

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

УДК 622.765

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14>

Научная статья

Research article



Применение отечественных полимерных анионоактивных депрессоров при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды

А.А. Лавриненко, И.Н. Кузнецова, О.Г. Лусинян, Г.Ю. Гольберг**Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук
111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4**

✉ Анатолий Афанасьевич Лавриненко (lavrin_a@mail.ru)

Аннотация: Были выполнены экспериментальные исследования по флотации малосульфидной медно-никелевой руды, содержащей флотоактивные магниевые силикаты, в частности тальк, с применением в качестве депрессоров органических полимерных анионоактивных реагентов, содержащих карбоксильные и гидроксильные группы. Исследовали следующие реагенты, содержащие карбоксильные группы: карбоксиметилированные целлюлоза и крахмал; полиакриловая кислота и ее производные; гумат натрия. Также изучали сополимеры окиси этилена с этилендиамином и глицерином, содержащие гидроксильные группы. Цель исследования – выявление новых эффективных отечественных депрессоров флотоактивных силикатов, селективно действующих при флотации малосульфидной медно-никелевой руды, по сравнению с действием зарубежного депрессора Depramin 347. Влияние реагентов-депрессоров на поверхностные свойства талька определяли по значениям силы отрыва пузырька воздуха и электрокинетического потенциала. Установлено, что для реагентов, содержащих карбоксильные группы, депрессирующая способность убывает в следующей последовательности: карбоксиметилцеллюлоза → карбоксиметилированный крахмал → полиакриловая кислота → гумат натрия. Это обусловлено уменьшением кислотных свойств реагентов, убыванием их адсорбционного сродства к тальку и снижением доли активных карбоксильных групп, принимающих участие в формировании электрокинетического потенциала. При этом выявлена тенденция к возрастанию депрессирующей способности образцов карбоксиметилцеллюлозы с увеличением степени замещения. В то же время реагенты, содержащие гидроксильные группы, практически не оказывают депрессирующего действия на тальк. Полученные данные обосновывают применение отечественных промышленных образцов карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ 7Н, ПАЦ-Н), в частности в качестве депрессоров талька при флотации медно-никелевой руды, что позволяет снизить содержание в концентрате талька, являющегося вредной примесью.

Ключевые слова: флотация, медно-никелевая сульфидная руда, тальк, депрессоры, карбоксильные группы, гидроксильные группы, сила отрыва пузырька воздуха, электрокинетический потенциал, адсорбция.

Для цитирования: 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>

Utilizing Russian polymer anion active depressants in the flotation of out-of-balance talcose copper nickel ore

A.A. Lavrinenko, I.N. Kuznetsova, O.G. Lusinyan, G.Yu. Golberg**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: Experimental studies were conducted on the flotation of low-sulfide copper-nickel ore containing flotation-active magnesium silicates, specifically talc, using organic polymeric anionic reagents containing carboxyl and hydroxyl groups as depressants. The following

reagents, which contain carboxyl groups, were examined: carboxymethyl cellulose and carboxymethylated starch; polyacrylic acid and its derivatives; sodium humate. Copolymers of ethylene oxide with ethylenediamine and glycerol containing hydroxyl groups were also investigated. The objective of this study was to identify new efficient domestic depressants for flotation-active silicates, selectively acting in the flotation of low-sulfide copper-nickel ore, in comparison with the performance of foreign Depramin 347 depressant. The impact of depressant reagents on the surface properties of talc was determined by the values of air bubble detachment force and electrokinetic potential. It was observed that for reagents containing carboxyl groups, the depressing effectiveness decreased in the following order: carboxymethyl cellulose → carboxymethylated starch → polyacrylic acid → sodium humate. This reduction was attributed to a decrease in the acidic properties of the reagents, a decline in their adsorption affinity for talc, and a decrease in the proportion of active carboxyl groups participating in the formation of the electrokinetic potential. Furthermore, a trend towards increased depressing ability was noted for carboxymethyl cellulose samples with an increasing degree of substitution. In contrast, reagents containing hydroxyl groups had virtually no depressing effect on talc. The data obtained support the use of domestic industrial samples of carboxymethyl cellulose, namely CMC 7N and PAC-N, as depressants for floating silicates, particularly talc, which is a detrimental impurity in the concentrate.

Keywords: flotation, copper-nickel sulfide ore, talc, depressants, carboxyl groups, hydroxyl groups, air bubble detachment force, electrokinetic potential, adsorption.

For citation: 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.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14>

Введение

Сульфидные медно-никелевые руды являются источником получения не только меди и ~90 % никеля, но и металлов платиновой группы (МПП), золота, серебра, кобальта, селена, теллура и других редких и рассеянных элементов, тесно связанных с сульфидами основных металлов и иногда с породой. В условиях истощения запасов легкообогатимых руд в промышленное использование вовлекается труднообогатимое сырье с невысоким содержанием ценных компонентов, переработка которого требует разработки новых реагентных режимов флотации.

Серьезной проблемой при переработке сульфидных и особенно малосульфидных медно-никелевых руд является наличие гидрофобных минералов пустой породы, представленных магневыми силикатами — тальком, хлоритом, серицитом, оливином (форстеритом). Они легко переходят во флотационные концентраты, повышая затраты на плавку и снижая ее эффективность. Отрицательный вклад приносят и гидрофильные силикаты. Например, сложные частицы ортопироксена с каймой из талька вносят основной вклад в разубоживание концентрата при флотации руды Меренского Рифа [1]. Попадание гидрофильного серпентина в концентрат происходит за счет частичного покрытия сульфидов противоположно заряженными шламовыми частицами серпентина, которые снижают извлечение и скорость флотации сульфидов [2].

