

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 622.7

DOI 10.17513/use.38374

**О ВЛИЯНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖИДКОЙ ФАЗЫ ПУЛЬПЫ
НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИИ МЕДНЫХ РУД****Лушина Е.А., Александрова Т.Н.***ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Санкт-Петербург, e-mail: lushina_ea@mail.ru, Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru*

Оборотное водоснабжение является важным аспектом в процессе переработки сырья флотационным методом. Несмотря на экономические и экологические преимущества, при повторном использовании воды происходит усложнение ее ионного состава, что может повлиять на результат процесса флотации. Целью исследования является анализ научно-технической литературы и систематизация данных о факторах, формирующих ионный состав жидкой фазы пульпы при флотации медьсодержащих руд, и оценка их влияния на технологические показатели обогащения. В исследовании проведен анализ более 100 научно-технических источников, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также опубликованных в ведущих специализированных изданиях по горному делу за последние десять лет, 40 из которых отобраны для более глубокой проработки. В работе рассмотрено влияние ионов кальция, магния и меди, а также хлоридсодержащих и сульфоксидных солей на характеристики жидкой фазы пульпы при флотации медных руд. В результате теоретических исследований установлены источники упомянутых ионов в жидкой фазе пульпы и определены закономерности их влияния. Выявлено, что ионы кальция и магния негативно влияют на процесс образования пены и снижают скорость кинетики флотации медных минералов. Наличие хлоридов калия и натрия в воде способно положительно влиять на процесс флотации халькопирита, способствуя образованию устойчивого адсорбционного слоя собирателя на поверхности минерала. Окисление поверхности минералов под воздействием антропогенных факторов и наличие водорастворимых минералов меди обуславливают присутствие сульфат-ионов и катионов меди в воде. Ввиду нарастающих требований по рациональному использованию природных ресурсов актуальным направлением является создание регламентированных требований к химическому составу оборотных вод и внедрение этапа оценки влияния ионного состава пульпы при разработке реагентных режимов флотации.

Ключевые слова: флотация, медные руды, оборотная вода, ионы примеси, жесткость воды, поверхностное натяжение

**INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE LIQUID PHASE
ON THE FLOTATION PROCESS OF COPPER ORE****Lushina E.A., Aleksandrova T.N.***Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg,
e-mail: lushina_ea@mail.ru, Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru*

Water recycling is an important aspect in the flotation processing of raw materials. Despite the economic and environmental benefits in the reuse of water there is a complication of its ionic composition, which can affect the result of the flotation process. The purpose of the study is to analyze scientific and technical literature and systematization of data on the factors that form the ionic composition of the liquid phase of the pulp during flotation of copper-bearing ores and assess their impact on the technological performance of beneficiation. The study analyzes more than 100 scientific and technical sources indexed in the international databases Scopus and Web of Science, as well as published in leading specialized mining publications over the past ten years, 40 of which have been selected for deeper study. The paper considers the influence of calcium, magnesium and copper ions, as well as chloride and sulfide salts on the characteristics of the liquid phase of the pulp during flotation of copper ores. As a result of theoretical researches the sources of the mentioned ions in the liquid phase of pulp are established and the regularities of their influence are determined. It is revealed that calcium and magnesium negatively affect the process of froth formation and reduce the rate of flotation kinetics of copper minerals. The presence of potassium and sodium chloride in water can positively influence the flotation process of chalcopyrite, contributing to the formation of a stable adsorption layer of the collector on the mineral surface. Oxidation of the mineral surface under the influence of anthropogenic factors and the presence of water-soluble minerals. In view of the increasing requirements for the rational use of natural resources, the creation of regulated requirements for the chemical composition of recycled water and the introduction of the stage of assessing the impact of the ionic composition of the slurry in the development of reagent modes of flotation is an important direction.

