

ОБОГАЩЕНИЕ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ / MINERAL PROCESSING OF NON-FERROUS METALS

УДК 622.765

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-5-15>

Научная статья

Research article



Совместное применение жидкого стекла и полисахаридов при флотации оталькованных медно-никелевых руд

А.А. Лавриненко, И.Н. Кузнецова, Г.Ю. Гольберг, О.Г. Лусинян

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук
Россия, 111020, г. Москва, Крюковский тупик, 4

✉ Анатолий Афанасьевич Лавриненко (lavrin_a@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрено совместное действие полисахаридов (карбоксиметилированной целлюлозы и карбоксиметилированного крахмала) с жидким стеклом при флотации оталькованной медно-никелевой руды. На основании анализа результатов флотации, оценки гидрофобности и поверхностного заряда минералов показано, что композиция карбоксиметилированных полисахаридов и жидкого стекла гидрофилизует поверхность талька более эффективно, чем каждый из реагентов по отдельности. При этом одно жидкое стекло почти не депрессирует поверхность талька. Эффективная депрессия флотоактивных силикатов достигается при последовательной подаче полисахарида и жидкого стекла. В этих условиях жидкое стекло вносит существенный вклад в увеличение отрицательного заряда поверхности частиц талька. Эффект проявляется в большей мере для композиции с крахмалом, имеющим более низкую степень замещения по сравнению с целлюлозой. В результате существенно падает извлечение флотоактивных магнийсодержащих силикатов при небольшом снижении извлечения сульфидов. С целью определения особенностей механизма депрессии талька и сульфидных минералов при флотации на основании полученных данных по значениям электрокинетического потенциала и силы отрыва были выполнены расчеты по расширенной теории ДЛФО. Установлено, что для сульфидных минералов потенциальный барьер их взаимодействия с пузырьком воздуха отсутствует при применении любых композиций исследованных депрессоров. Предложен следующий механизм взаимодействия: в случае, если в первую очередь подается жидкое стекло, то гидрофилизация базальной поверхности талька весьма незначительна по причине затруднения закрепления ионов $\text{SiO}(\text{OH})_2^-$; напротив, когда сначала вводится карбоксиметилированный полисахарид, происходит существенная гидрофилизация поверхности талька карбоксильными группами вследствие гидрофобного взаимодействия между соответствующими участками макромолекулы и базальной поверхности талька.

Ключевые слова: флотация, гидрофобность, электрокинетический потенциал, тальк, жидкое стекло, карбоксиметилированная целлюлоза, карбоксиметилированный крахмал, медно-никелевая руда.

Для цитирования: Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Гольберг Г.Ю., Лусинян О.Г. Совместное применение жидкого стекла и полисахаридов при флотации оталькованных медно-никелевых руд. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(2):5–15.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-5-15>

Joint use of sodium silicate and polysaccharides in the flotation of talcose copper-nickel ores

A.A. Lavrinenko, I.N. Kuznetsova, G.Yu. Golberg, O.G. Lusinyan

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources n.a. Academician N.V. Melnikov
of the Russian Academy of Sciences
4 Kryukovskiy impasse, Moscow 111020, Russia

✉ Anatoliy A. Lavrinenko (lavrin_a@mail.ru)

Abstract: The paper considers the combined effect of polysaccharides (carboxymethyl cellulose and carboxymethyl starch) with sodium silicate in the flotation of talcose copper-nickel ore. The analysis of the flotation results and the assessment of hydrophobicity and

surface charge of minerals showed that the composition of carboxymethylated polysaccharides and sodium silicate hydrophilizes the talc surface more effectively than each of the reagents separately. Moreover, sodium silicate alone hardly depresses the talc surface at all. The depression of flotation-active silicates is effective when polysaccharide and sodium silicate are sequentially supplied. Under these conditions, sodium silicate makes a significant contribution to increasing the negative charge on the talc particles surface. The effect is more pronounced for compositions with starch, characterized by a lower degree of substitution compared to cellulose. It results in a significantly reduced recovery of flotation-active magnesium-containing silicates and a slight decrease in sulfide recovery. To determine the features of the mechanism of talc and sulfide minerals depression in flotation, we performed calculations using the extended DLVO theory based on the obtained values of the zeta potential and force of detachment. We established that sulfide minerals have no potential barrier preventing their interaction with an air bubble, regardless of the compositions of the studied depressants used. We propose the following interaction mechanism: when sodium silicate is supplied first, the talc basal surface is very insignificantly hydrophilized as $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ ions are not easy to fix. On the contrary, when the carboxymethylated polysaccharide is supplied first, significant hydrophilization of the talc surface with carboxyl groups occurs due to the hydrophobic interaction between the corresponding regions of the macromolecule and the talc basal surface.

Keywords: flotation, hydrophobicity, zeta potential, talc, sodium silicate, carboxymethyl cellulose, carboxymethyl starch, copper-nickel ore.

For citation: Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Golberg G.Yu., Lusinyan O.G. Joint use of sodium silicate and polysaccharides in the flotation of talcose copper-nickel ores. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;30(2):5–15.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-5-15>

Введение

Эффективная депрессия минералов породы является актуальной задачей при флотации медно-никелевых руд, так как природно-гидрофобный тальк и другие флотоактивные магнийсодержащие силикаты легко переходят во флотационный концентрат и увеличивают затраты на его дальнейшую пирометаллургическую переработку. Для депрессии талька широко применяются полисахариды растительного происхождения [1]. Ранее были исследованы различные депрессоры талька, в том числе наиболее эффективный из них — карбоксиметилированная целлюлоза (КМЦ) [2]. Основная проблема применения полисахаридов заключается в их селективности. С увеличением молекулярной массы реагента возрастает депрессирующая способность, но при этом ухудшается извлечение сульфидов в концентрат [3–7]. Поэтому поиск способов повышения селективности и снижения выхода магнийсодержащих силикатов в концентрат при использовании депрессоров флотоактивных минералов породы является актуальной задачей.