Актуальность исследований по переработке бедных малосульфидных медно-никелевых руд с высоким содержанием талька обусловлена необ-

ходимостью депрессии флотоактивных магнезисодержащих силикатных минералов.

В мировой практике обогащения медно-никелевых руд в качестве депрессоров гидрофобной пустой породы широко используют нетоксичные природные полисахариды — гуаровую камедь, карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ), реже декстрины и их сочетание [3]. Наиболее эффективным депрессором гидрофобных силикатов является гуаровая камедь, которая имеет высокую стоимость и ограниченную доступность (применяется только за рубежом) [4]. Депрессия Mg-содержащих силикатов может осуществляться более доступными и дешевыми (в силу широкого распространения источников получения и ежегодной воспроизводимости) полисахаридами — производными крахмала, декстрином и карбоксиметилированными крахмалами (КМК) [5–8]. Однако, за исключением нескольких производных, таких как декстрины, сообщений об использовании производных крахмала в качестве депрессора при флотации сульфидных минералов мало [8].

В России для депрессии гидрофобной пустой породы при флотации медно-никелевых руд применяют более доступный анионоактивный полисахаридный полимер — КМЦ. Наиболее сложной проблемой является депрессия талька, который наряду с высокой природной гидрофобностью склонен к деструкции в водной среде с образованием тонких частиц, обладает очень высокой флотоактивностью и, тем самым, создает наибольшие трудности при флотации сложных МПП-содержащих медно-никелевых сульфидных руд [4]. На

адсорбцию анионного полимера на тальке влияет множество факторов, включающих природу полимера (тип, количество ионизированных полярных групп — степень замещения (СЗ), молярная масса (ММ)) и свойства раствора [5; 9–13].

Поскольку наиболее важную роль при сорбции полимерных депрессоров на тальке играет гидрофобное взаимодействие, то адсорбция увеличивается с ростом степени полимеризации реагента, способствующей усилению гидрофобности макромолекулы. Однако полимеры с высокой молекулярной массой проявляют меньшую селективность по сравнению с низкомолекулярными полимерами [5]. Традиционно используемые при флотации сульфидных руд полисахариды и другие полимеры имеют в основном ММ в диапазоне 150–600 т/кмоль. В последние годы эффективно использовались полисахариды с меньшей ММ (100–150 т/кмоль) [14].

Депрессирующий эффект анионоактивных полимеров на тальке снижается с повышением pH. При высоком значении pH и малой ионной силе раствора плотность адсорбции анионных полимеров самая низкая, тогда как при большой ионной силе и низком pH в присутствии ионов Mg, Ca и др. плотность адсорбции увеличивается [9–13]. Присутствие двух- и трехвалентных катионов усиливает депрессию талька, однако снижает и селективность при флотации смеси минералов. Степень замещения полимера влияет не только на его растворимость, но и на способность полимера адсорбироваться на тальке и сульфидных минералах [13; 15].

Ввиду того, что возможные механизмы, посредством которых полисахариды могут взаимодействовать с поверхностью минерала, связаны с гидрофобным, химическим, электростатическим, кислотно-щелочным взаимодействиями, с образованием водородной связи [5; 9; 15; 16], они также могут в некоторой степени адсорбироваться на сульфидных минералах, ухудшая их флотацию. Взаимодействие полисахаридов с сульфидами менее изучено [6]. Селективность их действия при флотации зависит от ММ и СЗ [16]. Мало работ проводилось по изучению влияния химической природы полимера на селективность. Обычно выбор полимера для депрессии пустой породы проводится эмпирически.

Ранее были проведены исследования по изучению депрессирующего действия кукурузного декстрина от «Bio Polimer», образцов КМЦ Depramin 267 и 347 компании «Akzo Nobel» и синтетического полимера — Акремон Д-13 [17], а также

карбоксиметилированных кукурузных крахмалов (КМК) с различной вязкостью (синтезированных в НИИ Крахмалопродуктов) [6]. Наилучший эффект был достигнут при использовании депрессора Depramin 347.

Цель настоящего исследования — выявление эффективных отечественных депрессоров фло-тоактивных силикатов, селективно действующих при флотации малосульфидной медно-никелевой руды, по сравнению с действием зарубежного депрессора Depramin 347.

Методика исследований

Исследования направлены на изучение депрессирующего действия при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды и гидрофилизующей способности по отношению к тальку и сульфидам анионоактивных полимеров, производимых в России, с различной СЗ и вязкостью (характеристикой, связанной с ММ), а также сравнение этих реагентов с наиболее эффективным депрессором по данным предыдущих исследований — Depramin 347 (см. таблицу).

Эксперименты по флотации были выполнены на забалансовой руде, содержащей, %: 0,12 Cu; 0,2 Ni; 0,01 Co; 0,8 S; 1,9 Fe; 0,94 Mg; 50,5 SiO₂ и 1,1 г/т Pd; 0,2 г/т Pt; 0,06 г/т Au. Минеральный состав руды представлен, %: халькопиритом — 0,3; пентландитом — 0,6; пирротинотом — 0,2; пиритом — 0,14; пироксенами — 58; тальком — 12; амфиболами — 8; магнезитом — 3,75; плагиоклазами — 1 и др.

Флотацию руды, измельченной до крупности 84 % класса –71 мкм, проводили при естественном pH, равном 7. В основную флотацию подавали сначала депрессор силикатов, затем собиратели Aerophine 3416 и бутиловый ксантогенат — по 25 г/т, вспениватель МИБК — 20 г/т. В контрольную флотацию вводили 40 % реагентов от расхода в основной флотации. Концентраты основной и контрольной флотаций объединяли.

