

# НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ, ГОРНЫЕ НАУКИ

## SUBSOIL USE, MINING SCIENCES

Научная статья

УДК 622.765.431.2

DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-4-55-70

### Аспектный анализ механизмов загрязнения сульфидных концентратов шламами из вмещающих пород и обзор методов его снижения

**Яна Николаевна Арабаджи<sup>1</sup>, Наталья Николаевна Орехова<sup>2</sup>,  
Камиль Ильясович Абдрахманов<sup>3</sup>, Эмиль Ильясович Абдрахманов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», г. Верхняя Пышма, Россия

<sup>2,3,4</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия

<sup>1</sup>yana\_arabadzhi@mail.ru, <sup>2</sup>n\_orechova@mail.ru, <sup>3</sup>neponima@inbox.ru, <sup>4</sup>wiken32@mail.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию  
30.09.2024

Одобрена после  
рецензирования  
22.10.2024

Принята к публикации  
24.10.2024

#### Ключевые слова:

*обогащение полезных  
ископаемых,  
полиметаллические  
сульфидные руды,  
флотация, концентрат,  
повышение качества,  
минералы вмещающей  
породы, депрессоры,  
механический вынос,  
агрегация, анализ теории и  
практики*

Актуальность исследования заключается в необходимости повышения качества концентратов флотационного обогащения при более тонком помоле руды для раскрытия ценного минерала и, как следствие, увеличения количества частиц вмещающей породы шламовой фракции. Цель исследования – систематизация и анализ существующих способов повышения качества концентрата при прямой флотации из ошамованной пульпы, определение наиболее эффективных и перспективных из них. Задачи исследования: формирование нового подхода к изучаемой проблеме; обоснование значимости проблемы и предложенного направления её решения; выявление новых методов повышения качества концентрата при флотации из пульпы с высоким содержанием шламов. Объект исследования – методы снижения содержания пустой породы в пенном продукте. Предмет исследования – область применения и эффективность методов снижения содержания пустой породы в пенном продукте. Методология и методы исследования: аспектный анализ научной информации, анализ практики повышения качества сульфидных концентратов. Рассмотрены вопросы образования тонких и сверхтонких частиц минералов пустой породы, их флотоактивности и налипания на частицы сульфидов флотоактивной крупности, механического выноса в пенный продукт. Представлены результаты исследований российских и зарубежных учёных преимущественно за последнее десятилетие. Установлено, что основное направление снижения доли пустой породы в концентратах – подбор депрессоров, в том числе из ранее не используемых химических веществ, а также создание депрессоров после первоначального моделирования в современных специализированных программных продуктах. Такой подход позволяет подобрать эффективный депрессор под конкретное рудное сырьё. Сформулирован вывод о том, что для фундаментальных исследований представляет интерес селективная агрегация тонких и сверхтонких частиц минералов. Важным направлением снижения загрязнения концентратов частицами пустой породы является изучение закономерностей их механического выноса, на который влияет множество факторов. Изучению механического выноса и определению значений его параметров в отечественной литературе уделено мало внимания.

## Original article

## Aspect Analysis Mechanisms Contamination of Sulfide Concentrates by Slime from Host Rock Minerals and a Review of its Reduction Methods

Yana N. Arabadzhi<sup>1</sup>, Natalia N. Orekhova<sup>2</sup>, Kamil I. Abdrakhmanov<sup>3</sup>,  
Emil I. Abdrakhmanov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

<sup>2,3,4</sup>Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>yana\_arabadzhi@mail.ru, <sup>2</sup>n\_orekhova@mail.ru, <sup>3</sup>neponima@inbox.ru, <sup>4</sup>wiken32@mail.ru

### Information about the article

Received 30 September 2024

Approved after review  
22 October 2024

Accepted for publication  
24 October 2024

### Keywords:

mineral processing,  
polymetallic sulfide ores,  
flotation, concentrate,  
quality improvement, host  
rock minerals, depressors,  
mechanical removal,  
aggregation, theory and  
practice analysis

The relevance of the study lies in the need to improve the quality of flotation concentrates when finer grinding of ore is required to reveal a valuable mineral and, as a consequence, increase the amount of particles of the host rock of the sludge fraction. The purpose of the study is to systematize and analyze the existing methods for improving the quality of concentrate during direct flotation from slimed pulp, to determine the most effective and promising of them. The challenges are as follows: to develop a new approach to the problem under study; substantiation of the problem significance and the proposed direction for its solution; to identify new methods for solving the problem of reducing the quality of concentrate during flotation from pulp with a high slime content. The object of the study is the methods for reducing the content of gangue in the froth product. The subject of the study is the scope and effectiveness of the methods for reducing the content of gangue in the froth product. Methodology and research methods used by the authors are: an aspect analysis of scientific information, an analysis of the practice of improving the quality of sulfide concentrates. The article considers the issues of gangue mineral flotation activity, formation of fine and ultrafine gangue particles and their adhesion to flotation-active sulfide particles, and mechanical removal into the foam product. The article presents the results of studies by Russian and foreign scientists, mainly over the past decade. It has been established that the main direction of reducing the mass fraction of gangue in concentrates is the selection of depressants, and their modeling in modern specialized software products is becoming increasingly relevant for creating depressants by modifying existing ones, selecting previously unused chemicals, or creating reagent compositions. This approach allows selecting an individual effective depressant for a specific ore raw material. Selective aggregation of fine and ultrafine mineral particles is of interest for fundamental research. An important direction for reducing the contamination of sulfide concentrates with gangue components is the study of minimizing their mechanical removal, which is influenced by many factors. Little attention has been paid to the study of mechanical removal and the determination of the values of the parameters characterizing this phenomenon in the domestic literature.

**Введение.** Отрасль цветной металлургии играет значительную роль в мировой экономике и экономике России, оказывая влияние на ключевые отрасли промышленности. Большинство цветных металлов получают из руд, используя отделение металлсодержащего минерала от пустой породы и далее отделение металла от других элементов с помощью обогащительных и металлургических процессов. Обогащение руды осуществляется методами радиометрической, магнитной или электрической сепарации, гравитации и флотации.

В металлургии цветных металлов применяются разные методы и процессы, в частности:

1) пирометаллургические методы – при избирательной плавке восстановительного или окислительного характера;

2) гидрометаллургические методы – при создании растворимых соединений с их дальнейшим выщелачиванием;

3) металлотермические процессы – при использовании других металлов в качестве восстановителей.

Исходным сырьём для металлургического передела являются флотационные концентраты.

**Актуальность исследования.** Металлургические процессы довольно сложны, поэтому для их эффективности и экономичности важно высокое качество рудного концентрата. Растущие требования к экономичности и технологичности производства делают необходимым повышение качества концентратов по содержанию не только основного металла, но и примесей.

Качество концентрата зависит от качества и свойств исходной руды, а также от эффективности режимов рудоподготовки и селекции. Современная практика организации процессов рудоподготовки, с учётом усложнения вещественного состава добываемых руд и вовлечения в переработку тонковкрапленных бедных руд, не позволяет исключить избыточное переизмельчение, что приводит к образованию повышенного количества тонких и ультратонких частиц (шламов) как сульфидных, так и породообразующих минералов, оказывающего влияние на эффективность селекции минералов при флотации.

**Объект исследования** – методы снижения содержания пустой породы в пенном продукте.

**Предмет исследования** – область и эффективность применения методов снижения содержания пустой породы в пенном продукте. Соотношение рудных и породообразующих, полезных и вредных компонентов является одной из важнейших характеристик руды, определяющих технологию её переработки.

**Цель исследования** – систематизация, анализ существующих способов повышения качества концентрата при прямой флотации из ошламованной пульпы, определение наиболее эффективных и перспективных из них.

**Задачи исследования:** формирование нового подхода к решению проблемы недостаточно высокого качества рудного концентрата при флотации из ошламованной пульпы; обоснование значимости проблемы и предложенного направления её решения; выявление новых методов решения проблемы снижения качества концентрата при флотации из пульпы с высоким содержанием шламов.

**Методология и методы исследования.** В работе применяли аспектный анализ научной информации, анализ практики повышения качества сульфидных концентратов. Рассмотрены вопросы флотоактивности минералов пустой породы, образования тонких и сверхтонких частиц пустой породы и их налипания на частицы сульфидов флотоактивной крупности, механического выноса частиц пустой породы в пенный продукт.