Анализ литературных данных применения комплекса реагентов и механизма их действия при флотации оталькованных медно-никелевых руд показал перспективность использования композиций жидкого стекла (ЖС) с карбоксиметилированными полисахаридами [8–12]. Согласно результатам работы [13], последовательное применение подкисленного ЖС и КМЦ повышает эффективность флотационного разделения халькопирита и талька благодаря гидрофиллизации базальных поверхностей талька

полимерной кремниевой кислотой, образующейся при подкислении ЖС. Так, при флотации с КМЦ концентрацией 500 мг/л извлечение халькопирита и талька в концентрат составило 16 и 45 % соответственно против 95 и 90 % без депрессора. При этом добавление при флотации только подкисленного ЖС практически не влияло на извлечение в концентрат указанных минералов.

Однако в работе [14] исследователи отмечают, что добавление подкисленного щавелевой или соляной кислотой жидкого стекла снижает флотируемость силикатов. В то же время последовательное применение этих депрессоров в концентрациях 250 мг/л ЖС и 300 мг/л КМЦ обеспечивало извлечение в концентрат талька и халькопирита соответственно 28 и 43 %. В работе [15] показано, что при флотации талька с увеличением pH среды от 8,6 до 10,5 и содержания неподкисленного ЖС от 0 до 300 мг/л извлечение талька в концентрат возрастает с 70 до 78 %. Однако при дальнейшем повышении pH и расхода ЖС отмечается его снижение, что, по нашему мнению, связано с увеличением концентрации двухзарядных анионов $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$ при pH выше 10,5. Также указано, что применение КМЦ в сочетании с ЖС снижает извлечение талька в концентрат примерно на 7 %. При этом остается неясным, как влияет порядок подачи неподкисленного ЖС и полисахаридов на поверхностные свойства талька, сульфидных минералов и в целом на результаты флотации оталькованных медно-никелевых руд.

Многие исследователи [12; 15; 16 и др.] связывают депрессирующее действие жидкого стекла с предотвращением сорбции собирателя на поверхности минерала. Известно, что неподкисленное ЖС оказывает депрессирующее действие на кварц в слабощелочной среде (за счет закрепления на его поверхности ионов $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ [17]), на флотоактивный форстерит (образуя химическое соединение с магнием [18]) и серпентин в сильнощелочной среде (благодаря компенсации положительного поверхностного заряда этого минерала анионами $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$ [19]). Таким образом, при действии ЖС на силикатные минералы породы имеют место различные механизмы депрессии.

Литературные данные по свойствам растворов ЖС, например [20], свидетельствуют о том, что в слабощелочной среде при $\text{pH} = 7,0 \div 9,4$ преобладает молекулярная форма H_4SiO_4 , также в сравнительно небольшом количестве присутствуют однозарядные анионы $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$. С учетом того, что порядка 90 % поверхности частиц талька представлено базальными участками, характеризующимися весьма высокой гидрофобностью из-за преобладания сравнительно слабополярных связей $\text{Si}-\text{O}$ [21], есть основания полагать, что в слабощелочной среде величина адсорбции $\text{Si}(\text{OH})_4$ и $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ сравнительно невелика и поэтому указанные соединения, вероятно, не способствуют гидрофилизации талька и увеличению абсолютного значения отрицательного ζ -потенциала поверхности. Это предположение подтверждается также данными работы [15].

Цель настоящей работы — выявление условий эффективного депрессирующего действия композиций неподкисленного жидкого стекла и полисахаридных депрессоров на флотоактивные силикаты на примере флотации медно-никелевой забалансовой руды.

Задача исследований заключалась в определении режимов применения депрессоров, обеспечивающих снижение выхода концентрата при сохранении приемлемого извлечения меди и никеля.

Методика исследований

Исследования направлены на изучение депрессирующего действия композиций депрессоров по отношению к тальку и другим флотоактивным силикатам при флотации оталькованной медно-никелевой руды.

Флотационные эксперименты были выполнены на руде, включающей следующие основные элементы, мас. %:

Cu	0,12
Ni	0,2
Co	0,01
S	0,8
Fe	1,9
Mg	0,94
SiO_2	50,5

Ее минеральный состав приведен ниже, мас. %:

Халькопирит	0,3
Пентландит	0,6
Пирротин	0,2
Пирит	0,14
Пироксен	58
Тальк	12
Амфиболы	8
Магнезит	3,75
Плагиоклазы	1

По содержанию ценных компонентов руда относится к забалансовой.

Флотацию руды, измельченной до крупности 84 % класса -71 мкм, проводили по схеме, представленной на рис. 1, при значении $\text{pH} = 7$ (создаваемом флотационной средой). В основную флотацию подавали сначала депрессор силикатов, потом собиратель — бутиловый ксантогенат 50 г/т, вспенивателем служил метилизобутилкарбинол (МИБК) 20 г/т. Расход реагентов в контрольную флотацию составлял 40 % от расхода в основной флотации. Затем концентраты основной и контрольной флотаций объединяли. В качестве депрессоров талька использовали:

— жидкое стекло;

— карбоксиметилированный крахмал КМК-БУР (АО НПО «Полицелл», Россия) со степенью замещения гидроксильных групп карбоксильными, составляющей 0,4, при содержании активного вещества 60 %;

— карбоксиметилцеллюлозу (полианионную целлюлозу) ПАЦ-Н (АО НПО «Полицелл») со степенью замещения 0,9 при 45 % активного вещества.

Концентрации и расходы депрессоров пересчитывались с учетом содержания активного вещества в реагенте.