Флотацию измельченной до крупности –71 мкм навески талька массой 5 г осуществляли в камере емкостью 100 мл в присутствии 50 мг/л МИБК.

Для изучения гидрофилизующего действия депрессоров применяли метод оценки смачиваемости минералов по измерению силы отрыва пузырька воздуха от поверхности минерала в растворе реагентов.

Исследование взаимодействия депрессоров различной вязкости и СЗ с поверхностью

Характеристика исследованных реагентов

Properties of investigated reagents

Наименование реагента	Динамическая вязкость 2 %-ного р-ра при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, мПа·с; ММ	Степень замещения (СЗ)
Содержащие карбоксильные группы (–COOH)		
Карбоксиметилированный крахмал КМК БУР-1В (ЗАО «Полицелл»), 60 % активного вещества	~300 (4 % р-р)	0,4
Карбоксиметилцеллюлоза КМЦ 7Н (ЗАО «Полицелл»), 50 % активного вещества	≤ 40 (по Гепплеру), ≤ 140 (по Брукфильду), степень полимеризации – 350	0,6–0,8
Карбоксиметилцеллюлоза (полианионная целлюлоза) ПАЦ-Н (ЗАО «Полицелл»), 45 % активного вещества	≤ 40 (по Гепплеру), ≤ 170 (по Брукфильду), степень полимеризации – 500, ММ ~ 116 000	0,9
Карбоксиметилцеллюлоза Depramin 347 («Akzo Nobel»), 80 % активного вещества	91 (по Брукфильду)	0,54
Гумат Na (смесь поликонденсированных ароматических соединений, содержащих боковые ОН- и COOH-группы)	–	–
Макромер 30Н (НПП «Макромер»), полиакриловая кислота, 45 % активного вещества	ММ ~ 12 000	
Макромер 17Н (НПП «Макромер»), полиакриловая кислота с привитыми полиоксиэтиленгликолевыми цепями (ПАК), 50 % активного вещества	ММ ~ 36 000	
Содержащие гидроксильные группы (–ОН)		
Лапрол 3703-2-37 (НПП «Макромер») на основе глицерина, блок-сополимер с окисью этилена – 37 %, 100 % активного вещества	ММ ~ 3700	
Лапрамол 6504 (НПП «Макромер») на основе этилендиамина, 25–30 % окси этилена, окись пропилена, 100 % активного вещества	ММ ~ 6500	

сульфидов и талька выполнено на основе измерения ζ -потенциала минералов на приборе ZETA-check PMX 500 (Германия). Объем ячейки составлял 50 мл, навеска тонко измельченного минерала — 0,2 г.

Депрессирующую способность реагентов оценивали по относительному снижению извлечения Ni и Si в концентрат, %:

$$\Delta = 100 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_i}{\varepsilon_0},$$

где ε_0 — извлечение компонента без депрессора, ε_i — извлечение компонента при i -ом расходе депрессора.

Селективность действия определяли по коэффициенту разделения Коэна (I):

$$I = \varepsilon_{\text{Ni}} / \varepsilon_{\text{Si}}.$$

Результаты и их обсуждение

Результаты флотации медно-никелевой руды с применением для депрессии талька и других силикатов реагентов, представленных в таблице, приведены на рис. 1, а селективность действия реагентов — на рис. 2.

Из полученных данных следует, что подавляющее действие депрессоров на флотацию силикатов и сульфидов снижается в ряду: ПАЦ-Н $\cong$ КМЦ 7Н > Depramin 347 > гумат Na $\cong$ КМК БУР-1В (рис. 1 и 2). Однако КМЦ с большей степенью полимеризации и СЗ (КМЦ 7Н и ПАЦ-Н) проявили худшую селективность при малых расходах, в то время как при расходах более 600 г/т их селективность повышается до уровня значений реагента Depramin 347.

Депрессоры, содержащие гидроксильные груп-

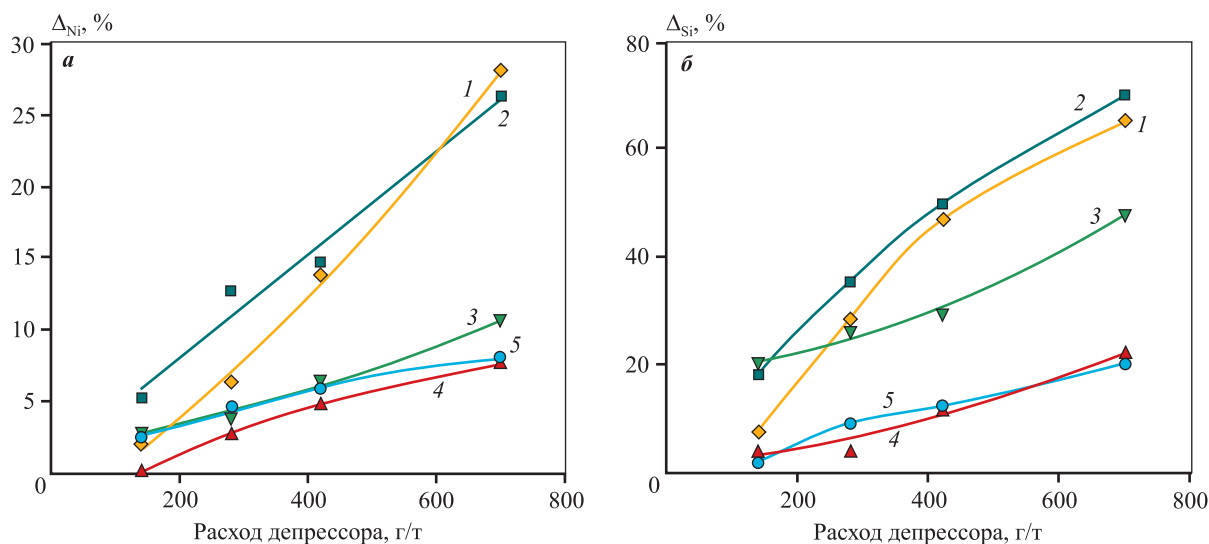


Рис. 1. Относительное снижение (Δ) извлечения Ni (а) и Si (б) в концентрат при флотации Cu–Ni руды
1 – КМЦ 7Н; 2 – ПАЦ-Н; 3 – Depramin 347; 4 – КМК БУР-1В; 5 – гумат Na