**Разработанность темы исследования.** Проблемам снижения содержания примесных компонентов пустой породы в концентратах посвящено большое количество исследований. С целью определения наиболее эффективных и перспективных из них выполнен анализ литературных источников. Проанализировано более 30 статей, опубли-

кованных в открытом доступе за последние 15 лет, посвящённых указанной тематике.

Конечная крупность измельчения определяется, в первую очередь, крупностью вкрапленности извлекаемых минералов. Чем полнее раскрыты зёрна разделяемых минералов, тем эффективнее последующий процесс обогащения. С 2000-х гг. при разработке технологических схем практически повсеместно используется операция межцикловой флотации, которая позволяет снизить тонину помола исходной руды перед флотационной переработкой с 50–60 %<sup>1</sup> [36] класса крупности <71 мкм до >85 %. Кроме того, всё большее применение находит бисерное (сверхтонкое) измельчение, которое используют в операциях доизмельчения черновых концентратов.

В процессе переработки тонковкрапленных сульфидных руд известны следующие основные причины повышенного содержания компонентов пустой породы в пенном концентрате [20]:

- флотоактивность минералов пустой породы;

- образование тонких и сверхтонких частиц пустой породы и их налипание на частицы сульфидов флотоактивной крупности;

- механический вынос в пенный продукт.

Во флотационной системе все приведённые причины совместно оказывают влияние на результат флотации, но каждая из проблем отдельно требует детального изучения и решения.

**Результаты исследования. Способность минералов пустой породы к флотации.** Основными нерудными минералами вмещающих пород сульфидных руд являются карбонатные и силикатные минералы: кварц, кальцит, доломит, хлорит, полевой шпат, тальк, слюды. В исследованиях, посвящённых изучению сульфидных руд на обогатимость, мало внимания уделяется определению гидрофобности поверхности нерудных минералов вмещающих пород. Считается, что кварц, кальцит и большая часть силикатов относятся к гидрофильным минералам. В литературе смачиваемость их поверхности характеризуется следующими значениями краевых углов  $\Theta$ : гипс – 0, слюда – 1–12, кальцит – 20 [12], кварц – 3 [17], 44,2 [11], жильный кварц – 49,2 [6],  $\alpha$ -кварц – 29 [43], доломит – 48,8 [11]. Природно гидрофобными считаются тальк –  $\Theta = 73^\circ$  [18], слю-

<sup>1</sup> Полькин С. И., Адамов Э. В. Обогащение руд цветных и редких металлов: учебник. – М.: Недра, 1975. – 461 с.

дистые минералы: мусковит –  $\Theta = 116$ ,  $\Theta = 30-0$  [32], серицит, хлорит.

Известно, что предварительная обработка поверхности минералов оказывает влияние на изменение краевого угла смачивания. В результате анализа информации по изменению краевого угла смачивания породообразующих минералов в зависимости от различных параметров обработки и способа измерения авторами [2] произведена систематизация данных (табл. 1).

Следует отметить существенное различие значения краевых углов смачивания минералов водой в разных источниках. Это можно объяснить тем, что характеристики смачивания значительно различаются в зависимости от состава и кристаллографической поверхности. Например, частицы слоистых силикатных минералов являются анизотропными и имеют, по меньшей мере, две поверхности – лицевую и краевую. Краевые поверхности являются гидрофильными со значительными участками для Н-связи молекул воды. Лицевые поверхности кремнезёма могут иметь низкую полярность в некоторых случаях и демонстрировать гидрофобное состояние поверхности. Кроме того, слоистые силикаты различаются по составу, особенно по катиону в октаэдрическом положении, например по магнию или алюминию. Помимо замещения в октаэдрическом положении замещение может также происхо-

дить для кремния в тетраэдрическом положении, следовательно, состав этих глинистых минералов может стать довольно сложным со значительными вариациями в их поверхностных свойствах. В работах [32; 42] экспериментальными исследованиями и молекулярно-динамическим моделированием лежачей капли на последовательности трёхслойных силикатных минералов с разной степенью замещения кремния алюминием в октаэдрическом положении – пиррофиллита, иллита, слюды и мусковита – показано, что при изоморфном замещении алюминия на кремний всего на 5 % краевой угол смачивания значительно уменьшается – с 70 до 30° (рис. 1, 2).

Лицевые поверхности иллита и мусковита полностью смачиваются водой, о чём свидетельствует контактный угол, равный нулю.

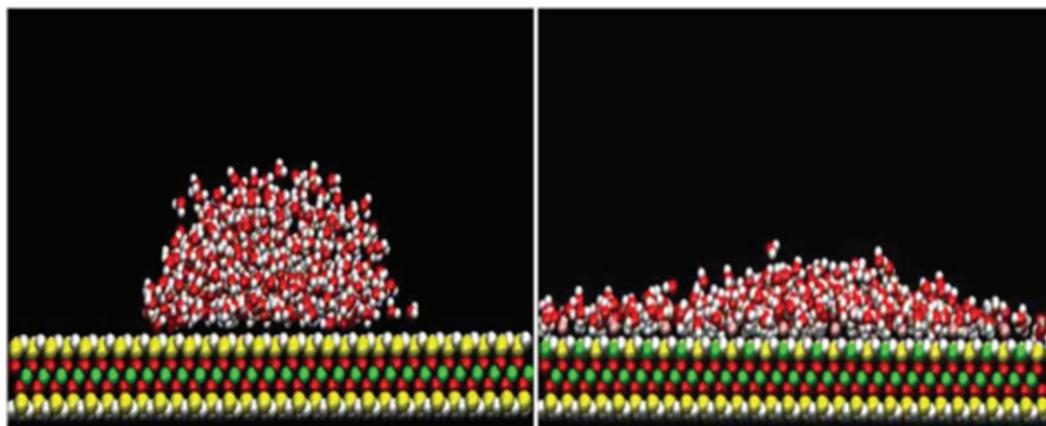
Однако флотоактивность хорошо смачиваемых минералов вмещающих пород может повышаться вследствие наличия включений, например углистого вещества, либо при использовании физического воздействия для увеличения селективности раскрытия сростков [6] или вследствие адсорбции соответствующих химических реагентов, главным образом коллекторов.

Наиболее распространённым решением проблемы высокой флотоактивности вмещающей породы является применение депрессоров.

Таблица 1 / Table 1

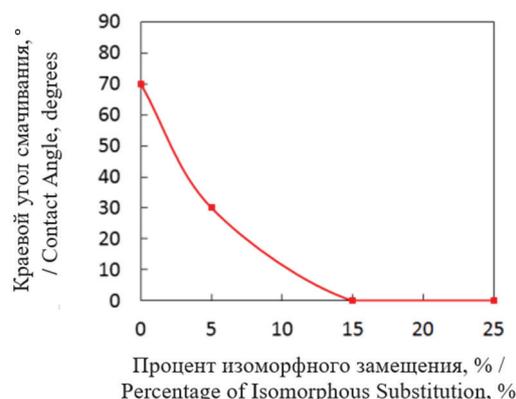
Изменение краевых углов смачивания при разных факторах воздействия на поверхность минералов [2] / Variation of contact angles of wetting under different factors of influence on the surface of minerals [2]

<i>Минерал / Mineral</i>	<i>Краевой угол смачивания / Contact angle <math>\Theta</math>, °</i>	<i>Параметр обработки / Processing parameter</i>
Кварц / Quartz	20,0÷67,1	Без обработки / Without processing
	34,0÷43,0	Влияние шероховатости поверхности образцов / Influence of sample surface roughness
	15,0÷38,0	Влияние температуры и относительной влажности / Influence of temperature and relative humidity
	44,2→85,1	Обработка ПАВ / Surfactant processing
	9,0÷80,0	Влияние pH / Influence of pH
	29,9→26,9	Добавление ионов $\text{Ca}^{2+}$ и $\text{CO}_2^{2-}$ / Addition of $\text{Ca}^{2+}$ and $\text{CO}_2^{2-}$ ions
Кальцит / Calcite	40,0÷80,0	Без обработки / Without processing
	50,0÷78,0	Обработка ПАВ / Surfactant processing
	40,0÷53,0	Влияние pH / Influence of pH
	53,0÷65,0	Обработка олеатом натрия / Sodium oleate processing
	73,0÷82,0	Олеат натрия + кислород / Sodium oleate + oxygen
	82,0→56,0	ПАВ + декстрин / Surfactant + dextrin