Keywords: flotation, copper ores, recycled water, impurity ions, water hardness, surface tension

Введение

Согласно прогнозам аналитиков, уровень прироста медных запасов с каждым годом снижается и в долгосрочном аспекте Россия может столкнуться с дефицитом медных ресурсов [1]. Ввиду истощения минерально-сырьевой базы в переработку во-

влекается все больше руд с низким содержанием меди, дальнейшее обогащение которых осложнено присутствием в большом количестве окисленных форм меди, шламов, сростков меди с породообразующими минералами [2]. Для получения медных концентратов из сырья с низким содержа-

нием меди применение традиционных схем обогащения затруднено в связи с непостоянством минералогического состава руды, в том числе каолинизацией и серитизацией вмещающих пород, низкой вкрапленностью и различием флотационных свойств сульфидов меди, поэтому разработка технологии обогащения потребует более глубокого изучения и комплексирования физико-химических факторов [3]. Результат флотационного обогащения во многом зависит от химических реакций, происходящих на всех поверхностях раздела фаз (жидкость – газ, твердое – газ и твердое – жидкость). Изучение факторов, определяющих формирование ионного состава жидкой фазы флотационной пульпы, является актуальным направлением, так как ее состав определяет взаимодействие флотационных реагентов с минеральной поверхностью. Формирование ионного состава жидкой фазы пульпы происходит в основном за счет:

- ионов, выщелачивающихся в воду с поверхности минералов;
- ионов, которые являются примесями в технической и оборотной воде;
- ионов – остатков реагентов, добавляемых на всех этапах обогащения [4; 5].

С целью снижения потребления свежей воды предприятия используют замкнутый водооборот, однако усложнение ионного состава жидкой фазы ввиду накопления тонкодисперсной взвеси, остатков флотореагентов, растворенных ионов солей и тяжелых металлов может привести к снижению контрастности флотационных свойств минералов, а также эффективности процесса флотации. Основным источником оборотной воды обогатительных фабрик является хвостохранилище, которое выполняет роль очистного сооружения. Химический состав оборотной воды может повлиять на флотуемость минералов, например вызвать механизмы активации минералов пустой породы, когда это нежелательно, или ухудшить процесс пенообразования и нарушить селективность процесса флотации [6; 7].

Для снижения концентрации нежелательных ионов, например ионов солей жесткости, могут применяться технологии кондиционирования, что не всегда вполне обоснованно ввиду высоких капитальных и эксплуатационных затрат [5], а также потери растворенных в воде ионов ценных компонентов, например, если медные минералы в руде представлены водорастворимыми формами и склонны к ошламованию, вследствие чего разработка технологически

обоснованных требований к оборотным водам для конкретных предприятий должна учитывать закономерности влияния ионного состава жидкой фазы пульпы на технологические процессы переработки [8-10].

Таким образом, **целью данной работы** является анализ научно-технической литературы и систематизация данных о факторах, формирующих ионный состав жидкой фазы пульпы при флотации медьсодержащих руд, и оценка их влияния на технологические показатели обогащения.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования был проведен анализ русскоязычной и англоязычной научно-технической литературы по теме обогащения полезных ископаемых за последние 10 лет. В результате работы проанализированы более 100 научно-технических источников, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также опубликованных в ведущих специализированных изданиях в области горного дела. Для более глубокого анализа было отобрано 40 наиболее релевантных и авторитетных источников, которые послужили основой для формирования выводов и рекомендаций, представленных в данном исследовании.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные ионы в водной фазе пульпы

Поверхность минералов во флотационной пульпе и жидкая фаза находятся в динамическом состоянии за счет непрерывно протекающих химических реакций под воздействием добавляемых реагентов, турбулентности потока пульпы в камере флотомашин, воздуха, температуры и т.д. [11]. О фактическом ионном составе флотационной пульпы можно судить по прямым потенциометрическим измерениям пульпы или водной вытяжки [12], однако этот процесс в подавляющем большинстве обогатительных фабрик не является фактором оценки технологического процесса и не применяется из-за его сложности и дороговизны.