Fig. 1. Relative decrease (Δ) in Ni (a) and Si (b) recovery into concentrate during Cu–Ni ore flotation
1 – CMC 7N; 2 – PAC-N; 3 – Depramin 347; 4 – CMS BUR-1V; 5 – sodium humate

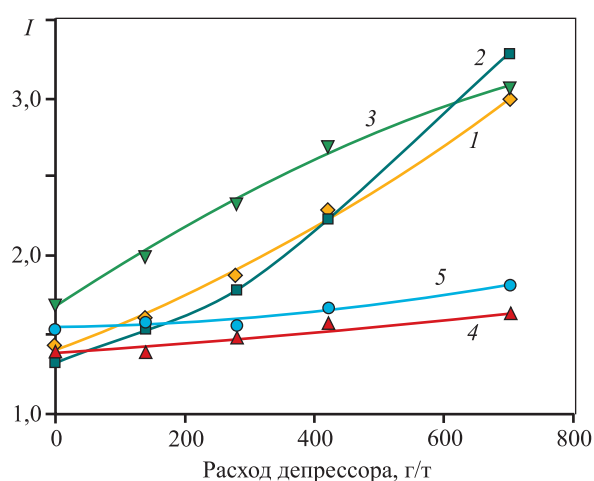


Рис. 2. Коэффициент разделения Ni от Si по Коэну (I)
1 – КМЦ 7Н; 2 – ПАЦ-Н; 3 – Depramin 347; 4 – КМК БУР-1В; 5 – гумат Na

Fig. 2. Cohen's enrichment factor (Ni from Si) (I)
1 – CMC 7N; 2 – PAC-N; 3 – Depramin 347; 4 – CMS BUR-1V; 5 – sodium humate

пы (Лапрол, Лапрамол), а также Макромер 30Н с ММ ~ 12000 при расходе 400 г/т почти не оказывают влияния на результаты флотации исследуемой руды (выход в концентрат снижается примерно на 1 %). При использовании Макромера 17Н с ММ, равной 36 000, депрессирующее действие полимера возрастает. Выход в концентрат снижается на 5 %, и на 5 % уменьшается извлечение никеля в концентрат.

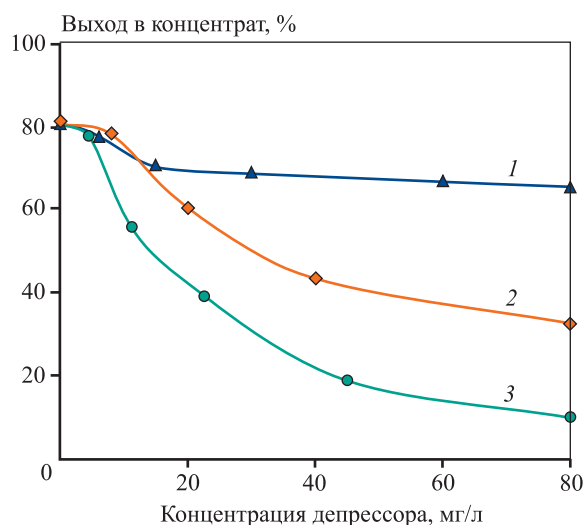


Рис. 3. Влияние КМК (1), Depramin 347 (2) и ПАЦ-Н (3) на флотацию талька с МИБК

Fig. 3. The influence on talc flotation with MIBC: CMS (1), Depramin 347 (2) and PAC-N (3)

Исследование флотации талька с МИБК в присутствии КМЦ-депрессоров показало усиление депрессирующего действия КМЦ при увеличении их вязкости (молярной массы) и СЗ для ПАЦ-Н (рис. 3). Подавляющее действие депрессоров снижается в ряду: ПАЦ-Н — Depramin 347 — КМК.

Для выяснения механизма действия используемых полисахаридов на основные рудные минералы (пентландит, пирротин) и тальк были проведены

исследования по определению их гидрофобности и заряда поверхности при обработке депрессорами.

Влияние адсорбции депрессоров на изменение гидрофобности минералов, оцениваемой величиной силы отрыва пузырька воздуха от шлифа талька, пентландита и пирротина, подтвердили результаты флотационных опытов. Измерение силы отрыва осуществляли в присутствии комбинации Aerophine 3416 А и бутилового ксантогената (1 : 1) с общей концентрацией 30 мг/л. Из представленных на рис. 4 данных следует, что депрессоры на основе КМЦ сильнее повышают гидрофильность поверхности талька, чем КМК и гумат Na. Степень гидрофилизации падает в ряду: ПАЦ-Н > Depramin 347 > КМЦ 7Н > КМК > гумат Na = КМК БУР-1В. При этом все исследуемые депрессоры снижают также гидрофобность сульфидов и наиболее сильно — в присутствии ПАЦ-Н и КМЦ 7Н.