**Рис. 1.** Снимок капли воды, содержащей 500 молекул воды, растекающейся по поверхности пирофиллита (001) (слева) и мусковита (001) (справа). Время моделирования составляет 1 нс. Цветовой код атомов следующий: зелёный – Al; розовый – K; красный – O; белый – H; жёлтый – Si: а – пирофиллит (001); б – мусковит (001) [32] / **Fig. 1.** Snapshot of water drop containing 500 water molecules spreading at the pyrophyllite (001) (left) and muscovite (001) (right) surfaces. The simulation time is 1 ns. The color code for the atoms is as follows: green – Al; pink – K; red – O; white – H; yellow – Si: a – pyrophyllite (001); б – muscovite (001) [32]

**Рис. 2.** Угол смачивания водой, рассчитанный по результатам МДС, в зависимости от процента изоморфного замещения алюминия на кремнезёмной тетраэдрической поверхности слоистых силикатов [42] / **Fig. 2.** Water contact angle calculated from MDS results as a function of the isomorphous substitution percentage of aluminum in the silica tetrahedral surface of layered silicates [42]



**Применение депрессоров.** В последнем десятилетии основным направлением снижения массовой доли пустой породы в концентратах, изучаемым российскими учёными и исследователями, является подбор депрессоров, позволяющих снизить природную гидрофобность минералов пустой породы или адсорбцию собирателей на шламах. Данному направлению посвящено более 50 % исследований [3–5; 8–10; 14; 17; 19; 21; 26; 28; 33; 39]. Изучается эффективность применения индивидуальных депрессоров и их сочетаний при флотации сульфидных руд, в частности золота и серебросодержащих, медно-никелевых, полиметаллических, а также иных руд. Современные программные продукты в комплексе с известными данными, полученными на практике, позволяют смоделировать совершенно новые депрессоры для последующего изготовления в промышленном масштабе.

Для депрессии минералов талька, хлорита и других магниевых гидросиликатов при флотации медно-никелевой руды в исследованиях [20] использован депрессор Foenumgraesum (FGM), представляющий собой полисахарид с высокой молекулярной массой. Результаты флотации одиночных минералов и их модельных смесей, а также реального образца руды показали, что FGM можно рассматривать в качестве селективного подавителя для минералов талька и хлорита при незначительном эффекте депрессии на рудные минералы. Механизм адсорбции депрессора исследован методами измерения адсорбции, дзета-потенциала и ИК-спектроскопии. Установлено, что в диапазоне pH 6–8 ед. FGM активно адсорбируется на тальке (хемосорбция), в то время как адсорбция на халькопирите и пентландите отсутствует или является незначительной.

Специалистами Института проблем комплексного освоения недр РАН А. А. Лаври-

ненко, И. Н. Кузнецовой и другими выполнен комплекс экспериментальных и аналитических исследований действия отечественных депрессоров на оталькованной малосульфидной медно-никелевой руде, по результатам которых установлено, что их депрессирующая способность убывает в следующей последовательности: карбоксиметилцеллюлоза → карбоксиметилированный крахмал → полиакриловая кислота → гуamat натрия [10].

При флотации свинцово-цинковой руды для получения высококачественного цинкового концентрата решающее значение имеет подавление доломита. Коллективом авторов [39] обнаружено, что мелкозернистый доломит более флотоактивен, чем крупнозернистый, и он является основной причиной загрязнения цинкового концентрата магнием. Для подавления доломита успешно использован экологически чистый альгинат натрия (SA), а установленный механизм адсорбции заключается в хелатировании молекул SA с участками Ca на поверхности доломита. В целом, доломит избирательно подавлялся

SA при флотации сфалерита, а содержание магния в цинковом концентрате снизилось с 3,65 до 2,37 % [37].

Например, учёными рассмотрен синергетический эффект, обоснованы расходы жидкого стекла и КМЦ низкосамещённого. В ранних исследованиях установлено, что жидкое стекло более сильно депрессирует кремниевые минералы, а КМК (нз) при этом сильнее депрессирует кальциевые минералы. С применением факторного планирования эксперимента обосновано совокупное депрессирующее действие их комбинации с расходами 55 г/т и 60 г/т (соответственно жидкое стекло и КМЦ (нз)). Применение комбинации депрессоров позволяет повысить качество концентрата, снижая в нём долю пустой породы. Извлечение диоксида кремния в концентрат снижено на 7,15 %, кальция – на 5,10 % [3] (табл. 2, 3).

Эффективность применения жидкого стекла также доказана при разработке технологии переработки свинцово-цинковой руды месторождения «Зарнисори шимоли» [4].

Таблица 2 / Table 2

Результаты флотационного обогащения образцов исходной руды [3] / Results of flotation of ore samples [3]

Наименование продукта / Product Name	Выход / Yield, %	Массовая доля / Mass fraction, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат / Concentrate	14,02	16,64	34,16	13,44	5,39	2,550
Хвосты / Refinement tailings	85,98	5,40	37,30	12,74	0,12	0,073
Исходная руда / Original ore	100,00	6,98	36,86	12,84	0,86	0,420
Наименование продукта / Product Name	–	Извлечение / Extraction degree, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат / Concentrate	–	33,42	12,99	14,68	87,87	85,12
Хвосты / Refinement tailings	–	66,58	87,01	85,32	12,13	14,88
Исходная руда / Original ore	–	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Таблица 3 / Table 3

Результаты заверочных опытов флотационного обогащения на обоснованном реагентном режиме [3] / Results of verification experiments of flotation on a justified reagent scheme [3]

Наименование продукта / Product name	Выход / Yield, %	Массовая доля / Mass fraction, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат / Concentrate	12,03	15,66	24,19	8,03	6,33	2,950
Хвосты / Refinement tailings	87,97	5,79	38,59	13,50	0,11	0,074
Исходная руда / Original ore	100,00	6,98	36,86	12,84	0,86	0,420
Наименование продукта / Product name	–	Извлечение / Extraction degree, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат / Concentrate	–	26,99	7,89	7,52	88,55	84,50
Хвосты / Refinement tailings	–	73,01	92,11	92,48	11,45	15,50
Исходная руда / Original ore	–	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Для подавления углеродсодержащих компонентов и повышения качества флотоконцентрата, выделяемого из золотосодержащих руд Майского месторождения, успешно применён углеводородный полимер Aero-633 (Saytec) [8]. Сообщается об эффективном применении реагента – подавителя углерода (P-2), представляющего собой смесь сополимеров полиметиленафталинсульфоната натрия, оптимизированного молекулярно-массового распределения, полученного в результате органического синтеза и модификатора, обеспечивающего улучшение эксплуатационных свойств. Данный реагент отечественного производителя является аналогом указанного ранее. Авторы показывают, что во флотоконцентрате, полученном с использованием реагента P-2, массовая доля породообразующих минералов значительно ниже, чем в концентрате без его использования, – 19,4 % против 53 %, а доля сульфидов выше – 74,5 % против 34,0 % [16]. Позднее эффективность применения P-2 для депрессии углеродистого вещества подтверждена при переработке золотосодержащих руд одного из месторождений Узбекистана. Установлено, что реагент P-2 показал положительные результаты по снижению содержания (с 4,22 до 1,27 %) и извлечения (с 8,74 до 0,91 %) углеродистого вещества в концентрат флотации, способствовал повышению качества флотоконцентрата по содержанию золота (с 30,5 до 71,4 г/т) при незначительном снижении уровня извлечения [13].

Все приведённые результаты исследований говорят о повышении качества концентратов при применении депрессоров. Однако практика показывает, что применение реагентов-депрессоров в ряде случаев не снижает содержания минералов пустой породы в концентратах или даже вызывает подавление ценных компонентов [3; 9; 13; 24; 37], уменьшая, соответственно, выпуск металла, что в совокупности с ростом себестоимости за счёт расширения номенклатуры применяемых реагентов приводит к отрицательному финансовому результату переработки сырья.