Проводимый в начале технологических исследований анализ водной вытяжки позволяет обнаружить ионы, свободно переходящие в водную фазу, но их концентрация в различных точках процесса флотации непостоянна. По результатам химического анализа водной вытяжки медьсодержащих руд зачастую отмечается высокое содер-

жание ионов кальция, магния, хлоридов натрия и калия, сульфоксидных анионов, а также катионов тяжелых металлов, в число которых входит медь [13; 14]. Высокое содержание активного кислорода в оборотной воде, а также повышенная концентрация ионов восстановителей (H^+) могут привести к значительному увеличению скорости окисления сульфидных минералов [15].

Ионы солей жесткости

Ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} обуславливают жесткость воды, что вызывает ухудшение работы пенообразователей, являющихся поверхностно-активными веществами, за счет образования нерастворимых солей жесткости ($CaCO_3$, $MgCO_3$), препятствующих снижению поверхностного натяжения воды на границе раздела фаз жидкость – газ, тем самым снижая качество пенного слоя. Более того, данные соли снижают скорость флотации, например, в работе [16] установлено, что с повышением жесткости воды в процессе флотации снижается извлечение быстрофлотируемых фракций меди. Наличие высокорастворимых карбонатов и сульфатов способствует ускорению перехода ионов с поверхности минералов в раствор [17], а также повышению уровня pH, что может оказать негативное влияние на дальнейшую селективность операций флотации [18].

Свободные ионы меди

Наличие ионов меди в оборотной воде обусловлено тем, что нижних стоках хвостохранилищ происходит интенсивное выщелачивание Cu^{2+} в фильтрат из твердой фазы вследствие изменения уровня pH, при котором термодинамически возможно растворение окисленных соединений меди. Интенсифицирующим фактором в данном случае является проникающий в объем кислород, находящийся в атмосферном воздухе, а также природные воды, включающие атмосферные осадки и подземные речные воды [19]. Дополнительное влияние на выделение свободных катионов меди оказывает постепенное снижение уровня pH пульпы до 5-7, что приводит к растворению солеобразных минералов. Наличие ионов меди в жидкой фазе пульпы негативно отражается на качестве медного концентрата, например если в руде присутствует пирит, активирующийся катионами меди [20], а кроме того, к повышенному расходу флотационных реагентов [13]. Согласно литературным данным [21], повышенная концентрация Cu^{2+} в растворе пропорциональ-

на образованию гидроксида меди, снижающего эффективность адсорбции собирателя на поверхности минерала.

Сульфоксидные анионы

Наличие в перерабатываемом сырье сульфатов меди, таких как халькантит ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), халькокианит ($CuSO_4$), бонатит ($CuSO_4 \cdot 3H_2O$), бутит ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$), является индикатором значительного содержания сульфоксидных анионов в жидкой фазе пульпы. Характерной особенностью лежалых руд является высокое содержание кристаллических сульфатов меди, образующихся в результате выветривания [22]. Сульфат-ион является конечной формой окисления всех серосодержащих анионов, однако при pH 4-6 наибольшую устойчивость имеют бисульфит-ионы, при pH 6-7 ионы SO_3^{2-} , при pH 8-10 сульфид и тиосульфат анион. Также сульфат, соединяясь с катионами кальция (источником которых может быть известь, добавляемая для повышения щелочности воды), может снизить извлечение халькопирита. В работе [23] значительное снижение флотации халькопирита наблюдалось только при повышенных содержаниях $CaSO_4$, а также подчеркивается необходимость обработки вод с высоким содержанием сульфатов (>1500 мг/л).

Хлорид-ионы

Большое количество исследований, посвященных флотации меди в морской и соленой воде (термины seawater и saline переводятся как морская и соленая вода соответственно, различие в том, что морская вода содержит на порядок больше хлорида натрия, чем соленая), выполнено учеными из Китая, Австралии, Чили [23]. Содержание хлоридов натрия и калия характерно для оборотных вод, но регламентированных требований на их предельно допустимую концентрацию пока нет ввиду того, что применение соленой воды в качестве оборотной на обогатительных фабриках на данный момент не актуально в России.

В работе [24] были проведены опыты флотации монофракций халькопирита при наличии в воде хлоридов кальция, магния, натрия и калия, при этом отмечено положительное влияние NaCl и KCl на извлечение полезного компонента в концентрат, а также ускорение кинетики флотации. Предполагается, что катионы натрия и калия образуют на поверхности халькопирита стабильный гидратационный слой за счет сжатия двойного электрического слоя.