Изменение гидрофобности минералов при действии депрессоров оценивали с помощью опреде-

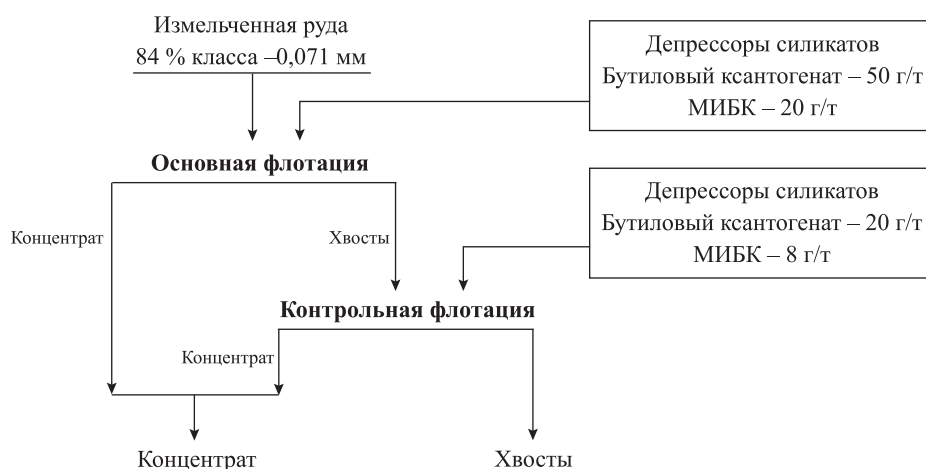


Рис. 1. Схема флотационных опытов

Fig. 1. Scheme of flotation experiments

ления на торсионных весах силы отрыва пузырька воздуха от минеральной поверхности. Измерения проводили на шлифах природных образцов пирротина, пентландита и талька [22]. Для обеспечения pH = 7 раствора использовали NaOH.

Определение электрокинетического потенциала минералов проводили на приборе ZETA-check PMX 500 («Particle Metrix», США). В ячейку объемом 50 мл помещали 0,2 г тонко измельченного минерала. Принцип измерения основан на оценке потенциала протекания.

Результаты и их обсуждение

Результаты флотационных исследования медно-никелевой руды с жидким стеклом, карбоксиметилированным крахмалом и карбоксиметилированной целлюлозой, а также комбинациями ЖС + КМК-БУР и ЖС + ПАЦ-Н показаны на рис. 2. Из анализа его данных можно заключить следующее. Жидкое стекло слабо депрессирует минералы породы: при его расходе 5,6 кг/т выход концентрата понизился с 52,9 до 42,8 %, то есть на 10 %. Реагент ПАЦ-Н проявляет лучшие депрессирующие свойства по сравнению с КМК-БУР. Так, при одинаковых расходах 700 г/т применение КМК-БУР позволило снизить выход концентрата с 52,9 до 40,9 %, а ПАЦ-Н — до 22,6 %. Сочетания депрессоров в композициях ЖС + КМК-БУР и ЖС + ПАЦ-Н показали более сильные депрессирующие свойства по сравнению с каждым реагентом по отдельности. При использовании сочетания ЖС + КМК-БУР имеет значение последовательность подачи депрессоров. Введение сначала ЖС, а потом КМК-БУР снижает выход концентрата

до 27,9 %, если же подавать ЖС после крахмала, то выход падает до 18,8 % (см. рис. 2, а). Поэтому предпочтительней вводить сначала КМК-БУР, а потом ЖС. Совместное использование ПАЦ-Н и ЖС тоже усиливает депрессирующее действие при флотации (см. рис. 2, б), но порядок подачи реагентов не оказывает существенного влияния на результат. При расходе ЖС 5,6 кг/т и ПАЦ-Н 700 г/т выход концентрата понижается с 52,9 до 15,9 %. Для композиции КМК-БУР + ЖС минимально необходимый расход депрессоров составляет 280 г/т крахмала и 1,4 кг/т ЖС, и дальнейшее его увеличение не влияет на депрессию (см. рис. 2, а). При использовании ПАЦ-Н + ЖС наблюдается постепенное снижение выхода концентрата при увеличении расходов реагентов (см. рис. 2, б).

На рис. 3 приведены результаты извлечения меди и никеля в концентрат при использовании композиций депрессоров ЖС + КМК-БУР и ЖС + ПАЦ-Н. При расходах ЖС 5,6 кг/т и полисахарида 700 г/т несколько лучшую селективность для никеля показал КМК-БУР: при его использовании извлечение никеля составило 58,6 %, а в случае ПАЦ-Н — 54,4 %.

Результаты измерения силы отрыва пузырька воздуха от поверхности талька показали, что совместное применение депрессоров (рис. 4, а, кр. 4 и 5) увеличивает гидрофилизацию поверхности минерала по сравнению с каждым из них в отдельности. В случае же пентландита и пирротина (рис. 4, б и в) указанные композиции снижают гидрофобность сульфидов, но в меньшей степени, чем на тальке. Так, на тальке при максимальной концентрации каждого депрессора 600 мг/л происходит снижение силы отрыва на 300 мкН до зна-

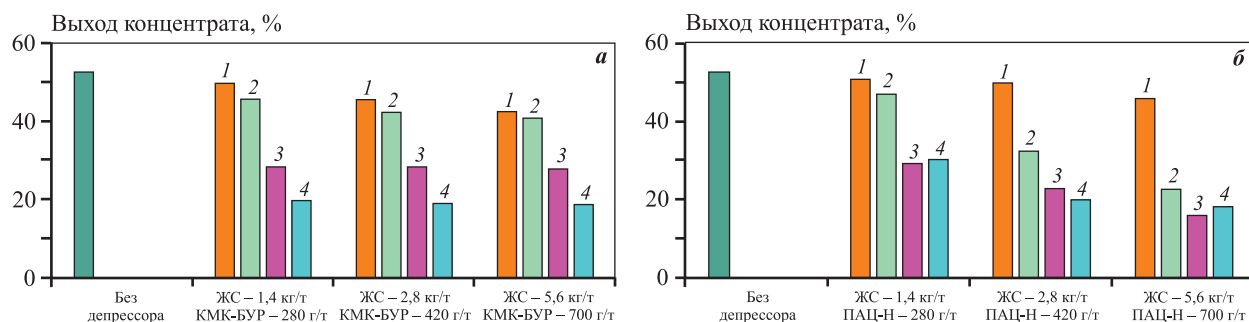


Рис. 2. Влияние сочетания депрессоров КМК-БУР с ЖС (а) и ПАЦ-Н с ЖС (б) на выход концентрата при флотации медно-никелевой руды

а: 1 – ЖС, 2 – КМК-БУР, 3 – ЖС + КМК-БУР, 4 – КМК-БУР + ЖС

б: 1 – ЖС, 2 – ПАЦ-Н, 3 – ЖС + ПАЦ-Н, 4 – ПАЦ-Н + ЖС

Fig. 2. Impact of the composition of depressants CMC-BUR with SS (a) and PAC-N with SS (b) on the concentrate yield in the flotation of copper nickel ore