В частности, экспериментальными исследованиями при переработке серебро-полиметаллических руд месторождения Гольцовое установлено, что усложнение реагентного режима за счёт введения дополнительных реагентов приводит к увеличению потерь металлов с хвостами обогащения. При высоком расходе ксантогената снижается селективность его действия, наблюдается актива-

ция частиц пустой породы и шламов. Подача депрессора пустой породы (жидкого стекла) не способствует снижению содержания  $\text{SiO}_2$  в концентратах обогащения [9].

Адсорбция сфалеритом используемого для депрессии доломита при переработке карбонатной свинцово-цинковой руды альгината натрия подавляла флотацию сульфидного минерала. Нивелировать депрессирующее действие подавителя пустой породы на сульфид цинка удалось подбором оптимального количества ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , дозируемых в процесс флотации в виде медного купороса, что усиливало адгезию бутилового ксантогената и ингибировало депрессирующий эффект альгината натрия. Сфалерит сохранял хорошую флотоактивность [37].

Соответственно, при подборе депрессора минералов вмещающей породы необходимо не только изучить механизмы его взаимодействия с поверхностью минералов, осуществить подбор оптимальных точек и расходов, но и определить рациональные условия подготовки пульпы перед проведением флотации для предотвращения или нивелирования распространения депрессирующего действия подавителя пустой породы на извлекаемые минералы. Только в этом случае применение депрессоров пустой породы позволит повысить качество сульфидного концентрата, в частности увеличить массовую долю цветного металла и/или снизить содержание вредных примесей.

Современной тенденцией подбора флотореагентов является применение компьютерного моделирования. Например, в работе [15] продемонстрирована эффективность компьютерных технологий и химических программ для анализа кластеров реагентов, способных избирательно закрепляться на поверхности минералов, которые необходимо депрессировать.

**Образование тонких и сверхтонких частиц пустой породы и их налипание на частицы сульфидов флотоактивной крупности.** В водной среде скорость налипания мелких частиц на крупные в 400–500 раз больше скорости агрегации мелких частиц между собой, а частота соударения частиц, значительно отличающихся крупностью, стремится к единице, в то время как для мелких частиц она пренебрежимо мала [7; 27]. Соответственно, скорость образования агрегатов при взаимодействии полидисперсных частиц выше, чем в дисперсной системе, образованной мелкими частицами одного размера.

Налипание мелких частиц пустой породы на рудный минерал может приводить к изменению его флотационной активности. В работе [29] изучено влияние изменения состава нерудных минералов на флотируемость сульфидов и установлено, что при смешении известняковых скарновых и монцонитовых руд наблюдаются значительная депрессия ранее чистого молибденита и снижение извлечения халькопирита. Причиной депрессии является поверхностное загрязнение Ca и Fe Mg-содержащими частицами нерудных минералов гидрофильных видов из скарновой руды. В. Triffet и соавторы определили четыре минерала из скарновой руды, которые коррелируют с плохими показателями флотации сульфидов меди и молибдена: тальк ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ), амфиболы (включая роговую обманку  $Ca_2(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH)_2$  и актинолит  $Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$ , андрадит ( $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$ ), кальцит ( $CaCO_3$ ) [36].

В. Feng и соавторы описали метод снижения вредного воздействия шламовых покрытий слоистого силиката (серпентина) на пентландит [28] и сообщили, что добавление кварца (-150 + 75 мкм) к суспензии пентландит/серпентин смягчило налипание шламовых частиц серпентина и значительно улучшило извлечение пентландита. Они объяснили это более сильным притяжением между серпентиновыми шламами и частицами кварца, чем между серпентином и пентландитом, поскольку в их тестах кварц был более отрицательно заряжен, чем пентландит, в диапазоне pH 4–11 ед. Данные результаты говорят о возможном потенциале исследований, направленных на снижение негативного эффекта налипания шламов на сульфиды флотоактивной крупности.

Известны результаты изучения влияния размера частиц пустой породы на извлечение ультратонких и тонких частиц сульфидных минералов в процессе флотации.

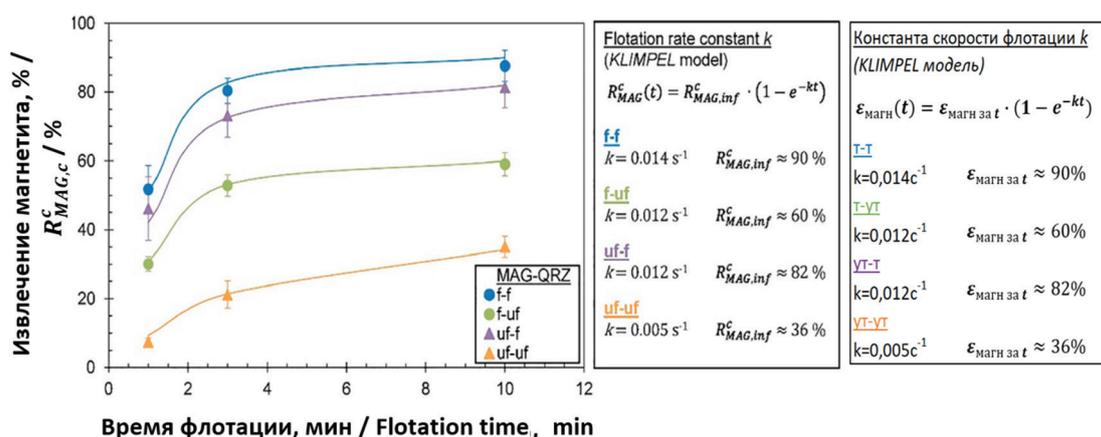
Установлено, что сверхтонкие гидрофильные частицы кварца подавляюще влияют на эффективность столкновения пузырьков и частиц сульфидов, а также мелкие частицы сульфидов извлекаются менее эффективно, если присутствуют ультратонкие частицы пустой породы [30]. Т. Leistner и другие исследователи предположили, что, в дополнение к общепризнанному определяющему фактору соотношения размеров целевых частиц и пузырьков, ультратонкие гидрофильные частицы пустой породы могут препятствовать эффективности столкно-

вения частиц с пузырьками, даже если они присутствуют в низкой объёмной доле, что показано на примере магнетита и кварца. Гипотеза основана на результатах испытаний (рис. 3), определённых при изучении влияния размера частиц пустой породы на флотационное извлечение тонких (определённых в их исследовании как 10–50 мкм и обозначенных буквой «f») и ультратонких (крупностью менее 10 мкм и обозначенных «uf») частиц [30].

Результаты исследований в системе магнетит-кварц (MAG-QRZ) показали, что тонкий магнетит плохо извлекается в присутствии ультратонкого кварца, но в системе питания uf-f даже ультратонкий магнетит имел относительно высокое извлечение (~80 %) в присутствии тонкого кварца. Сравнивая результаты флотационной системы f-uf и uf-f, разумно предположить, что низкое извлечение тонких частиц магнетита может быть вызвано изменёнными гидродинамическими условиями, вызванными ультратонкими гидрофильными частицами пустой породы. Без ультратонких частиц пустой породы даже ультратонкий MAG мог бы быть эффективно извлечён с использованием относительно больших пузырьков.

В настоящее время влияние различных соотношений тонких и ультратонких частиц минералов вмещающих пород на эффективность флотации ценных минералов сульфидных руд недостаточно изучено. Данный вопрос представляет интерес для фундаментальных исследований с целью выявления и описания закономерностей такого влияния и их использования для повышения качества сульфидных концентратов в промышленных условиях.

**Снижение эффекта механического выноса. Влияние размера частиц.** Вода и измельчённые минеральные частицы, диспергированные в воде между пузырьками воздуха чуть ниже границы раздела пульпа-пена, переносятся в пену с поднимающимися пузырьками и, следовательно, извлекаются в концентрат. Данный процесс извлечения воды и выведения твёрдых частиц минералов при флотации известен как механический вынос [44]. Исследователями Австралийского центра минеральных исследований Юлиуса Крутчнитта определено, что степень механического выноса минералов пустой породы уменьшается с увеличением размера его частицы. В нормальном диапазоне условий эксплуатации флотационной машины лишь несколько частиц пустой породы крупнее 50 мкм извлекаются путём выноса [31].