Измерения электрокинетического потенциала исследуемых минералов показали, что КМЦ с большей вязкостью и СЗ сильнее сдвигают ζ -потенциал талька в сторону отрицательных значений (рис. 5). Влияние КМК и КМЦ на ζ -потенци-

ал талька не зависит от pH в интервале значений pH = 7–9 (рис. 6). При этом в случае pH > 7 отрицательный ζ -потенциал самого талька практически не меняется [18; 19]. Таким образом, изменение pH в интервале 7–9 не будет влиять на адсорбцию анионных КМЦ и КМК. Эти результаты свидетельствуют о том, что электростатическая сила не является доминирующей силой в процессе адсорбции полисахаридов на тальке. Их адсорбция происходит преимущественно за счет гидрофобного взаимодействия.

Сдвиг ζ -потенциала на пирротине и халькопирите в отрицательную сторону после взаимодействия с анионными полисахаридами косвенно свидетельствует об адсорбции полимеров (рис. 7, 8), причем наибольший сдвиг происходит на пирротине и в присутствии КМЦ 7Н и КМК БУР-1В, обладающих высокой вязкостью, и увеличивается с ростом pH. Подобная зависимость наблюдалась, например, с таким депрессором, как трикарбоксилат крахмала [19]. По-видимому, на поверхности пирротина адсорбируется гораздо большее количество этих полисахаридов, чем на халькопирите. Предполагалось, что наличие большего количества гидроксильных слоев металла на

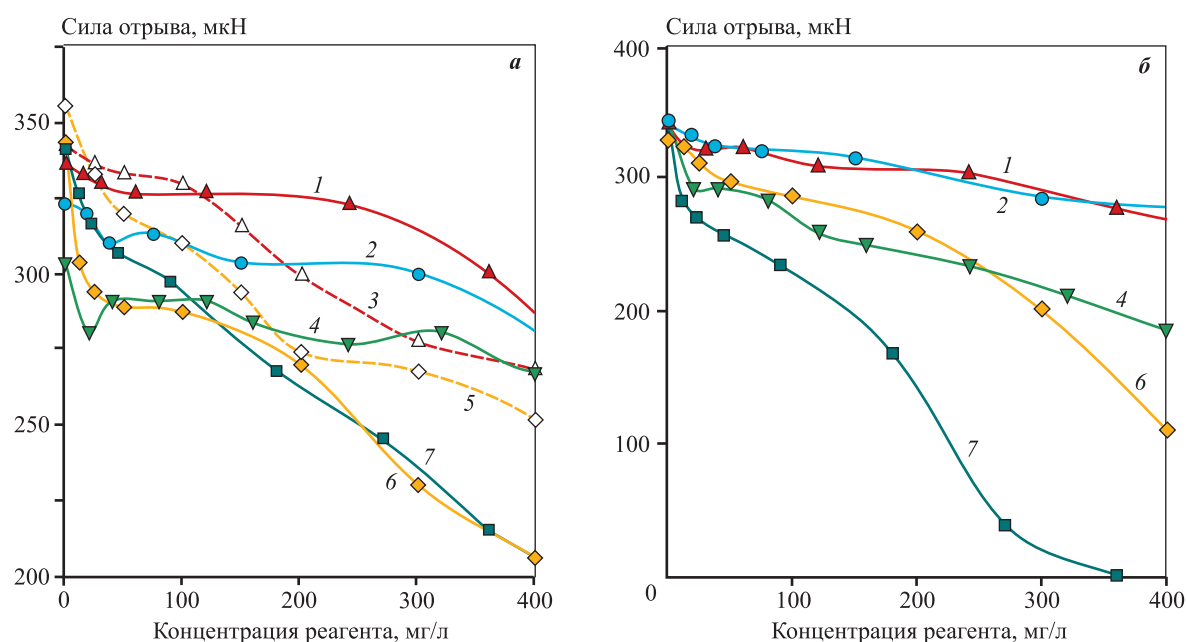


Рис. 4. Сила отрыва пузырька воздуха от пентландита (1, 2, 4, 6, 7) и пирротина (3, 5) (а), а также талька (б) в присутствии депрессоров

1, 3 — КМК БУР-1В; 2 — гумат Na; 4 — Depramin 347; 5, 6 — КМЦ 7Н; 7 — ПАЦ-Н

Fig. 4. Detachment force of air bubble from pentlandite (1, 2, 4, 6, 7) and pyrrhotite (3, 5) (a) and talc (b) in the presence of depressants:

1, 3 — CMS BUR-1V; 2 — sodium humate; 4 — Depramin 347; 5, 6 — CMC 7N; 7 — PAC-N

пирротине способствовало большей адсорбции полисахарида [19].

Проведенные исследования показали большую эффективность применения депрессоров на основе КМЦ (с точки зрения подавления силикатов и селективности действия) по сравнению с КМК и гуматом Na при флотации оталькованной медно-никелевой руды.

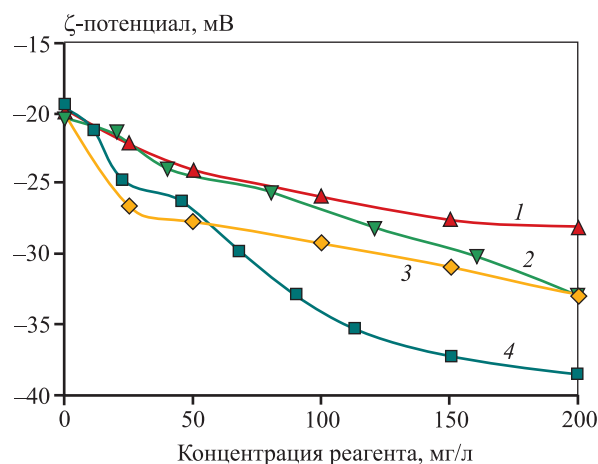


Рис. 5. Сравнение влияния анионных депрессоров на ζ -потенциал талька при pH = 9
1 – КМК БУР-1В; 2 – Depramin 347; 3 – КМЦ 7Н; 4 – ПАЦ-Н