а: 1 – SS, 2 – CMS-BUR, 3 – SS + CMS-BUR, 4 – CMS-BUR + SS

б: 1 – SS, 2 – PAC-N, 3 – SS + PAC-N, 4 – PAC-N + SS

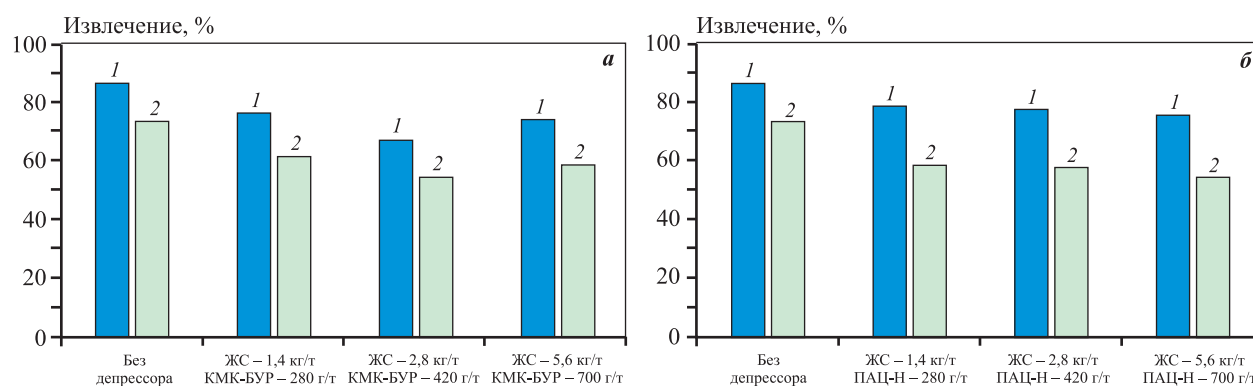


Рис. 3. Влияние композиции депрессоров КМК-БУР + ЖС (а) и ПАЦ-Н + ЖС (б) на извлечение Cu (1) и Ni (2) при флотации медно-никелевой руды

Fig. 3. Impact of the composition of depressants CMS-BUR + SS (a) and PAC-N + SS (b) on the recovery of Cu (1) and Ni (2) in the flotation of copper nickel ore

чения 50 мкН, а на сульфидах в этих же условиях она падает на 50–60 мкН до 280–290 мкН. Установлено, что разный порядок подачи депрессоров практически не влияет на силу отрыва пузырька воздуха от поверхности минералов.

Сдвиг электрокинетического потенциала (ζ -потенциала) на тальке в присутствии различных депрессоров (рис. 5, а) происходит сильнее при добавлении жидкого стекла. При его содержании 250 мг/л значение ζ -потенциала составляет –48 мВ, а при этой же концентрации КМК-БУР и ПАЦ-Н — около –35 мВ. Наиболее ярко действие добавки ЖС к полисахаридам проявляется при его содержании 100 мг/л. При увеличении концентрации полисахарида до 250 мг/л значение ζ -потенциала близко к такому в присутствии одного ЖС.

На халькопирите сдвиг ζ -потенциала происходит практически на одинаковую величину независимо от депрессора (рис. 5, б). Значение электрокинетического потенциала халькопирита без реагентов составляет –4 мВ, в присутствии КМК-БУР и ПАЦ-Н при концентрации каждого 250 мг/л оно достигает –8,5 мВ, а при действии ЖС — около –10 мВ. Сочетание депрессоров при концентрации ЖС 100 мг/л и 250 мг/л полисахарида сдвигает потенциал до –10 мВ.

Электрокинетический потенциал пирротина без реагентов достигает –8,8 мВ (рис. 5, в), и его сдвиг происходит сильнее при добавлении жидкого стекла. Сочетание депрессоров сдвигает потенциал в сторону отрицательных значений на 1–2 мВ до 11 мВ.

