on the interaction of talc and CMC: implications of recirculated water on floatable gangue depression // Minerals. 2019, vol. 9, no. 4.
11. Runpeng Liao, Jiu-shuai Deng, Hao Lai, Jiaozhong Cai, Zhang X., Wen S., Hua Yang, Jianying Deng, Fang J., Xuesong Sun An overview of technologies and selective depressing agents for separating chalcopyrite and talc // International Journal of Metallurgical & Materials Engineering. 2018, vol. 4.
12. Кольцов В. Б., Кондратьева О. В. Теоретические основы защиты окружающей среды. — М.: Прометей, 2018. — 734 с.
13. Morris G., Ralston J. Polymer depressants at the talc-water interface: Adsorption isotherm, microflotation and electrokinetic studies // International Journal of Mineral Processing. 2002, vol. 67, no. 1, pp. 211—227.
14. Morris G. E. The adsorption characteristics of polymeric depressants at the talc-water interface: PhD thesis. Adelaide: University of South Australia, 1996. 214 p.

15. Кузнецова И. Н., Лавриненко А. А., Шрадер Э. А., Саркисова Л. М. Снижение извлечения флотоактивных силикатов в коллективный концентрат при флотации мало-сульфидной платинометаллической руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 200–208. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-200-208.

16. Yoon R.-H., Mao L. Application of extended DLVO theory. IV: Derivation of flotation rate equation from first principles // Journal of Colloid and Interface Science. 1996, vol. 181, no. 2, pp. 613–626.

17. Yoon R.-H., Flinn D. H., Rabinovich Y. I. Hydrophobic interactions between dissimilar surfaces // Journal of Colloid and Interface Science. 1997, vol. 185, no. 2, pp. 363–370.

18. Yoon R.-H. The role of surface forces in flotation kinetics / Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress. Roma, 2000, pp. B8a-1-B8a-7.

19. Drzymala J., Vigdergauz V. E. Work and force of bubble-particle detachment as a measure of contact angle in flotation systems // Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. 2000, vol. 87, no. 28, pp. 3–11.

20. Alvarez-Silva M., Mirnezami M., Uribe-Salas A., Finch J. A. Point of zero charge, isoelectric point and aggregation of phyllosilicate minerals // Canadian Metallurgical Quarterly. 2010, vol. 49, no. 4, pp. 405–410.

21. Bahri Ersoy Influence of pH and chloride-based metal salts on coagulation/dispersion behavior of talc suspension // Separation Science and Technology. 2011, vol. 46, no. 9, pp. 1519–1527.

22. Guo Wei, Feng Bo, Peng Jinxiu, Zhang Wenpu, Zhu Xianwen Depressant behavior of tragacanth gum and its role in the flotation separation of chalcopyrite from talc // Journal of Materials Research and Technology. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 697–702.

23. Скрылёв Л. Д., Скрылёва Т. Л., Небеснова Т. В. Гетерокоагуляционная модель процесса флотационной очистки сточных вод, загрязненных тонкоэмульгированными органическими веществами // Химия и химическая технология. — 2004. — Т. 47. — № 10. — С. 57–61.

24. Clarke A. N., Wilson D. J., Clarke J. H. Electrical aspects of adsorbing colloid flotation. VIII: Specific adsorption of ions by flocs // Separation Science and Technology. 1978, vol. 13, no. 7, pp. 573–586.

25. Clark M. M. Transport modeling for environmental engineers and scientists. 2nd edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & sons, Inc., 2009. 663 p.

26. Drzymala J. Mineral processing. Foundations of theory and practice of mineralurgy. 1st edition. Wrocław: Wrocław University of Technology, 2007. 510 p. **WAB**

## REFERENCES

1. Blatov I. A. *Obogashchenie medno-nikelevykh rud* [Beneficiation of copper-nickel ores], Moscow, Izdatel'skiy dom «Ruda i metally», 1998, 224 p.

2. Tarasevich Yu. I., Aksenenko E. V. Hydrophobicity of talc basal surface. *Colloid Journal*. Коллоидный журнал. 2014, vol. 76, no. 4, pp. 526–532. [In Russ].

3. Nushtaeva A. V. Determination of the angle of selective wetting of polydisperse isomorphic solid particles. *Advances in current natural sciences*. 2019, no. 1, pp. 13–17. [In Russ].

4. Wallqvist V. *Interactions between non-polar surfaces in water: Focus on talc, pitch and surface roughness effects*: Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden: the Royal Institute of Technology, 2009, 152 p.

5. Guo-hua Gu, Zhixiang Chen, Kaile Zhao, Siyu Song, Shuangke Li, Chong-qing Wang The effect of a novel depressant on the separation of talc and copper-nickel sulfide ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2019, vol. 55, no. 1, pp. 116–127.

6. Matveeva T. N., Gromova N. K., Lantsova L. B. Adsorption of tannin-bearing organic reagents on stibnite, arsenopyrite and chalcopyrite in complex gold ore flotation. *Fiziko-*

*tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no. 3, pp. 134–142. [In Russ].

7. Krasavtseva E. A., Goryachev A. A. Review of methods of talc depression at the flotation of copper-nickel ores. *Transactions Kola Science Center*. 2019, vol. 10, no. 6(1), pp. 149–154. [In Russ].