Fig. 5. Comparison of anionic depressants influence on talc zeta potential at pH = 9

1 – CMS BUR-1V; 2 – Depramin 347; 3 – CMC 7N; 4 – PAC-N

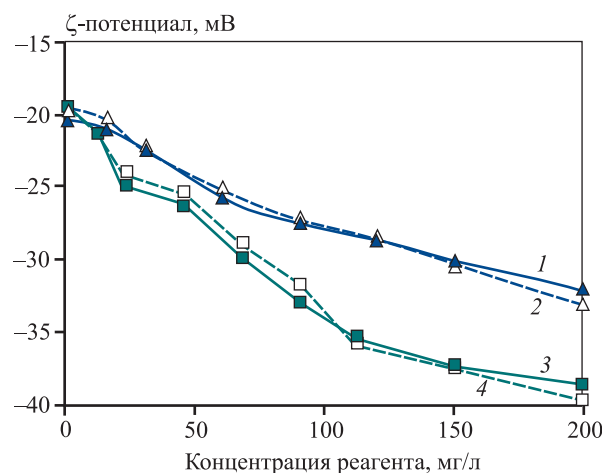


Рис. 6. Влияние pH на ζ -потенциал талька в присутствии депрессоров

1, 2 – КМК; 3, 4 – ПАЦ-Н
1, 3 – pH = 9; 2, 4 – pH = 7

Fig. 6. pH influence on talc ζ -potential in the presence of depressants

1, 2 – CMS; 3, 4 – PAC-N
1, 3 – pH = 9; 2, 4 – pH = 7

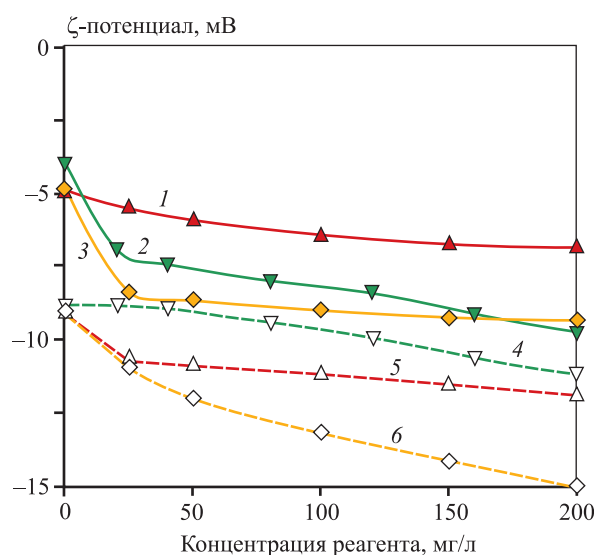


Рис. 7. Влияние концентрации депрессоров на ζ -потенциал халькопирита (1–3) и пирротина (4–6) при pH = 7

1, 5 – КМК БУР-1В; 2, 4 – Depramin 347; 3, 6 – КМЦ 7Н

Fig. 7. Influence of depressants concentration on ζ -potential of chalcopyrite (1–3) and pyrrhotite (4–6) at pH = 7

1, 5 – CMS BUR-1V; 2, 4 – Depramin 347; 3, 6 – CMC 7N

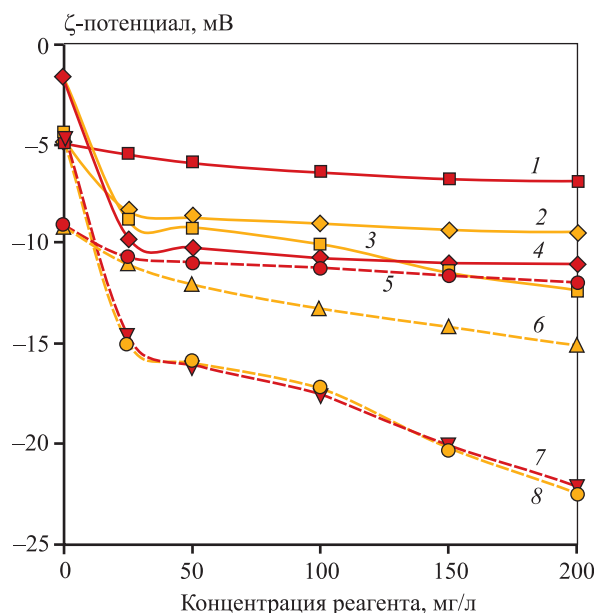


Рис. 8. Электрокинетический потенциал халькопирита (1–4) и пирротина (5–8) в присутствии КМК БУР-1В (1, 4, 5, 7) и КМЦ 7Н (2, 3, 6, 8) при pH = 7 (1, 2, 5, 6) и pH = 9 (3, 4, 7, 8)

Fig. 8. Electrokinetic potential of chalcopyrite (1–4) and pyrrhotite (5–8) with CMS BUR-1V (1, 4, 5, 7) and CMC 7N (2, 3, 6, 8) at pH = 7 (1, 2, 5, 6) and pH = 9 (3, 4, 7, 8)

С увеличением вязкости (степени полимеризации) КМЦ и ее СЗ усиливается подавляющее действие полимера и на силикаты, и на сульфиды, а также снижается селективность разделения сульфидов от силикатов. Наиболее эффективны при флотации малосульфидной Cu—Ni-руды КМЦ со средними значениями этих характеристик.