**Рис. 3.** Экспериментальные и адаптированные кинетические модели флотационных испытаний для четырёх систем частиц в питании – совокупное извлечение магнетита в зависимости от времени флотации. Константа скорости флотации для каждой системы питания рассчитывается с использованием модели KLIMPEL. Цитируется из [30] с разрешения Elsevier / **Fig. 3.** Experimental and fitted kinetic models of flotation tests for the four particle feed systems – cumulative recovery of magnetite as a function of flotation time. The flotation rate constant for each feed system is calculated using the KLIMPEL model. Reproduced from [30] with permission from Elsevier

Ученые А. Абиди и соавторы [1], а также D. Seaman и другие исследователи [35] определили, что механический вынос твёрдых частиц (пустой породы) из фазы пульпы в фазу пены происходит вследствие прикрепления этих частиц к воде в потоке пузырьков. Такой механический вынос, составляющий суть проблемы ухудшения качества концентрата, мало зависит от характеристик поверхности частиц (гидрофобных и гидрофильных) и, соответственно, не является избирательным. Он пропорционален количеству воды, поступающей в концентрат.

Известно, что существует также прямая и неизбежная связь между потоком подаваемого воздуха, извлечением воды и, в свою очередь, извлечением гидрофильной пустой породы [34; 40]. Более того, имеется повышенная тенденция к тому, что более мелкие пузырьки будут увлекаться потоком хвостов нижнего слива [30], особенно когда поток подачи пульпы увеличивается.

Известно, что на механический вынос влияет множество факторов, включая свойства сырья, главным образом размер и плотность частиц, эксплуатационные параметры, такие как плотность пульпы, скорость вращения импеллера, скорость и расход воздуха, подаваемого во флотомашину, высота пенного слоя и пр. Понимание, контроль и управление данными факторами являются одним из способов снижения негативного влияния механического выноса компонентов пустой породы в пенный продукт при флотации.

Практикой работы определено несколько эффективных методов снижения механического выноса шламовых частиц в пенный продукт [23; 38–40]. В общем понимании все они основываются на технических факторах управления технологическим процессом и позволяют изменять время нахождения пульпы и пены во флотомашине.

Использование физических модификаторов потока пены, например перегородок, крадеров, желобов и лопастей, также изменяет время нахождения пены в камере флотомашин и, следовательно, может повлиять на степень механического выноса. Работы над пенными перегородками проводили исследователи из Южной Африки, которые показали, что время пребывания пены в камере флотомашин можно изменить и обеспечить большее время дренажа захваченных частиц пустой породы в пене, особенно вблизи границы перелива концентрата в пенный желоб [25].

Концепция подачи промывной воды в пену в колонных флотомашин для создания нисходящего потока жидкости через пену разработана в 1980–1990 гг. Промывка пены при флотации выполняет несколько функций, в том числе уменьшение степени механического выноса пустой породы. По существу, чистая вода разбрызгивается поверх пенного продукта перед его разгрузкой в желоб концентрата. Помывочная вода, фильтруясь вниз сквозь пенный слой, смывает унесенные тонкие породные и глинистые частицы<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Технология обогащения. – URL: [http://www.twellgroup.ru/column\\_flotation.html](http://www.twellgroup.ru/column_flotation.html) (дата обращения: 12.09.2024). – Текст: электронный.

Принцип орошения пенного слоя для повышения качества готового концентрата по содержанию основного компонента и сниженной массовой доле примесных породных минералов получает всё большее распространение и используется при разработке современных флотомашин: Concorde Cell, Jameson Cell, Microcell, Reflux Flotation Cell и др.

В частности, австралийскими учёными доказана эффективность противоточной промывки пенного слоя в камере Reflux для снижения содержания кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) в никелевом концентрате при переработке пентландитсодержащей руды, перерабатываемой на фабрике западной Австралии [41].

В. Д. Самыгин и соавторы исследователи при изучении флотации магнетита на лабораторной механической флотомашине, снабжённой двумя проточными камерами – с нижним и боковым выводом хвостов, определили, что влияние направления движения потока пульпы и времени пребывания пульпы во флотационной камере однозначно проявляется в изменении соотношения легко- и труднофлотируемых фракций через параметры массопереноса частиц с газовой фазой [14].

Л. В. Шумиловой и О. С. Костиковой приведены данные по влиянию режимных параметров технологического процесса на эффективность переработки серебро-полиметаллической руды месторождения Гольцовское в современных флотомашин Jameson Cell. В ходе работ установлено, что для материала, содержащего большое количество частиц крупностью менее 20 мкм, плотность питания должна составлять 20–25 % твёрдого. Увеличение плотности с 20 до 40 % твёрдого приводит к снижению извлечения серебра с 80 до 60 % абс. [21]. Ими же и другими учёными показана возможность увеличения попутного извлечения серебра в концентрат применением дополнительных реагентов-собирающих с физической формой адсорбции на поверхности рудных минералов [22].

Учёными Китайского горно-технологического университета детально изучен механизм совместного воздействия скорости подачи воздуха и высоты пенного слоя на механический вынос породного минерала при флотации искусственной медной руды, состоящей из чистого халькопирита и кварца [33]. Кварц в данных исследованиях был мономинерален и не флотоактивен, соответственно, его извлечение в концентрат объясняется исключительно механическим

выносом. Результаты показали, что на коэффициент механического выноса влияют как расход воздуха, так и высота пенного слоя, а совокупное влияние этих переменных на коэффициент механического выноса сильно зависит от размера частиц.

Результатами экспериментов установлено, что извлечение кварца в концентрат повышается при увеличении расхода воздуха и снижении высоты пенного слоя. Увеличение пенного слоя с 1,5 до 3,5 см при одинаковом расходе воздуха позволяет снизить извлечение кварца в концентрат более чем в 8 раз.

Тесты по определению фракционного состава минералов кварца (в диапазоне +150; -150+106; -106+75; -75+53; -53+38; -38+20; -20 мкм), механически вынесенных в концентрат, показали, что для всех фракций коэффициент механического выноса повышается с увеличением скорости подачи воздуха при высоте пенного слоя 1,5 и 2,5 см. При невысоком пенном слое коэффициент механического выноса мелких частиц резко возрастает с увеличением расхода воздуха, однако по мере увеличения крупности кварца данная тенденция становится менее очевидной.

Следовательно, определено, что коэффициент выноса минералов пустой породы зависит от глубины пены, и этому эффекту способствуют как скорость и расход воздуха, так и размер частиц. Результаты приведённых исследований подтверждают выводы австралийских учёных о том, что в целом степень коэффициента механического выноса увеличивается с повышением скорости подачи воздуха и уменьшается с увеличением высоты пены. Однако влияние расхода воздуха и высоты пены на механический вынос нельзя рассматривать независимо. Эффект также сильно зависит от размера частиц [44].

Общеизвестно влияние турбулентности в пульпе на эффективность флотационного процесса. Турбулентность в камере флотационной машины поддаётся корректировке посредством подбора оптимальной скорости вращения импеллера и создания оптимального размера пузырьков, обеспечивающих возможность транспортировки закрепившихся частиц минералов. Приведённые методы включают увеличение зоны покоя, снижение скорости вращения рабочего колеса и использование горизонтальных перегородок. Увеличение зоны покоя (области, расположенной над турбулентной зоной в пульпе) помогает снизить вероятность извлечения минералов пустой породы путём механического выноса

[39]. Например, при исследовании влияния нанопузырьков и гидродинамических параметров на флотацию крупного кварца иранскими учёными установлено, что при увеличении диаметра ротора с 7 до 9 см при прочих равных условиях в присутствии наноразмерных пузырьков извлечение кварца снизилось с 98 до 97,5 %. Отмечено, что присутствие нанопузырьков играет основную роль во флотации крупных частиц кварца. Экспериментальные данные подтвердили, что в присутствии нанопузырьков извлечение крупных частиц увеличивается до 21 % [33].

**Выводы.** Целью данного обзора являются анализ и обобщение известных методов снижения сопутствующего извлечения компонентов пустой породы в концентрат при флотационном обогащении сульфидного минерального сырья.

Важность обзора заключается в расширении понимания основных доступных механизмов, поиске наиболее эффективных методов и определении приоритетных направлений для дальнейших детальных исследований на примере действующего предприятия Алтая, перерабатывающего полиметаллическое минеральное сырьё, где снижение содержания диоксида кремния в цинковом концентрате является стратегически важной задачей, стоящей перед технологами.