Сводная таблица влияния ионов в жидкой фазе пульпы при флотации медьсодержащих руд

Ион	Источники	Влияние
Ca ²⁺ Mg ²⁺	Естественные: подземные воды с высокой минерализацией	Ухудшение пенообразования Снижение скорости флотации медных минералов Образование гидрофильных пленок на поверхности минералов Ускорение растворения поверхности минералов
Na ⁺ K ⁺ Cl ⁻	Искусственные: обратная вода	Ускорение кинетики флотации халькопирита Усиление пенообразования (при избытке – нарушение селективности) и стабильности пенного слоя
SO ₄ ²⁻	Окисление минеральной поверхности под действием антропогенных факторов	Образование малорастворимых солей с кальцием на поверхности медных минералов, снижающих адсорбцию ксантоганата
Cu ²⁺	Повышенное содержание водорастворимых минералов меди	Повышенная концентрация ухудшает адсорбцию собирателя и влечет перерасход реагентов

При этом в опытах флотации халькопирита с добавлением хлоридов кальция и магния отмечено, что CaCl₂ увеличивает значение дзета-потенциала и, следовательно, флотирруемость халькопирита. Несмотря на сходство свойств хлорида кальция и магния, в случае добавления MgCl₂ механизм снижения гидрофобности связан с адсорбцией осадков Mg(OH)₂ на поверхности минерала [25].

Помимо этого, присутствие NaCl может привести к значительному снижению значения дзета-потенциала (уменьшение поверхностного заряда мицелл), что улучшит пенообразование и стабильность пенного слоя за счет уменьшения размера пузырьков, а, следовательно, усилению межфазной пленки пузырька, что подтверждается в исследовании [26].

В присутствии электролитов происходит сжатие двойного электрического слоя на поверхности минерала, снижается энергетический барьер, что увеличивает вероятность столкновения минеральной частицы и пузырька, поскольку электростатическое воздействие уменьшается. Однако это может негативно повлиять на селективность флотации из-за высокой степени агрегации частиц [27; 28].

Таким образом, механизм положительного действия хлоридсодержащих солей в воде при флотации сводится к улучшению пенообразования, изменению заряда поверхности минералов и усилению строения межфазных пленок пузырьков [29; 30].

В таблице приведены результаты анализа научных исследований по оценке влияния неорганических ионов на процесс флотационного обогащения медьсодержащих руд.

Влияние ионов на поверхностное натяжение границы раздела фаз жидкость – газ

Сложность процесса флотации обусловлена одновременным взаимодействием жидкой, твердой и газообразной фаз. Поверхностная энергия на границе раздела фаз жидкость – газ и структура поверхностного слоя молекул изменяется в зависимости от химического состава воды [30]. Например, в работе [31] была предложена классификация ионов на структурообразующие и нарушающие структуру ионы. К первой группе относятся ионы натрия и фтора, так как обладают высокой плотностью поверхностного заряда и способны удерживать вокруг себя молекулы воды. К нарушающим структуру ионам относят слабогидратированные ионы (Cs⁺, I⁻).

Значение поверхностного натяжения на границе фаз жидкость – газ является ключевым параметром термодинамики элементарного акта флотации, пленочной флотации, закона капиллярности и т.д., ввиду чего изучение влияния растворенных солей во флотационной пульпе актуально [32; 33], в особенности исследование их синергетического эффекта с добавляемыми реагентами, например пенообразователями, так как их поверхностная активность и пенообразующая способность зависят от наличия и концентрации растворенных солей [34; 35].