Анализ выявленных усредненных относительных изменений параметров взаимодействия талька с исследуемыми депрессорами, а также известных физико-химических свойств изученных реагентов, включая значения константы кислотности (pKa) и максимальной величины их адсорбции на поверхности талька (Γ) [20–26], свидетельствует о том, что эффективность депрессоров при флотации оталькованной медно-никелевой руды убывает в ряду: карбоксиметилцеллюлоза → карбоксиметилированный крахмал → полиакриловая кислота (ПАК) → гумат натрия (ГН) (рис. 9). Это обусловлено уменьшением кислотных свойств реагентов, убыванием их адсорбционного сродства к тальку и снижением доли активных карбоксильных групп, принимающих участие в формировании электрокинетического потенциала.

Таким образом, из полученных данных следует,

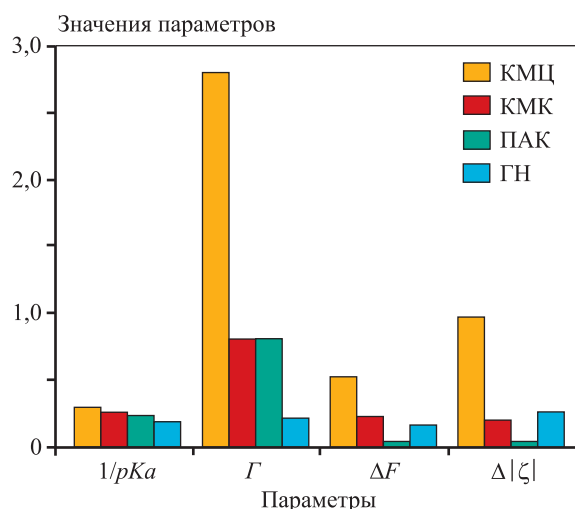


Рис. 9. Относительное изменение параметров взаимодействия полимерных реагентов-депрессоров с тальком

Γ — величина адсорбции, mg/m^2 ; ΔF — относительное снижение силы отрыва, доли ед.; $\Delta|\zeta|$ — относительное увеличение модуля электрокинетического потенциала, доли ед.; pKa — показатель константы кислотности

Fig. 9. Relative change of interaction parameters for polymeric reagents with talc

Γ — adsorption value, mg/m^2 ; ΔF — relative decrease of detachment force; $\Delta|\zeta|$ — relative increase of electrokinetic potential modulus; pKa — the indicator of acidity constant

что наибольшей депрессирующей способностью при флотации сульфидов по отношению к тальку обладают полианионная целлюлоза ПАЦ-Н и КМЦ 7Н.

На основании комплекса экспериментальных и аналитических исследований депрессирующего действия отечественных образцов карбоксиметилированного крахмала (КМК БУР, КМК-363), карбоксиметилцеллюлозы (ПАЦ-Н, КМЦ 7Н), полиакриловой кислоты (ПАК) и гумата натрия (ГН) по отношению к тальку (флотоактивным силикатам) при флотации оталькованной малосульфидной медно-никелевой руды установлена закономерность убывания депрессирующей способности исследованных реагентов, содержащих карбоксильные группы, по отношению к тальку. При этом выявлена тенденция к возрастанию депрессирующей способности образцов КМЦ с увеличением степени замещения, что позволяет снизить содержание вредной примеси в концентрате.

Заключение

На основании комплекса экспериментальных и аналитических исследований депрессирующего действия отечественных образцов полимерных анионоактивных реагентов, содержащих карбоксильные группы, по отношению к тальку (флотоактивным силикатам) при флотации оталькованной малосульфидной Cu—Ni-руды установлено, что их депрессирующая способность убывает в следующей последовательности: карбоксиметилцеллюлоза → карбоксиметилированный крахмал → полиакриловая кислота → гумат натрия. Это обусловлено уменьшением значений параметров, характеризующих сродство указанных реагентов к тальку. С увеличением степени замещения в молекулах КМЦ депрессирующая способность возрастает. Полученные данные обосновывают применение отечественных промышленных образцов карбоксиметилцеллюлозы ПАЦ-Н и КМЦ 7Н для их использования в качестве депрессоров флотоактивных силикатов, в частности талька, который является вредной примесью в концентрате.

Список литературы/References

1. Becker M., Harris P.J., Wiese J.G., Bradshaw D.J. Mineralogical characterisation of naturally floatable gangue in Merensky Reef ore flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 2009;93(3-4):246—255. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.10.004>