В ходе выполнения работы установлено, что за последние десятилетия основополагающим направлением снижения массовой доли пустой породы в концентратах является подбор депрессоров, позволяющих снизить природную гидрофобность минералов пустой породы или адсорбцию собирателей на шламах.

Однако при подборе депрессора минералов вмещающей породы необходимо не только изучить механизмы его взаимодействия с поверхностью минералов, осуществить подбор оптимальных точек и расходов, но и определить рациональные условия подготовки пульпы перед проведением флотации для предотвращения или нивелирования распространения депрессирующего действия пода-

вителя пустой породы на извлекаемые минералы.

В связи с этим всё более актуальным является моделирование с использованием современных специализированных программных продуктов. Моделирование с учётом состояния минеральной поверхности позволяет создавать депрессоры путём модификации уже существующих, подбора новых химических веществ, которые ранее не использовались, или создания оригинальных составов депрессирующих композиций, что позволяет подбирать индивидуальный эффективный депрессор под конкретное рудное сырьё.

Представляет интерес для фундаментальных исследований селективная агрегация тонких и сверхтонких частиц минералов. Выявленные закономерности и особенности такой агрегации могут быть использованы для повышения качества сульфидных концентратов в промышленных условиях.

Не менее важным направлением снижения загрязнения сульфидных концентратов компонентами пустой породы является минимизация их механического выноса. Обзор показывает, что на механический вынос влияет множество факторов, включая свойства сырья, главным образом размер и плотность частиц, эксплуатационные параметры, такие как плотность пульпы, скорость вращения импеллера, скорость и расход воздуха, подаваемого во флотокамеру, крупность частиц и размер пузырьков воздуха, высота пенного слоя и мн. др.

Однако, учитывая многофакторность промышленного технологического процесса, где контролю, влиянию и изменению подвергаются все перечисленные факторы, включая свойства поверхностей минералов, в литературе недостаточно внимания уделено определению конкретного вклада каждого фактора в механический вынос пустой породы в пенный продукт и эффектам изменения значений фактора или исключения фактора в общем эффекте снижения загрязнения сульфидных концентратов минералами вмещающих пород и сопутствующими им вредными примесями.

### Список литературы

1. Абиди А., Эламари К., Бакауи А., Якуби А. Механический вынос и истинная флотация природной полиметаллической руды // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С. 181–189.
2. Александрова Т. Н., Прохорова Е. О. Модификация свойств породообразующих минералов при флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 123–138.

3. 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. С. 161–174.
4. Бадалов Дж. Н., Самихов Ш. Р., Махмудов Х. А. Технология флотации свинцово-цинковых руд месторождения «Зарнисори шимоли» // Научно-практический семинар ГМИТ. Бустон, 2023. С. 43–46.
5. Бобракова А. А. Обоснование реагентного режима сульфидной флотации молибденсодержащих руд алюмосиликатного состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 12. С. 298–301.
6. Бунин И. Ж., Чантурия В. А., Рязанцева М. В., Анашкина Н. Е. Изменение функционально-химического состава поверхности и технологических свойств природного кварца при воздействии высоковольтных наносекундных импульсов // Известия Российской академии наук. 2019. № 83. С. 738–742.
7. Ефремов И. Ф. Периодические коллоидные структуры. Л.: Химия, 1971. 191 с.
8. Карчанова А. П., Асанова И. И., Мязин В. П. Направление повышения качества флотоконцентрации золотосодержащих руд на майском месторождении // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 10. С. 4–12.
9. Куликова О. С. Оптимизация процессов обогащения серебро-полиметаллических руд для снижения вредного влияния шламов // Евразийский Союз Учёных. 2015. № 5. С. 84–88.
10. 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. 2023. № 5. С. 5–14.
11. Опанасенко О. Н., Крутько Н. П., Жигалова О. Л., Лукша О. В. Влияние химического строения катионных ПАВ на процессы смачивания порообразующих минералов // Известия Национальной академии наук Беларуси. 2019. № 55. С. 142–148.
12. Ребиндер П. А., Липец Е. М., Римская М. М. Физикохимия флотационных процессов: Эксперимент. исследования по физикохимии поверхностных слоёв и явлений смачивания в применении к флотационным процессам. М.: Metallurgizdat, 1933. 230 с.
13. Саидахмедов А. А., Юлдашев С. М., Зуваева М. С. К вопросу о депрессии углерода при флотации углистых золотосодержащих руд // Journal of Advances in Engineering Technology. 2022. № 2. С. 51–54.
14. Самыгин В. Д., Филиппов Л. О., Матинин А. С., Северов В. В. Влияние направления движения и времени пребывания потока пульпы в камере флотомашин на эффективность флотационного процесса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 12. С. 1–20.
15. Соложенкин П. М., Кубак Д. А., Петухов В. Н. Компьютерное моделирование сульфидрильных соединений с гидроксильными радикалами и прогноз их в качестве флотореагентов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. Т. 14, № 1. 2016. С. 26–33.
16. Сосипаторов А. И., Панченко Г. М., Высотин В. В. Перспектива использования реагента-депрессора отечественного производства при флотации углистых золотосодержащих руд // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 9. С. 184–193.
17. Тарасевич Ю. И. Поверхностная энергия гидрофильных и гидрофобных адсорбентов // Коллоидный журнал. Т. 69, № 2. 2007. С. 235–243.
18. Тарасевич Ю. И., Аксененко Е. В. Гидрофобность базальной поверхности талька // Коллоидный журнал. Т. 76, № 4. 2014. С. 483–489.
19. Усманова Н. Ф., Маркосян С. М., Тимошенко Л. И., Пасюга Д. В. Применение гуматного реагента в качестве депрессора при флотации медно-никелевых руд // Материалы Международного совещания (Плаксинские чтения). 2019. С. 164–166.
20. Фатъянов А. В., Никитина Л. Г., Щеглова С. А. Переработка карбонатно-флюоритовых руд месторождений Монголии и Забайкалья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23, № 4. С. 33–37.
21. Шумилова Л. В., Костикова О. С. Влияние режимных параметров на эффективность работы флотомашин Jameson Cell // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. С. 160–163.
22. Шумилова Л. В., Костикова О. С., Черкасов В. Г., Воронов Е. Т., Лимберова В. В. Исследование реагентного режима при флотации труднообогатимых серебро-полиметаллических руд // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 68–79.
23. Ata S. Phenomena in the froth phase of flotation – A review // International Journal of Mineral Processing. 2012. No. 25. P. 1–12.
24. Beattie D., Huynn Le, Kaggwa Gilian B. N., Ralston J. The effect of polysaccharides and polyacrilamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals // Minerals Engineering. 2006. No. 19. P. 598–608.
25. Bhondayi C., Moys M. N. Effects of gas distribution profile on flotation cell performance: An experimental investigation // International Journal of Mineral Processing. 2015. No. 135. P. 20–31.
26. Chen H., Luo A., Feng Y., Chen J. Depression mechanism of novel organic phosphoryl depressants on calcite: DFT and coordination studies // Journal of Molecular Liquids. 2003. No. 389. P. 1–15.