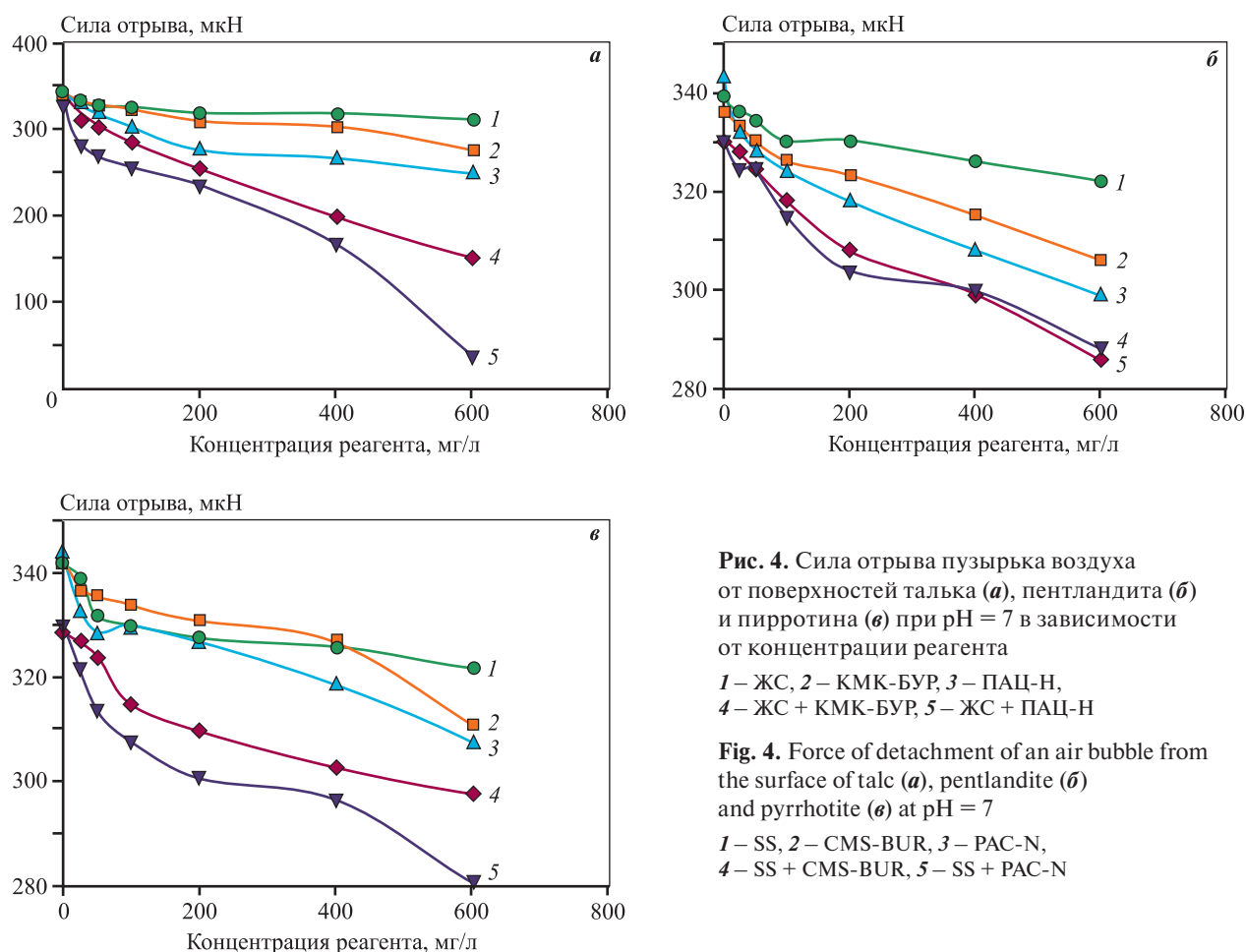


Рис. 4. Сила отрыва пузырька воздуха от поверхностей талька (а), пентландита (б) и пирротина (в) при pH = 7 в зависимости от концентрации реагента
1 – ЖС, 2 – КМК-БУР, 3 – ПАЦ-Н, 4 – ЖС + КМК-БУР, 5 – ЖС + ПАЦ-Н

Fig. 4. Force of detachment of an air bubble from the surface of talc (a), pentlandite (б) and pyrrhotite (в) at pH = 7
1 – SS, 2 – CMS-BUR, 3 – PAC-N, 4 – SS + CMS-BUR, 5 – SS + PAC-N

Таким образом, при действии депрессоров с концентрацией 250 мг/л на тальк электрокинетический потенциал сдвигается от исходной величины на 16–28 мВ до значений –36...–8 мВ в зависимости от депрессора. Для сульфидов (пирротина и халькопирита) ζ -потенциал составляет –8...–10 мВ при сдвиге от исходного на 1–2 мВ в сторону отрицательных значений.

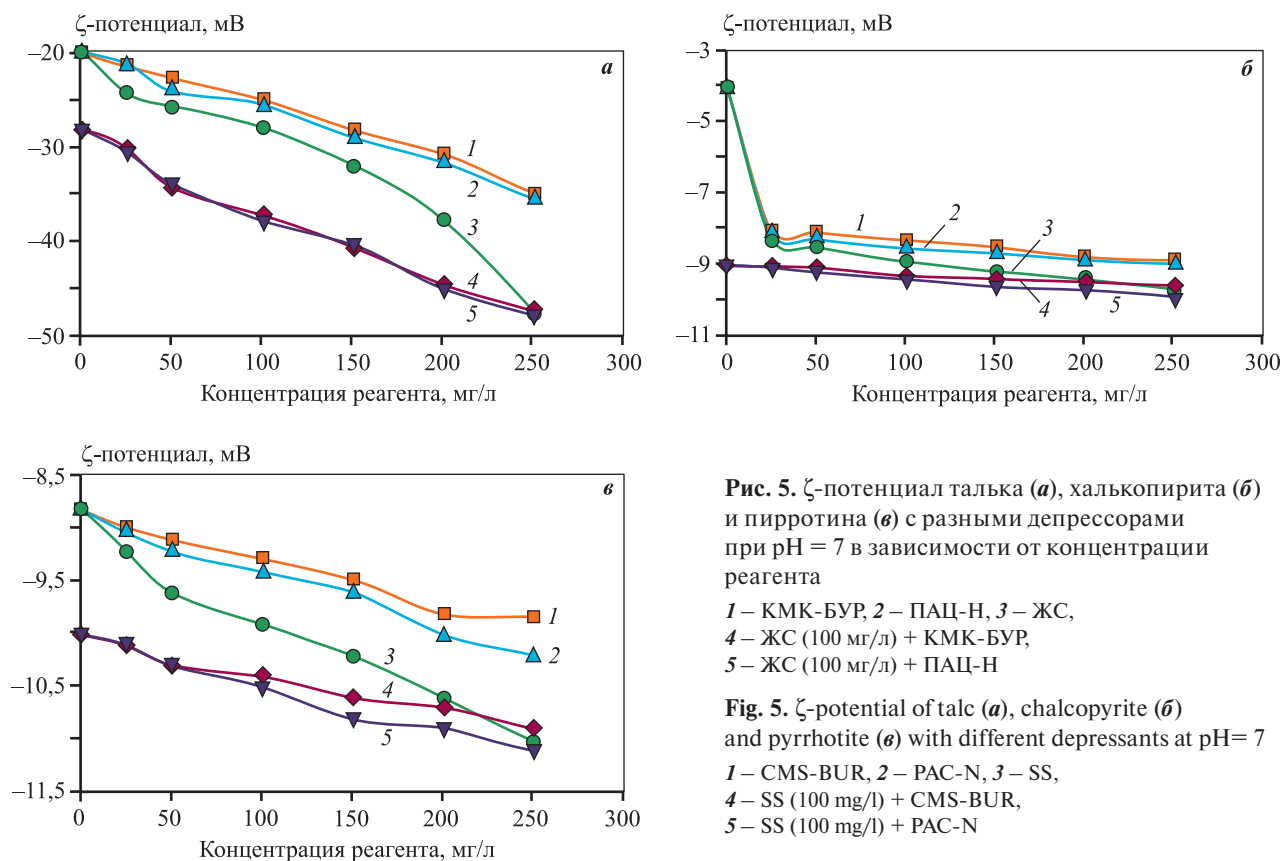
С целью определения особенностей механизма депрессии талька и сульфидных минералов при флотации, на основании полученных данных по значениям электрокинетического потенциала и силы отрыва, были выполнены расчеты по расширенной теории ДЛФО, учитывающей составляющие потенциальной энергии взаимодействия между минеральной частицей и пузырьком воздуха: электростатическую (U_E со знаком «+»), молекулярную (U_M со знаком «–») и гидрофобную (U_H со знаком «–»). Методика расчета по этой теории для депрессии талька изложена в работе [23]. Согласно данным [24], если на кривой зависимости суммарной потенциальной энергии (U) взаимодействия частицы с пузырьком от рас-

стояния между поверхностями этих объектов (h) имеется барьер высотой не менее $10 kT$ (где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура, К), то взаимодействие указанных объектов затруднено. В случае наличия барьера с меньшей высотой, а также при его отсутствии взаимодействие происходит беспрепятственно.