2. Kusuma Andreas M., Liu Qingxia, Zeng Hongbo. Understanding interaction mechanisms between pentlandite and gangue minerals by zeta potential and surface force measurements. *Minerals Engineering*. 2014;69:15–23. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.005>
3. Bulatovic S.M. Handbook of flotation reagents. Chemistry, theory and practice. Flotation sulfide ores. Amsterdam: Elsevier, 2007. 448 p.
4. Zhao K., Gu G., Wang C., Rao X., Wang X., Xiong X. The effect of a new polysaccharide on the depression of talc and the flotation of a nickel-copper sulfide ore. *Minerals Engineering*. 2015;77:99–106. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.02.014>
5. Beattie David A., Huynh Le, Kaggwa Gillian B.N., Ralston John. 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>
6. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Саркисова Л.М., Шрадер Э.А., Копыльцов А.А. Влияние молекулярного веса карбоксиметилированных крахмалов на их депрессирующее действие при флотации оталькованной платинометаллической Cu–Ni руды. В сб.: *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья*: Материалы XXVII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XX Уральской горнопромышленной декады (г. Екатеринбург, 7–8 апреля 2022 г.). Екатеринбург: ИП Русских А.В., 2022. С. 216–219.
7. Zhang Chenxu, Tan Yiping, Yin Fengxiang, Wu Jiamei, Wang Lichang, Cao Jian. The influence of branched chain length on different causticized starches for the depression of serpentine in the flotation of pentlandite. *Minerals*. 2022;12:1081. <https://doi.org/10.3390/min12091081>
8. Khoso Sultan Ahmed, Hu Yuehua, Liu Runqing, Tian Mengjie, Sun Wei, Gao Ya, Han Haisheng, Gao Zhiyong. Selective depression of pyrite with a novel functionally modified biopolymer in a Cu–Fe flotation system. *Minerals Engineering*. 2019;135:55–63. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.044>
9. 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.
10. Parolis L.A.S., Groenmeyer G.V., Harris P.J. Equilibrium adsorption studies of polysaccharides on talc: The effects of molecular weight and charge and the influence of metal cations. *Mining, Metallurgy & Exploration volume*. 2005;22:12–16.
11. McFadzean B., Dicks P., Groenmeyer G., Harris P., O'Connor C. The effect of molecular weight on the adsorption and efficacy of polysaccharide depressants. *Minerals Engineering*. 2011;24(5):463–469.
12. Khraisheh M., Holland C., Creany C., Harris P., Parolis L. Effect of molecular weight and concentration on the adsorption of CMC onto talc at different ionic strengths. *International Journal of Mineral Processing*. 2005;75:197–206. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.012>
13. Parolis Lesley A.S., Rene van der Merwe, Groenmeyer Gary V., Harris Peter J. The influence of metal cations on the behaviour of carboxymethyl celluloses as talc depressants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2008;317(1–3):109–115. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.10.001>
14. Wiese J.G., Harris P.J., Bradshaw D.J. The use of very low molecular weight polysaccharides as depressants in PGM flotation. *Minerals Engineering*. 2008;21(6):471–482. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.02.013>
15. Mierczynska-Vasilev Agnieszka, Beattie David A. Adsorption of tailored carboxymethyl cellulose polymers on talc and chalcopyrite: Correlation between coverage, wettability, and flotation. *Minerals Engineering*. 2010;23(11–13):985–993.
16. Jenkins P., Ralston J. Adsorption of a polysaccharide at the talc-aqueous solution interface. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 1998;139:27–40.
17. Кузнецова И.Н., Лавриненко А.А., Шрадер Э.А., Саркисова Л.М. Снижение извлечения флотоактивных силикатов в коллективный концентрат при флотации малосульфидной платинометаллической руды. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019;5:200–208. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-200-208>
- 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. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;5:200–208. (In Russ.).
18. Khoso Sultan Ahmed, Gao Zhiyong, Tian Mengjie, Hu Yuehua, Sun Wei. Adsorption and depression mechanism of an environmentally friendly reagent in differential flotation of Cu–Fe sulphides. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(6):5422–5431. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.00>
19. Khoso Sultan Ahmed, Hu Yuehua, Liu Runqing, Tian Mengjie, Sun Wei, Gao Ya, Han Haisheng, Gao Zhiyong. Selective depression of pyrite with a novel functionally modified biopolymer in a Cu–Fe flotation system. *Minerals Engineering*. 2019;135:55–63. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.044>
20. Zhivkov A.M. Electric properties of carboxymethyl cellulose. In: *Cellulose — fundamental aspects*. Eds. T. van de Ven, L. Godbout. London: IntechOpen, 2013. P. 197–226.

21. Lefnaoui S., Moulai-Mostefa N. Synthesis and evaluation of the structural and physicochemical properties of carboxymethyl pregelatinized starch as a pharmaceutical excipient. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 2015;23:698–711.
22. Wiśniewska M., Urban T., Grządka E., Zarko V.I., Gun'ko V.M. Comparison of adsorption affinity of polyacrylic acid for surfaces of mixed silica–alumina. *Colloid and Polymer Science*. 2014;292:699–705.
23. Laird D.A., Koskinen W.C. Triazine soil interactions. In: *The triazine herbicides*. Eds. LeBaron H.M., McFarland J.E., Burnside O.C. Amsterdam: Elsevier B.V., 2008. P. 275–299.
24. Bazar J.A., Rahimi M., Fathinia S., Jafari M., Chipakwe V., Chelgani S.C. Talc flotation: An overview. *Minerals*. 2021;11:662.
25. 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.
26. Duowei Yuan, Lei Xie, Xingwei Shi, Longsheng Yi, Guofan Zhang, Hao Zhang, Qi Liu, Hongbo Zeng. Selective flotation separation of molybdenite and talc by humic substances. *Minerals Engineering*. 2018;117:34–41.

Информация об авторах

Анатолий Афанасьевич Лавриненко — д.т.н., гл. науч. сотрудник, заведующий лабораторией Института 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

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

Information about the authors

Anatoliy A. Lavrinenko — Dr. Sc. (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

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

Вклад авторов

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

И.Н. Кузнецова — приготовление проб руды для проведения исследований, выполнение экспериментов по флотации, измерению силы отрыва и электрокинетического потенциала, обработка экспериментальных данных, участие в обсуждении результатов.

О.Г. Лусинян — приготовление проб руды для проведения исследований, выполнение экспериментов по флотации и расчетов, участие в обсуждении результатов.

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

Contribution of the authors

A.A. Lavrinenko — formulated the research concept, defined the study's objective, analyzed experimental data, and authored the manuscript.

I.N. Kuznetsova — prepared ore samples for investigation, conducted flotation experiments, conducted detachment force and zeta potential measurements, processed experimental data, and contributed to result discussions.

O.G. Lusinyan — prepared ore samples for investigation, conducted flotation experiments and calculations, and participated in result discussion.

G.Yu. Golberg — acquired and analyzed published data, analyzed experimental data, participated and contributed to result discussions.

Статья поступила в редакцию 22.05.2023, подписана в печать 24.07.2023

The article was submitted 22.05.2023, accepted for publication 24.07.2023