Несмотря на то, что рассматриваемые в данной статье ионы относятся к поверхностно-инактивным веществам, существует ряд исследований, где показано, что соли способны снижать поверхностное натяжение в определенном диапазоне концентраций [36]. В работе [36] молярные концентрации хлорида натрия расположены

в диапазоне 0,01–0,08М и уточняется, что в области низких концентраций водно-солевых систем возможно наличие эффекта Джонса – Рэя, и предполагается, что его существование связано с методикой измерения поверхностного натяжения. В исследовании [37] авторы приводят примеры работ, в которых поверхностное натяжение солей натрия линейно падает с ростом температуры, что не находит подтверждения в теории адсорбции жидкостей. Также в данном исследовании экспериментально установлено, что растворы хлорида натрия проявляют поверхностно-инактивные свойства лишь при концентрациях выше 0,35 М.

При изучении влияния ионного состава воды на механизм действия поверхностно-активных веществ и технологические показатели флотационного обогащения в ряде работ отмечается, что присутствие неорганических ионов в воде улучшает характеристики флотационной пены, проявляется синергетический эффект с добавляемыми в процесс флотационными реагентами, что в итоге может снизить их расход и повысить рентабельность процесса [38–40].

Заключение

Был проведен анализ литературных источников в области исследований химического состава жидкой фазы флотационных пульп и влияния его компонентов на процесс флотации. В качестве основных ионов, присутствующих в воде при флотации медных руд, определены ионы солей жесткости (кальция и магния), ионы меди (II), хлорид-ионы и сульфоксидные ионы. При этом установлено, что образованию SO_4^{2-} и Cu^{2+} способствует окисление минеральной поверхности под действием антропогенных факторов, а также повышенное содержание водорастворимых минералов меди. Естественным источником солей жесткости и хлоридсодержащих солей являются подземные воды с высокой степенью минерализации, но влияние данных солей на процесс флотации неоднозначно. При повышенных концентрациях солей кальция и магния отмечается снижение пенообразования за счет увеличения жесткости воды и связывания данных солей с сульфат-ионами. Хлоридсодержащие соли способствуют сжатию двойного электрического слоя на поверхности минерала, что увеличивает вероятность столкновения минеральной частицы и пузырька, поскольку электростатическое воздействие уменьшается.

На основе анализа литературных источников установлено, что ионный состав жид-

кой фазы пульпы оказывает влияние на процесс флотации медных руд, однако на данный момент регламентированные требования к предельным концентрациям ионов в оборотной воде не разработаны. Чаще всего на практике оборотная вода лишь подвергается регулированию кислотами или щелочами для установления необходимого уровня pH, но ввиду вышеперечисленных факторов внедрение исследования ионного состава жидкой фазы на разных стадиях является важным этапом для оценки условий процесса флотации.

Актуальным направлением дальнейших научных исследований является более глубокий анализ флотационного обогащения с точки зрения физико-химических процессов, происходящих на границе раздела фаз жидкость – газ. Жидкая фаза пульпы содержит большое количество ионов и остатков реагентов в широком диапазоне концентраций, и их взаимодействие приводит к изменению механизма действия флотационных реагентов. Внедрение разработки реагентных режимов флотации на основании потенциометрических исследований необходимо в связи с нарастающими требованиями по рациональному использованию природных ресурсов.

Список литературы

1. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development // *Journal of Mining Institute*. 2020. № 244(4). P. 428–438. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5.
2. Cherepovitsyn A., Stroykov G., Nevolin A. Efficiency of Low-Carbon Technologies Implementation at Non-Ferrous Metallurgy Enterprises under the Conditions of Carbon-Regulation Development in Russia // *Sustainability (Switzerland)*. 2023. № 15(24). DOI: 10.3390/su152416640.
3. Boduen A.Y., Petrov G.V., Kobylansky A.A., Bulaev A.G. Sulfide leaching of high-grade arsenic copper concentrates // *Obo-gashchenie Rud*. 2022. № 1. P. 14–20. DOI: 10.17580/or.2022.01.03.
4. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды // *Геология и геофизика Юга России*. 2022. № 12 (4). С. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.
5. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // *Записки Горного института*. 2023. Т. 260. С. 155–167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
6. Залесов М.В., Григорьева В.А., Трубилов В.С., Бодуэн А.Я. Разработка технических решений для повышения эффективности переработки высокомедистой золотосодержащей руды // *Горная промышленность*. 2021. № 5. С. 51–56. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-51-56.
7. Митрофанова Г.В., Черноусенко Е.В., Артемьев А.В., Поспелова Ю.П., Смирнова Н.А., Бармин И.С. Исследование свойств и действия полиэлектролитов при очистке сливов обогатительной фабрики // *Записки Горного института*. 2024. Т. 265. С. 95–103.
8. Пономарева М.А., Черемисина О.В., Машукова Ю.А., Лукьянцева Е.С. Повышение эффективности извлечения РЗМ из технологических растворов в процессе переработки