27. Evdokimov S. I., Golikov N. S., Zadkov D. A., Voitovich E. V., Kondratiev V. V., Petrovskiy A. A., Konyukhov V. Yu., Gladkikh V. A. Studying the Flotation of Gold-Bearing Ores Using Carrier Minerals // *Minerals*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 88. DOI: 10.3390/min14010088.
28. Feng B., Feng Q., Lu Y. A novel method to limit the detrimental effect of serpentine on the flotation of pentlandite // *International Journal of Mineral Processing*. 2012. No. 114. P. 11–13.
29. Gerson A. R., Smart R. S. C., Li J., Kawashima N., Weedon D., Triffett B., Bradshaw D. Diagnosis of the surface chemical influences on flotation performance: Copper sulfides and molybdenite // *International Journal of Mineral Processing*. 2012. No. 106. P. 16–30.
30. Leistner T., Peuker Urs. A., Rudolph M. How gangue particle size affect the recovery of ultrafine and fine particles during froth flotation // *Minerals Engineering*. 2017. No. 109. P. 1–9.
31. McFadzean B., Becker M., Geldenhuys S., Sweet J. A methodology for gangue management in the flotation of a PGM-bearing ore through laboratory tests, mineralogical analysis and circuit modelling // *Minerals Engineering*. 2024. No. 208. P. 1–10.
32. Miller J. D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces // *International Journal of Mineral Processing*. 2016. No. 156. P. 62–68.
33. Nazari S., Shafaei S. Z., Gharabaghi M., Ahmadi R., Shahbazi B. Effects of nanobubble and hydrodynamic parameters on coarse quartz flotation // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. No. 29. P. 289–295.
34. Nguyen A. V., Harvey P. A., Jameson G. J. Influence of gas flow rate and frothers on water recovery in a froth column // *Minerals Engineering*. 2003. No. 16. P. 1143–1147.
35. Seaman D. R., Manlapig E. V., Franzidis J. P. Selective transport of attached particles across the pulp-froth interface // *Minerals Engineering*. 2006. No. 19. P. 841–851.
36. Triffett B., Veloo C., Adair B. J. I., Bradshaw D. An investigation of the factors affecting the recovery of molybdenite in the Kennecott Utah Copper bulk flotation circuit // *Minerals Engineering*. 2008. Vol. 21, no. 12–14. P. 832–840.
37. Wang Ch., Liu R., Xie F., Zhai Q., Sun W., Wen X., Li J. Separation of sphalerite and dolomite using sodium alginate as an environmentally friendly depressant in a carbonate-hasted Pb-Zn ore system // *Journal of Cleaner Production*. 2022. No. 380. P. 1–12.
38. Wang L., Peng Y., Runge K., Bradshaw D. A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation // *Minerals Engineering*. 2015. No. 70. P. 77–91.
39. Wang L., Peng Y., Runge K. Entrainment in froth flotation: The degree of entrainment and its contributing factors // *Powder Technology*. 2016. No. 288. P. 202–211.
40. Wang P., Reyes F., Cilliers Jan J., Brito-Parada P. R. Evaluation of collector performance at the bubble particle scale // *Minerals Engineering*. 2020. No. 147. P. 148–159.
41. Wang P., Yvon M., Parkes S., Galvin K. P. Enhancing nickel grade and recovery with counter-current washing of the concentrated bubbly-zone of a single stage REFLUX Flotation Cell // *Minerals Engineering*. 2024. No. 206. P. 1–13.
42. Yin X., Miller J. D. Wettability of kaolinite basal planes based on surface force measurements using atomic force microscopy // *Minerals & Metallurgical Processing*. 2012. Vol. 29. No. 1. P. 13–19.
43. Zhang C., Liu Z., Deng P. Contact angle of soil minerals: A molecular dynamics study // *Computers and Geotechnics*. 2016. No. 75. P. 48–56.
44. Zheng X., Johnson N., Franzidis J. P. Modelling of Entrainment in Industrial Flotation Cells: Water Recovery and Degree of Entrainment // *Minerals Engineering*. 2006. No. 19. P. 1191–1203.

## References

1. Abidi A., Elamari K., Bacaoui A., Yacoubi A. Entrainment and true flotation of a natural complex ore sulfide. *Physical and Technical Problems of Mineral Resources Development*, no. 6, pp. 181–189, 2014. (In Rus.)
2. Alexandrova T. N., Prokhorova E. O. Modification of the rock-forming minerals properties during flotation. *Mining Information and Analytical Bulletin*, no. 12, pp. 123–138, 2023. (In Rus.)
3. 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 sulfide goldbearing ore flotation. *Mining Information and Analytical Bulletin*, no. 6-2, pp. 161–174, 2022. (In Rus.)
4. Badalov D. N., Samikhov Sh. R., Makmudov Kh. A. Technology of flotation of lead-zinc ores of the Zarnisori shimoli deposit. *Scientific and Practical Seminar of the State Museum of Technology*. Buston, 2023. P. 43–46. (In Rus.)
5. Bobrakova A. A. Rationale reagent equipment regime of sulfide flotation of molybdenum ores alumosilicate composition. *Mining Information and Analytical Bulletin*, no. 12, pp. 298–301, 2012. (In Rus.)
6. Bunin I. Z., Chanturiya V. A., Ryazantseva M. V., Anashkina N. E. Change in the functional chemical composition of the surface and technological properties of natural quartz under the influence of high-voltage nanosecond pulses. *News of the Russian Academy of Sciences*, vol. 83, no. 6, pp. 738–742, 2019. (In Rus.)

7. Efremov I. F. Periodic colloidal structures. Leningrad: Chemistry, 1971. (In Rus.)
8. Karchanova A. P., Asanova I. I., Myazin V. P. Towards improving the quality of gold ore flotation concentrate at the Mayskoe field. *Transbaikal State University Journal*, no. 10, pp. 4–12, 2015. (In Rus.)
9. Kulikova O. S. Optimization of silver-polymetallic ore concentration processes to reduce the harmful effect of slime. *Eurasian Union of Scientists*, no.5, pp. 84–88, 2015. (In Rus.)
10. 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. *News of Universities*, no. 5, pp. 5–14, 2023. (In Rus.)
11. Opanasenko O. N., Krutko N. P., Zhigalova O. L., Luksha O. V. Influence of the chemical structure of cation surfact. *News of the National Academy of Sciences of Belarus*, no. 55, pp. 142–148, 2019. (In Rus.)
12. Rebinder P. A., Lipets, E. M., Rimskaya M. M. Physicochemistry of flotation processes: Experiment. Studies on the physicochemistry of surface layers and wetting phenomena applied to flotation processes. Moscow: Metallurgizdat, 1933. (In Rus.)
13. Saidakhmedov A. A., Yuldashev S. M., Zuvaeva M. S. On the issue of carbon depression during flotation of coal gold-bearing ores. *Journal of Advances in Engineering Technology*, no. 2, pp. 51–54, 2022. (In Rus.)
14. Samiguin V. D., Filippov L. O., Matinin A. S., Severov V. V., Influence of pulp flux direction and residence time in the flotation cell on the efficiency of flotation process. *Mining Information and Analytical Bulletin*, no. 12, pp. 1–20, 2011. (In Rus.)
15. Solozhenkin P. M., Kubak D. A., Petukhov V. N. Computer-aided simulation of sulphydric compounds with hydroxyl radicals with forecast on their application as flotation reagents. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov*, no. 1, pp. 26–33, 2016. (In Rus.)
16. Sosipatorov A. I., Panchenko G. M., Vysotin V. V. Application prospects of domestic depressor reagent under carbonaceous gold-bearing ore flotation. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, no. 9, pp. 184–193, 2018. (In Rus.)
17. Tarasevich Yu. I., Aksenenko E. V. Surface energy of hydrophilic and hydrophobic adsorbents. *Colloid Journal*, no.2, pp. 235–243, 2007. (In Rus.)
18. Tarasevich Yu. I., Aksenenko E. V. Hydrophobicity of talc basal surface. *Colloid Journal*, no. 4, pp. 483–489, 2014. (In Rus.)
19. Usmanova N. F., Markosyan S. M., Timoshenko L. I., Pasyuga D. V. The use of a humate reagent as a depressor in the flotation of copper-nickel ores. *Materials of the International Meeting (Plaksin readings)*, pp.164–166, 2019. (In Rus.)
20. Fatyanov A. V., Nikitina L. G., Shcheglova S. A. Processing of carbonate-fluorite ores of the deposits of Mongolia and Transbaikalia. *Transbaikal State University Journal*, no. 4, pp. 33–37, 2017. (In Rus.)
21. Shumilova L. V., Kostikova O. S. Sulfidization of silver-polymetallic ores of “Goltsovee” deposit for decreasing loss of silver in mill tailings. *Journal of Mining Institute*, no. 230, pp. 160–166, 2018. (In Rus.)
22. Shumilova L. V., Kostikova O. S., Cherkasov V. G., Voronov E. T., Limberova V. V. Investigation of reagent mode in flotation of hard-to-enrich silver-polymetallic ores. *Transbaikal State University Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 68–79, 2020. (In Rus.)
23. Ata S. Phenomena in the froth phase of flotation – A review. *International Journal of Mineral Processing*, no. 25, pp. 1–12, 2012. (In Eng.)
24. Beattie D., Huynn Le, Kaggwa Gilian B. N., Ralston J. The effect of polysaccharides and polyacrylamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals. *Minerals Engineering*, 2006, no. 19, pp. 598–608. (In Eng.)
25. Bhodayi C., Moys M. N. Effects of gas distribution profile on flotation cell performance: an experimental investigation. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, no. 135, pp. 20–31. (In Eng.)
26. Chen H., Luo A., Feng Y., Chen J. Depression mechanism of novel organic phosphoryl depressants on calcite: DFT and coordination studies. *Journal of Molecular Liquids*, 2003, no. 389, pp. 1–15. (In Eng.)
27. Evdokimov S. I., Golikov N. S., Zadkov D. A., Voitovich E. V., Kondratiev V. V., Petrovskiy A. A., Konyukhov V.Yu. and Gladkikh V. A. Studying the Flotation of Gold-Bearing Ores Using Carrier Minerals. *Minerals*, vol. 14, no. 1, pp. 88, 2024. DOI: 10.3390/min14010088. (In Eng.)
28. Feng B., Feng Q., Lu Y. A novel method to limit the detrimental effect of serpentine on the flotation of pentlandite. *International Journal of Mineral Processing*, no. 114, pp. 11–13, 2012. (In Eng.)
29. Gerson A. R., Smart R. S. C., Li J., Kawashima N., Weedon D., Triffett B., Bradshaw D. Diagnosis of the surface chemical influences on flotation performance: Copper sulfides and molybdenite. *International Journal of Mineral Processing*, no. 106, pp. 16–30, 2012. (In Eng.)
30. Leistner T., Peuker Urs. A., Rudolph M. How gangue particle size affect the recovery of ultrafine and fine particles during froth flotation. *Minerals Engineering*, no. 109, p. 1–9, 2017. (In Eng.)
31. McFadzean B., Becker M., Geldenhuys S., Sweet J. A methodology for gangue management in the flotation of a PGM-bearing ore through laboratory tests, mineralogical analysis and circuit modelling. *Minerals Engineering*. no. 208, pp. 1–10, 2024. (In Eng.)