С учетом литературных данных для расчетов были приняты следующие значения параметров, входящих в уравнение расширенной теории ДЛФО:

- ионная сила дисперсионной среды — 0,04 моль/л;
- константы Гамакера для частиц талька и пузырьков воздуха — соответственно $1,7 \cdot 10^{-20}$ и $3,7 \cdot 10^{-20}$ Дж;
- потенциал поверхности (ϕ) пузырьков воздуха в водной среде при pH = 7, по различным данным составляющий от –0,037 до –0,265 В.

Полученные расчетные кривые зависимости U от h при pH = 7 показаны на рис. 6 и 7. Как видно из представленных данных, в отсутствие реаген-



тов расчетная кривая целиком находится в области отрицательных значений U , так как частицы талька благодаря своей природной гидрофобности беспрепятственно взаимодействуют с пузырьками воздуха. В присутствии индивидуальных реагентов, включая ЖС, КМК-БУР и ПАЦ-Н, на кривых появляются максимумы, соответствующие значению $h \sim 2\div 3$ нм, а сами они располагаются выше кривой для безреагентного режима, но также целиком в области отрицательных значений даже при максимальных исследованных расходах реагентов.

На рис. 6 также видно, что кривая 4, соответствующая ЖС, располагается выше кривых 2 и 3 для КМК-БУР и ПАЦ-Н. По нашему мнению, это объясняется тем, что некоторая часть карбоксильных групп не принимает участия в формировании отрицательного заряда поверхности талька в силу стерических затруднений и неполной диссоциации. В то же время для ионов кремниевой кислоты характерно более плотное расположение на поверхности талька, что обуславливает больший отрицательный заряд и, соответственно, повышенное значение электростатической составляющей.

На рис. 7 видно, что с применением композиции ПАЦ-Н с ЖС существует потенциальный барьер

взаимодействия частицы с пузырьком с ординатой примерно $10kT$. Предположительно это обусловлено тем, что ПАЦ-Н гидрофилизует поверхность талька карбоксильными группами. Это, в свою очередь, создает благоприятные условия для дополнительной гидрофизации талька ионами $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ и повышения отрицательного заряда поверхности. При этом по сравнению с режимом без подачи реагентов в точке, соответствующей максимальной высоте потенциального барьера ($h = 1,7$ нм), значение U_E больше в 4,5 раза, а U_H меньше в 1,4 раза. Это дает основание полагать, что наиболее существенный вклад в формирование барьера вносит электростатическая составляющая за счет увеличения количества отрицательно заряженных групп на поверхности талька. Этот эффект в наибольшей степени проявляется для ПАЦ-Н, степень замещения которого составляет 0,9. В то же время КМК-БУР, характеризующийся значительно меньшей степенью замещения (0,4), при тех же условиях не может создать потенциальный барьер.

Также расчетным путем было установлено, что для сульфидных минералов потенциальный барьер при их взаимодействии с пузырьком воздуха отсутствует при применении любых композиций исследованных депрессоров.

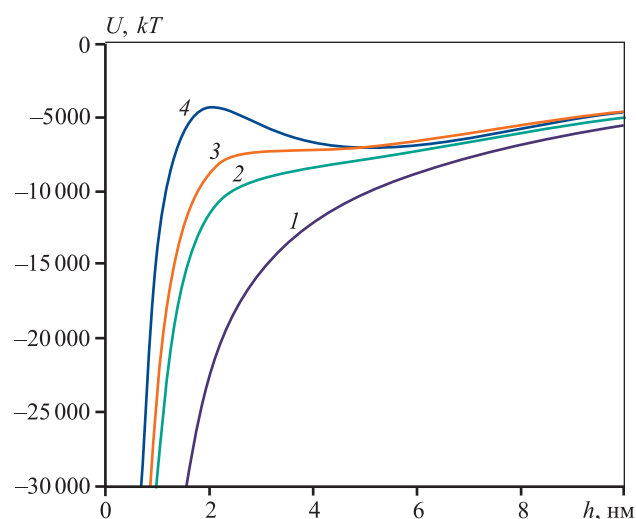


Рис. 6. Потенциальные кривые взаимодействия пузырьков воздуха и частиц талька с индивидуальными депрессорами в количестве 250 мг/л каждого при pH = 7
1 – без реагентов, 2 – КМК-БУР, 3 – ПАЦ-Н, 4 – ЖС

Fig. 6. Potential curves illustrating the interaction of air bubbles and talc particles with individual depressants in the quantity of 250 mg/L each at pH = 7

1 – without reagents, 2 – CMS-BUR, 3 – PAC-N, 4 – SS

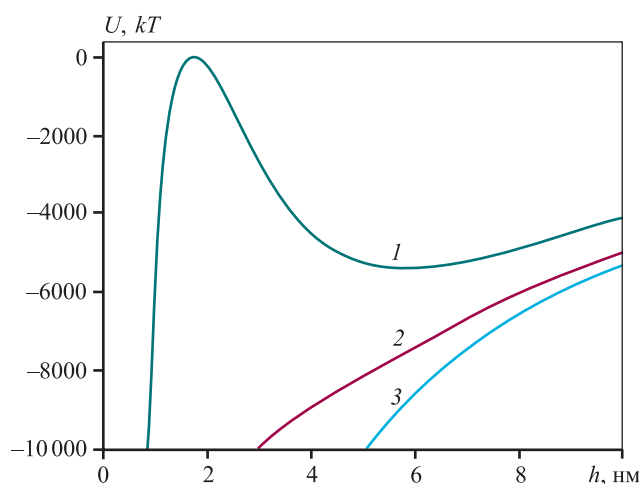


Рис. 7. Потенциальные кривые взаимодействия пузырьков воздуха и частиц талька (1, 2) и пирротина (3) с композициями депрессоров
1 – ПАЦ-Н + ЖС, 2 – КМК-БУР + ЖС, 3 – ПАЦ-Н + ЖС
Концентрации ЖС – 100 мг/л, КМК-БУР – 250 мг/л, ПАЦ-Н – 250 мг/л