- апатитового сырья // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 917-926. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.13.
9. Zubkova O., Alexeev A., Polyanskiy A., Karapetyan K., Kononchuk O., Reimmöller M. Complex processing of saponite waste from a diamond-mining enterprise // Applied Sciences. 2021. № 11(14). DOI: 10.3390/app11146615.
10. Dvoichenkova G.P., Morozov V.V., Chanturia E.L., Kovalenko E.G. Selection of recycled water electrochemical conditioning parameters for preparation of diamond-bearing kimberlite for froth separation // Mining Science and Technology (Russia). 2021. № 6(3). P. 170-180. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-170-180.
11. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В., Каюмов А.А., Каюмова В.Р. О регулировании электродных процессов для формирования контрастных технологических свойств сульфидов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10. С. 39-50. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_39.
12. Яковлева Т.А., Ромашев А.О., Машевский Г.Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 2. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_175.
13. Cao M., Bu H., Li S., Meng Q., Gao Y., Ou L. Impact of differing water hardness on the spodumene flotation // Minerals Engineering. 2021. Vol. 172. № 107159. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107159.
14. Saleh Tawfik A., Mujahid Mustaqeem, Mazen Khaled. Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2022. Vol. 17. № 100617. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100617.
15. Witecki K., Polowczyk I., Kowalczyk P.B. Chemistry of wastewater circuits in mineral processing industry – A review // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 45. № 102509. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102509.
16. Александрова Т.Н., Кузнецов В.В., Иванов Е.А. Исследование влияния ионов жесткости воды на флотиремость медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 263-278. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_1_0_263.
17. Feng Q., Yang W., Wen S., Wang H., Zhao W., Han G. Flotation of copper oxide minerals: A review // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. № 32(6). P. 1351-1364. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.011.
18. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В., Каюмов А.А., Каюмова В.Р. Влияние модификаторов класса сульфоксидов на флотиремость сульфидных минералов и технологические показатели флотации руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12. С. 20-33. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_20.
19. Mäkinen Jarno, Grzegorz Pietek, Ville Miettinen, Mohammad Khoshkhou, Jan-Eric Sundkvist, Päivi Kinnunen. Removal of Pyrrhotite from High-Sulphur Tailings Utilising Non-Oxidative H₂SO₄ Leaching // Minerals. 2022. Vol. 12(12). № 1610. DOI: 10.3390/min12121610.
20. Ключников А.М. Исследование процессов цементационного извлечения меди из подотвальных вод горнодобывающих предприятий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 1. С. 155-161. DOI: 10.15372/FTPRP120200117.
21. Han Wang, Shuming Wen, Guang Han, Yongxin He, Qicheng Feng. Adsorption behavior and mechanism of copper ions in the sulfidization flotation of malachite, International Journal of Mining Science and Technology // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Т. 32, № 4. С. 897-906. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.06.006.
22. Алексеев Е.Е., Якунчиков Е.А., Сиверин О.О., Бахмапов Д.Я., Кутергин А.В. Технология обогащения меди из руды удоканского месторождения с возможностью извлечения благородных металлов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2023. Т. 23, № 3. С. 5-15. DOI: 10.14529/met230301.
23. Li Y., Li W., Xiao Q., He N., Ren Z., Lartey C., Gerson A.R. The Influence of Common Monovalent and Divalent Chlorides on Chalcopyrite Flotation // Minerals. 2017. Vol. 7. № 111. DOI: 10.3390/min7070111.