32. Miller J. D., Wang X., Jin J., Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces. *International Journal of Mineral Processing*, no. 156, pp. 62–68, 2016. (In Eng.)
33. Nazari S., Shafaei S. Z., Gharabaghi M., Ahmadi R., Shahbazi B. Effects of nanobubble and hydrodynamic parameters on coarse quartz flotation. *International Journal of Mining Science and Technology*, no. 29, pp. 289–295, 2019. (In Eng.)
34. Nguyen A. V., Harvey P. A., Jameson G. J. Influence of gas flow rate and frothers on water recovery in a froth column. *Minerals Engineering*, no. 16, pp. 1143–1147, 2003. (In Eng.)
35. Seaman D. R., Manlapig E. V., Franzidis J. P. Selective transport of attached particles across the pulp-froth interface. *Minerals Engineering*, no. 19, pp. 841–851, 2006. (In Eng.)
36. Triffett B., Veloo C., Adair B. J. I., Bradshaw D. An investigation of the factors affecting the recovery of molybdenite in the Kennecott Utah Copper bulk flotation circuit. *Minerals Engineering*, no. 21, pp. 832–840, 2008. (In Eng.)
37. Wang Ch., Liu R., Xie F., Zhai Q., Sun W., Wen X., Li J. Separation of sphalerite and dolomite using sodium alginate as an environmentally friendly depressant in a carbonate-hasted Pb-Zn ore system. *Journal of Cleaner Production*, no. 380, pp. 1–12, 2022. (In Eng.)
38. Wang L., Peng Y., Runge K., Bradshaw D. A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Minerals Engineering*, no. 70, pp. 77–91, 2015. (In Eng.)
39. Wang L., Peng Y., Runge K. Entrainment in froth flotation: The degree of entrainment and its contributing factors. *Powder Technology*, no. 288, pp. 202–211, 2016. (In Eng.)
40. Wang P., Reyes F., Cilliers Jan J., Brito-Parada P. R. Evaluation of collector performance at the bubble particle scale. *Minerals Engineering*, no. 147, pp. 148–159, 2020. (In Eng.)
41. Wang P., Yvon M., Parkes S., Galvin K. P. Enhancing nickel grade and recovery with counter-current washing of the concentrated bubbly-zone of a single stage REFLUX Flotation Cell. *Minerals Engineering*, no. 206, pp. 1–13, 2024. (In Eng.)
42. Yin X., Miller J. D. Wettability of kaolinite basal planes based on surface force measurements using atomic force microscopy. *Minerals & Metallurgical Processing*, vol. 29, no. 1, pp. 13–19, 2012. (In Eng.)
43. Zhang C., Liu Z., Deng P. Contact angle of soil minerals: A molecular dynamics study. *Computers and Geotechnics*, no. 75, pp. 48–56, 2016. (In Eng.)
44. Zheng X., Johnson N., Franzidis J. P. Modelling of Entrainment in Industrial Flotation Cells: Water Recovery and Degree of Entrainment. *Minerals Engineering*, no. 19, pp. 1191–1203, 2006. (In Eng.)

#### **Информация об авторах**

*Арабаджи Яна Николаевна*, главный специалист управления обогатительного производства, ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», г. Верхняя Пышма, Россия; yana\_arabadzhi@mail.ru. Область научных интересов: обогащение сульфидных полиметаллических руд, флотация.

*Орехова Наталья Николаевна*, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; n\_orechova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3507-5198>. Область научных интересов: обогащение природного и техногенного минерального и гидроминерального сырья, флотация, геоэкология.

*Абдрахманов Камиль Ильясович*, студент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; neponima@inbox.ru. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых.

*Абдрахманов Эмиль Ильясович*, студент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; wiken32@mail.ru. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых.

#### **Information about the authors**

*Arabadzhi Yana N.*, chief specialist, Enrichment production department, Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia; yana\_arabadzhi@mail.ru. Scientific interests: enrichment of sulfide polymetallic ores, flotation.

*Orechova Natalia N.*, doctor of engineering sciences, associate professor, professor, Geology, Surveying and Enrichment of Minerals department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia; n\_orechova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3507-5198>. Scientific interests: enrichment of natural and man-made mineral and hydromineral raw materials, flotation, geoecology.

*Abdrakhmanov Kamil I.*, student, Geology, Surveying and Enrichment of Minerals department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia; neponima@inbox.ru. Scientific interests: mineral processing.

*Abdrakhmanov Emil I.*, student, Geology, Surveying and Enrichment of Minerals department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia; wiken32@mail.ru. Scientific interests: mineral processing.

**Вклад авторов в статью**

---

Арабаджи Я. Н. – анализ и интерпретация полученных данных, составление черновика рукописи или его критический пересмотр с внесением ценного замечания интеллектуального содержания, оформление текста статьи.

Орехова Н. Н. – формирование идеи, формулировка и развитие ключевых целей и задач, обеспечение целостности всех частей статьи и подготовка её окончательного варианта.

Абдрахманов К. И. – сбор данных, систематизация.

Абдрахманов Э. И. – поиск информации, анализ, систематизация.

**The authors' contribution to the article**

Arabadzhi Ya. N. – analysis and interpretation of the data obtained, drafting of the manuscript or its critical revision with the introduction of valuable remarks of intellectual content, design of the text of the article.

Orekhova N. N. – formation of an idea; formulation and development of key goals and objectives, the integrity of all parts of the article and its final version.

Abdrakhmanov K. I. – data collection, systematization.

Abdrakhmanov E. I. – information search, analysis, systematization.

**Для цитирования**

---

Арабаджи Я. Н., Орехова Н. Н., Абдрахманов К. И., Абдрахманов Э. И. Аспектный анализ механизмов загрязнения сульфидных концентратов шламами из вмещающих пород и обзор методов его снижения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 4. С. 55–70. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-4-55-70.

**For citation**

Arabadzhi Ya. N., Orekhova N. N., Abdrakhmanov K. I., Abdrakhmanov E. I. Aspect analysis mechanisms contamination of sulfide concentrates by slime from host rock minerals and a review of its reduction methods // Transbaikal State University Journal. 2024. Vol. 30, no. 4. P. 55–70. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-4-55-70.