Fig. 7. Potential curves illustrating the interaction of air bubbles, talc particles (1, 2) and pyrrhotite (3) with depressant compositions

1 – PAC-N + SS, 2 – CMS-BUR + SS, 3 – PAC-N + SS
Concentrations: SS – 100 mg/L, CMS-BUR – 250 mg/L, PAC-N – 250 mg/L

На основании вышеизложенного представляется возможным следующий механизм депрессии талька композициями полисахаридов и ЖС. В случае если сначала подается ЖС, то гидрофиллизация базальной поверхности талька весьма незначительна по причине затруднения закрепления ионов $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$. Напротив, когда сначала подается карбоксиметилированный полисахарид, происходит, как следует из данных измерения силы отрыва пузырька воздуха от поверхности талька, существенная ее гидрофиллизация карбоксильными группами вследствие гидрофобного взаимодействия между соответствующими участками макромолекулы и базальной поверхности талька. Это, в свою очередь, создает благоприятные условия для дополнительной гидрофиллизации талька ионами $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$, причем их вклад в увеличение отрицательного заряда поверхности является более заметным для реагента КМК-БУР со степенью замещения 0,4 по сравнению с ПАЦ-Н, у которого этот показатель равен 0,9.

Таким образом, реагенты-депрессоры уменьшают гидрофобную составляющую и повышают электростатическую составляющую вследствие наличия у них отрицательного заряда.

Заключение

На основании исследования флотации оталькованной медно-никелевой руды, оценки гидрофобности и поверхностного заряда минералов показано, что сочетание карбоксиметилированных полисахаридов и жидкого стекла гидрофилизует поверхность талька более эффективно, чем каждый из реагентов в отдельности. При этом жидкое стекло без добавки почти не депрессирует поверхность талька. Эффективная депрессия флотоактивных силикатов достигается при последовательной подаче полисахарида и жидкого стекла, которое в этих условиях вносит существенный вклад в увеличение отрицательного заряда поверхности частиц талька. Этот эффект проявляется в большей мере для композиции с крахмалом, имеющим более низкую степень замещения по сравнению с целлюлозой.

В результате применения сочетания карбоксиметилированного полисахарида и жидкого стекла существенно снижается выход концентрата за счет депрессии флотоактивных магнийсодержащих силикатов при небольшом снижении извлечения сульфидов, что в последующем создает условия для повышения эффективности пирометаллургической переработки концентрата.

Список литературы/References

1. Srđyan M. Bulatovic. Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and practice. Vol. 2: Flotation of Gold, PGM and Oxide Minerals. Amsterdam: Elsevier Science, 2010. 230 p.
2. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Лусинян О.Г., Гольберг Г.Ю. Применение отечественных полимерных анионоактивных депрессоров при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(5):5–14.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14>
Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Lusinyan O.G., Golberg G.Yu. Utilizing Russian polymer anion active depressants in the flotation of out-of-balance talcose copper nickel ore. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(5):5–14. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14>
3. Feng B., Lu Y.P., Feng Q.M., Zhang M.Y., Gu Y.L. Talc-serpentine interactions and implications for talc depression. *Minerals Engineering*. 2012a;32:68–73.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.004>
4. Cawood S.R., Harris P.J., Bradshaw D.J. A simple method for establishing whether the adsorption of polysaccharides on talc is a reversible process. *Minerals Engineering*. 2005;18:1060–1063.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.012>
5. Wiese J., Harris P., Bradshaw D. The response of sulphide and gangue minerals in selected Merensky ores to increased depressant dosages. *Minerals Engineering*. 2007;20:986–995.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.008>
6. Morris G.E., Fornasiero D., Ralston J. Polymer depressants at the talc-water interface: adsorption isotherm, microflotation and electrokinetic studies. *International Journal of Mineral Processing*. 2002;67:211–227.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00048-0)
7. Beattie David A., Huynh Le, Kaggwa Gillian B.N., Ralston J. The effect of polysaccharides and polyacrylamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals. *Minerals Engineering*. 2006;19(6-8):598–608.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.011>
8. Афанасова А.В., Абурова В.А., Прохорова Е.О., Лушина Е.А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные порообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; (6-2):161–174.
<https://doi.org/10.25018/0236-1493-2022-62-0-161>
Afanasova A.V., Aburova V.A., Prokhorova E.O., Lushina E.A. Investigation of the influence of depressors on flotation-active rock-forming minerals in sulphide goldbearing ore flotation. *MIAB. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2022;(6-2):161–174. (In Russ.).
9. Брагин В.И., Бурдакова Е.А., Усманова Н.Ф., Кинякин А.И. Комплексная оценка флотационных реагентов по их влиянию на потери металлов и селективность флотации. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021;27(5):4–12.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-4-12>
Bragin V.I., Burdakova E.A., Usmanova N.F., Kinyakin A.I. Comprehensive assessment of flotation reagents by their influence on metal losses and flotation selectivity. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2021;27(5):4–12. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-4-12>
10. Лыгач А.В., Игнаткина В.А. Изучение флотационных свойств основных минералов, содержащихся в желваковых фосфоритах Егорьевского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;8:163–175.
<https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-163-175>
Lygach A.V., Ignatkina V.A. Study of the flotation properties of the main minerals contained in nodular phosphorites of the Yegoryevskoe deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2018;8:163–175.
<https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-163-175>
11. Tao Long, Huahua Zhao, Yaping Wang, Wei Yang, Sha Deng, Wei Xiao, Xuechen Lan, Qian Wang. Synergistic mechanism of acidified water glass and carboxymethyl cellulose in flotation of nickel sulfide ore. *Minerals Engineering*. 2022;181:107547.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107547>
12. Глембоцкий В.А., Классен В.И. Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1981. 304 с.
13. Ji-Wei Xue, Hua-Zhen Tu, Jin Shi, Yan-Ni An, He Wan, Xian-Zhong Bu. Enhanced inhibition of talc flotation using acidified sodium silicate and sodium carboxymethyl cellulose as the combined inhibitor. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30(7):1310–1319.
<https://doi.org/10.1007/s12613-022-2582-5>
14. Kupka N., Möckel R., Rudolph M. Acidified water glass in the selective flotation of scheelite from calcite, Part I: performance and impact of the acid type. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020;56(2):238–251.
<https://doi.org/10.37190/ppmp19101>
15. Molifie A., Becker M., Geldenhuys S., McFadzean B. Investigating the reasons for the improvement in flotation grade and recovery of an altered PGE ore when using sodium silicate. *Minerals Engineering*. 2023;195:108024.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108024>