24. Hirajima T., Suyantara G.P.W., Ichikawa O., Elmahdy A.M., Miki H., Sasaki K. Effect of Mg²⁺ and Ca²⁺ as divalent seawater cations on the floatability of molybdenite and chalcopyrite // Minerals Engineering. 2016. Т. 96. С. 83-93. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.023.
25. Majeed T., Kamal M.S., Zhou X., Solling T. A review on foam stabilizers for enhanced oil recovery // Energy & Fuels. 2021. № 35(7). P. 5594-5612. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00035.
26. Laskowski J., Castro S. Flotation in concentrated electrolyte solutions // International Journal of Mineral Processing. 2015. № 144. P. 50-55. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.023.
27. Xing Y., Gui X., Pan L., Pinchasik B.E., Cao Y., Liu J., Butt H.J. Recent experimental advances for understanding bubble-particle attachment in flotation // Advances in colloid and interface science. 2017. № 246. P. 105-132. DOI: 10.1016/j.cis.2017.05.019.
28. Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Чупрова Л.В., Ершова О.В. Влияние химической природы модифицирующих добавок неорганического происхождения на электрокинетический потенциал угольных дисперсий // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 51-55. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35721> (дата обращения: 14.01.2025).
29. Sun K., Nguyen C.V., Nguyen N.N., Ma X., Nguyen A.V. Crucial roles of ion-specific effects in the flotation of water-soluble KCl and NaCl crystals with fatty acid salts // Journal of Colloid and Interface Science. 2023. № 636. P. 413-424. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.01.038.
30. Sun K., Nguyen N.N., Nguyen A.V. Unique selective activating effect of lead ions on the flotation of NaCl crystals against KCl crystals with fatty acid collector colloids // Minerals Engineering. 2024. Vol. 216. № 108908. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108908.
31. Michaux B., Rudolph M., Reuter M.A. Challenges in predicting the role of water chemistry in flotation through simulation with an emphasis on the influence of electrolytes // Minerals Engineering. 2018. № 125. P. 252-264. DOI: 10.1016/J.MINENG.2018.06.010.
32. Alvarado O., Quezada G.R., Saavedra J.H., Rozas R.E., Toledo P.G. Species Surface Distribution and Surface Tension of Aqueous Solutions of MIBC and NaCl Using Molecular Dynamics Simulations // Polymers. 2022. Vol. 14. № 1967. DOI: 10.3390/polym14101967.
33. Vallejos P., Yianatos J., Grau R., Yañez A. Evaluation of flotation circuits design using a novel approach // Minerals Engineering. 2020. Vol. 158. № 106591. DOI: 10.1016/J.MINENG.2020.106591.
34. Corin K.C., Tetlow S., Manono M.S. Considering the action of frothers under degrading water quality // Minerals Engineering. 2022. Vol. 181. № 107546. DOI: 10.1016/J.MINENG.2022.107546.
35. Manono M.S., Corin K.C. Considering Specific Ion Effects on Froth Stability in Sulfidic Cu-Ni-PGM Ore Flotation // Minerals. 2022. Vol. 12. № 3. DOI: 10.3390/min12030321.
36. Александрова Т.Н., Лушина Е.А. Влияние ионного состава жидкой фазы пульпы на технологические показатели обогащения // Цветные металлы. 2024. № 8. С. 13-20. DOI: 10.17580/tsm.2024.08.02.
37. Заводовский А.Г. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора хлорида натрия от концентрации и температуры // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 75-80. DOI: 10.35266/1999-7604-2024-1-10.
38. Jia M., Farid M.U., Kharraz J.A., Kumar N.M., Chopra S.S., Jang A., An A.K. Nanobubbles in water and wastewater treatment systems: small bubbles making a big difference // Water Research. 2023. № 120613. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120613.
39. Wang H., Yang W., Yan X., Wang L., Wang Y., Zhang H. Regulation of bubble size in flotation: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8(5). № 104070. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104070.
40. Yang X., Li Y., Fan R., Duan W., Huang L., Xiao Q. Separation mechanism of chalcopyrite and pyrite due to H₂O₂ treatment in low-alkaline seawater flotation system // Minerals Engineering. 2022. Vol. 176. № 107356. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107356.