8. Wei Deng, Longhua Xu, Jia Tian, Yuehua Hu, Yuexin Han Flotation and adsorption of a new polysaccharide depressant on pyrite and talc in the presence of a pre-adsorbed xanthate collector. *Minerals*. 2017, vol. 7, no. 3.

9. Qian G., Bo F., Danping Z., Jujie G. Flotation separation of chalcopyrite from talc using carboxymethyl chitosan as depressant. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2017, vol. 53, no. 2, pp. 1255–1263.

10. Manono M., Corin K., Wiese J. The effect of the ionic strength of process water on the interaction of talc and CMC: implications of recirculated water on floatable gangue depression. *Minerals*. 2019, vol. 9, no. 4.

11. Runpeng Liao, Jiu-shuai Deng, Hao Lai, Jiaozhong Cai, Zhang X., Wen S., Hua Yang, Jianying Deng, Fang J., Xuesong Sun An overview of technologies and selective depressing agents for separating chalcopyrite and talc. *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*. 2018, vol. 4.

12. Kol'tsov V. B., Kondrat'eva O. V. *Teoreticheskie osnovy zashchity okruzhayushchey sredy* [Theoretical basis of environmental protection], Moscow, Prometey, 2018, 734 p.

13. Morris G., Ralston J. Polymer depressants at the talc-water interface: Adsorption isotherm, microflotation and electrokinetic studies. *International Journal of Mineral Processing*. 2002, vol. 67, no. 1, pp. 211–227.

14. Morris G. E. *The adsorption characteristics of polymeric depressants at the talc-water interface*: PhD thesis. Adelaide: University of South Australia, 1996. 214 p.

15. Kuznetsova I. N., Lavrinenko A. A., Shrader E. A., Sarkisova L. M. Reduction in flotation-active silicate recovery in bulk concentrate of low-sulphide platinum-metal ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 200–208. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-200-208.

16. Yoon R.-H., Mao L. Application of extended DLVO theory. IV: Derivation of flotation rate equation from first principles. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1996, vol. 181, no. 2, pp. 613–626.

17. Yoon R.-H., Flinn D. H., Rabinovich Y. I. Hydrophobic interactions between dissimilar surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1997, vol. 185, no. 2, pp. 363–370.

18. Yoon R.-H. The role of surface forces in flotation kinetics. *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress*. Roma, 2000, pp. B8a-1-B8a-7.

19. Drzymala J., Vigdergauz V. E. Work and force of bubble-particle detachment as a measure of contact angle in flotation systems. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*. 2000, vol. 87, no. 28, pp. 3–11.

20. Alvarez-Silva M., Mirnezami M., Uribe-Salas A., Finch J. A. Point of zero charge, isoelectric point and aggregation of phyllosilicate minerals. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2010, vol. 49, no. 4, pp. 405–410.

21. Bahri Ersoy Influence of pH and chloride-based metal salts on coagulation/dispersion behavior of talc suspension. *Separation Science and Technology*. 2011, vol. 46, no. 9, pp. 1519–1527.

22. Guo Wei, Feng Bo, Peng Jinxiu, Zhang Wenpu, Zhu Xianwen Depressant behavior of tragacanth gum and its role in the flotation separation of chalcopyrite from talc. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 697–702.

23. Skrylyov L. D., Skrylyova T. L., Nebesnova T. V. Heterocoagulation model to isolate by flotation of fine-emulsified organic substances. *Chemistry and chemical technology*. 2004, vol. 47, no. 10, pp. 57–61. [In Russ].

24. Clarke A. N., Wilson D. J., Clarke J. H. Electrical aspects of adsorbing colloid flotation. VIII: Specific adsorption of ions by flocs. *Separation Science and Technology*. 1978, vol. 13, no. 7, pp. 573–586.

25. Clark M. M. *Transport modeling for environmental engineers and scientists*. 2nd edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & sons, Inc., 2009. 663 p.

26. Drzymala J. *Mineral processing. Foundations of theory and practice of minerallurgy. 1st edition*. Wroclaw: Wroclaw University of Technology, 2007, 510 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Лавриненко Анатолий Афанасьевич*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

зав. лабораторией, e-mail: lavrin\_a@mail.ru,

*Гольберг Григорий Юрьевич*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: gr\_yu\_g@mail.ru,

*Шрадер Элеонора Александровна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: Leonorashrader@mail.ru,

*Саркисова Лидия Михайловна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник,

e-mail: lidasar@mail.ru,

*Кузнецова Ирина Николаевна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник,

e-mail: iren-kuznetsova@mail.ru,

<sup>1</sup> ИПКОН РАН.

**Для контактов:** Гольберг Г.Ю., e-mail: gr\_yu\_g@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.A. Lavrinenko*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),

Head of Laboratory, e-mail: lavrin\_a@mail.ru,

*G.Yu. Golberg*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),

Leading Researcher, e-mail: gr\_yu\_g@mail.ru,

*E.A. Shrader*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Leading Researcher,

e-mail: Leonorashrader@mail.ru,

*L.M. Sarkisova*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher, e-mail: lidasar@mail.ru,

*I.N. Kuznetsova*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,

e-mail: iren-kuznetsova@mail.ru,

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation  
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,  
111020, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** G.Yu. Golberg, e-mail: gr\_yu\_g@mail.ru.

Получена редакцией 15.09.2021; получена после рецензии 27.09.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 15.09.2021; received after the review 27.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.