16. Feng Bo, Luo Xianping, Wang Jinqing, Wang Pengcheng. The flotation separation of scheelite from calcite using acidified sodium silicate as depressant. *Minerals Engineering*. 2015;80:45–49.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.06.017>
17. Silva J.P.P., Baltar C.A.M., Gonzaga R.S.G., Peres A.E.C., Leite J.Y.P. Identification of sodium silicate species used as flotation depressants. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2012;29(4):207–210.
<https://doi.org/10.1007/bf03402458>
18. Weiqing Wang, Hongbin Wang, Qiang Wua, Yu Zhenga, Yating Cui, Wu Yanc, Jie Deng, Tiefeng Peng. Comparative study on adsorption and depressant effects of carboxymethyl cellulose and sodium silicate in flotation. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;268:140–148.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.048>
19. Bo Feng, Yi-Ping Lu, Qi-Ming Feng, Peng Ding, Na Luo. Mechanisms of surface charge development of serpentine mineral. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(4):1123–1128.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62574-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62574-1)
20. Weiqing Wang, Hongbin Wang, Qiang Wua, Yu Zheng, Yating Cui, Wu Yan, Jie Deng, Tiefeng Peng. Comparative study on adsorption and depressant effects of carboxymethyl cellulose and sodium silicate in flotation. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;268:140–148.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.048>
21. Bazaar J.A., Rahimi M., Fathinia S., Jafari M., Chipakwe V., Chelgani S.C. Talc flotation — an overview. *Minerals*. 2021;11(662):19.
<https://doi.org/10.3390/min11070662>
22. Чантурия В.А., Недосекина Т.В., Федоров А.А. Некоторые особенности взаимодействия сульфидных собирателей класса ксантогенатов и дитиокарбаматов с пиритом и арсенопиритом. *Цветные металлы*. 2000;(5):12–15.
Chanturia V.A., Nedosekina T.V., Fedorov A.A. Some features of the interaction of sulfhydryl collectors of the xanthate and dithiocarbamate class with pyrite and arsenopyrite. *Tsvetnye metally*. 2000;(5):12–15. (In Russ.).
23. 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):68–79.
<https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-11-0-68>
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. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2021;(11):68–79. (In Russ.).
<https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-11-0-68>
24. Aimara P., Bacchin P. Slow colloidal aggregation and membrane fouling. *Journal of Membrane Science*. 2010;360(1-2):70–76. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.05.001>

Информация об авторах

Анатолий Афанасьевич Лавриненко — д.т.н., гл. науч. сотрудник, зав. лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН).
<https://orcid.org/0000-0002-7955-5273>
E-mail: lavrin_a@mail.ru

Ирина Николаевна Кузнецова — к.т.н., ст. науч. сотрудник, ИПКОН РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-5980-8472>
E-mail: iren-kuznetsova@mail.ru

Григорий Юрьевич Гольберг — д.т.н., вед. науч. сотрудник, ИПКОН РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-7968-3144>
E-mail: gr_yu_g@mail.ru

Оганес Георгиевич Лусинян — к.т.н., вед. инженер, ИПКОН РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-5655-1747>
E-mail: lusinyan.oganes@yandex.ru

Information about the authors

Anatoliy A. Lavrinenko — Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of Laboratory, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources n.a. Academician N.V. Melnikov of the Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS).
<https://orcid.org/0000-0002-7955-5273>
E-mail: lavrin_a@mail.ru

Irina N. Kuznetsova — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, ICEMR RAS.
<https://orcid.org/0000-0002-5980-8472>
E-mail: iren-kuznetsova@mail.ru

Grigoriy Yu. Golberg — Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, ICEMR RAS.
<https://orcid.org/0000-0002-7968-3144>
E-mail: gr_yu_g@mail.ru

Oganes G. Lusinyan — Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, ICEMR RAS.
<https://orcid.org/0000-0002-5655-1747>
E-mail: lusinyan.oganes@yandex.ru

Вклад авторов

А.А. Лавриненко — формулировка концепции работы, определение цели работы, анализ экспериментальных данных, написание текста статьи.

И.Н. Кузнецова — подготовка пробы руды для исследований, проведение экспериментов по флотации, измерению силы отрыва и электрокинетического потенциала, обработка экспериментальных данных, участие в обсуждении результатов.

Г.Ю. Гольберг — сбор и анализ литературы, анализ экспериментальных данных, участие в обсуждении результатов, проведение теоретических расчетов.

О.Г. Лусинян — подготовка пробы руды для исследований, проведение экспериментов по флотации, выполнение расчетов, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

A.A. Lavrinenko — formulating the concept of the work, determining the purpose of the work, analyzing the experimental data, writing the article.

I.N. Kuznetsova — preparing the samples of ore for investigation, conducting the flotation experiments, measuring the detachment force and zeta potential, processing experimental data, participating in the discussion of the results.

G.Yu. Golberg — collecting and analyzing the literature data, analyzing the experimental data, participating in the discussion of the results, making theoretical calculations.

O.G. Lusinyan — preparing the samples of ore for investigation, conducting the flotation experiments and calculations, participating in the discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024, доработана 22.04.2024, подписана в печать 25.04.2024

The article was submitted 20.03.2024, revised 22.04.2024, accepted for publication 25.04.2024