

Б.В. Комогорцев, А.А. Вареничев

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ СУЛЬФИДНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

**Аннотация.** По мере истощения богатых месторождений и возникновения необходимости вовлечения в переработку бедных тонковкрапленных (упорных) руд, раскрытие которых требует очень тонкого измельчения, проблема флотационного извлечения тонкого золота и сульфидов цветных металлов приобретает особое значение. В этих рудах золото тесно ассоциирует с сульфидными минералами и возникает вопрос их селективного извлечения. Решение данных вопросов может быть успешно решено на основе использования эффективных реагентных режимов, флокулянтов, сорбентов, собирателей и необходимого оборудования. На основе анализа современных научных разработок и технологий флотационного обогащения в России и за рубежом дана общая оценка эффективности их использования при обогащении тонкодисперсных золотосодержащих сульфидных руд цветных металлов. Среди них можно выделить разработку и применение эффективных реагентных режимов на основе композиционных реагентов и их сочетаний; для тонкодисперсных и эмульсионно-вкрапленных сульфидных руд разработаны и протестированы эффективные микропузырьковые генераторы. Из новых методов и оборудования можно отметить турбулентную микрофлотацию, аппарат с высокочастотным ротационным пульсирующим аэратором, пузырьковый генератор двойного действия, специальный флотационный реактор SFR. Приведены примеры использования селективных реагентных режимов и микропузырьковых генераторов в технологиях флотационного обогащения руд цветных металлов.

**Ключевые слова:** флотация, тонкодисперсные сульфидные руды, тонкое золото, сульфидные минералы цветных металлов, селективная флокуляция, селективные композиционные реагентные режимы, микропузырьковые генераторы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-180-190

Золотосодержащие руды цветных металлов характеризуются большим разнообразием, как по вещественному составу, так и крупности. По мере истощения богатых месторождений и возникновения необходимости вовлечения в переработку бедных тонковкрапленных (упорных) руд, раскрытие которых требует очень тонкого измельчения, и проблема флотационного извлечения тонкого золота и сульфидов цветных металлов приобретает особое значение. В этих рудах золото тесно ассоциирует с сульфид-

ными минералами и возникает вопрос их селективного извлечения. Решение данных вопросов может быть успешно решено на основе разработки и использования эффективных реагентных режимов и необходимого оборудования. Весьма перспективен подход флотационного извлечения тонкодисперсного золотосодержащего продукта с использованием селективных полимерных флокулирующих добавок.

В ИПКОН РАН проведена работа по созданию методов концентрирования пла-

тиноидов из тонкоизмельченного продукта медно-никелевой платиносодержащей руды на основе использования термоморфных полимеров, синтезированных на основе изопролакриламида и акрилоксисуцинимида с присоединенными группами тиоамина (ТМПА) и тиосемикарбазида (ТМПБ). Отличительным свойством данных полимеров является изменение их структуры с ростом температуры: при нагревании более 33–35 °С они переходят из водорастворимого в твердое состояние с образованием устойчивого гидрофобного комплексного соединения с платиной и золотом. Растворимость термоморфных полимеров в холодной воде обеспечивает однородность обработки рудных материалов, а изменение агрегатного состояния при нагреве повышает эффективность собирательного и флокулирующего действия реагента. Селективность действия данных полимеров для извлечения благородных металлов реализуется за счет присоединения функциональных групп на золото и платину.

Технологическими испытаниями ТМПА при флотации руд Талнахского месторождения и золотосодержащей руды Тарньенского месторождения показано, что полимеры обеспечивают повышение извлечения золота — на 2–4% без снижения качества концентрата по сравнению с фабричным реагентным режимом. Кроме того, указанные полимеры способствуют селективной флокуляции тонкодисперсных золотосодержащих сульфидов, обеспечивая снижение потерь золота с тонкими классами крупности на 16%. Проявление селективных свойств к золотосодержащему пириту и тонкому золоту позволили снизить потери шламовой фракции золота с хвостами обогащения [1].

В последнее время, как в отечественной, так и в зарубежной практике, в связи с вовлечением в разработку трудно-

обогатимого сырья, где ценный компонент находится в тонких и ультратонких классах, в реагентных режимах применяют флокулянты различного состава для флотации сульфидного сырья. Руды месторождений коры выветривания относятся к труднообогатимым из-за повышенного содержания глинистых минералов, основная часть золота сосредоточена в тонких классах, как в свободном виде, так и в сростках. Исследования проводились на руде с содержанием золота 2,8 г/т и серебра 2,0 г/т. Большая часть золота в руде присутствует, в основном, в крупности менее 0,044 мм как в свободном, так и в связанном состоянии преимущественно с породообразующими минералами. В качестве базового реагентного режима для флотации применяли бутиловый ксантогенат и сосновое масло. Для флокуляции тонких минеральных фракций использовали флокулянты серии Superfloc и Magnofloc. Расход реагентов варьировался от 5 до 15 г/т и их подавали перед, после и совместно с собирателем. В результате проведенных исследований установлено, что применение указанных флокулянтов при определенных расходах и порядке подачи при флотации руды коры выветривания позволяет повысить технологические показатели. Так при введении Magnofloc до собирателя, содержание золота и извлечение возросли на 8% по сравнению с базовым режимом [2].

В работе [3] рассмотрена и исследована возможность обогащения тонкодисперсных золотосодержащих руд и продуктов обогащения с применением модифицированных сорбентов. Изучали сорбционную способность частиц угля, модифицированных раствором комплексобразующего реагента по отношению к тонкому золоту, содержащемуся в модельных пиритсодержащих продуктах. Основной объект исследований сорбции частиц золота — золотосодержащие пи-

ритные хвосты обогащения сульфидных руд. С использованием активированного угля БАУ-А, крупностью 95% (-3,6+1) мм получен сорбент, модифицированный раствором комплексообразующего реагента: биспергидро-1,3,5-дитиазин-5-илэтана (ЭТХ), который ранее проявил свойства селективного собирателя при флотации золотосодержащих руд. Обнаружено преимущественное закрепление золотосодержащих частиц на участках поверхности покрытых, комплексообразующим реагентом, что может свидетельствовать о химической форме сорбции, которая предпочтительна при проведении флотационного процесса обогащения золотосодержащего материала.

Экспериментально установлено, что наиболее важными факторами, влияющими на эффективность извлечения золота, является соотношение величины частиц сорбента и золотосодержащих частиц, количество сорбента, а также введение в пульпу ионов хлора. Извлечение нагруженных золотом и золотосодержащими минералами активированного угля целесообразно осуществлять флотационным методом с использованием углеводов. Синтезирован и апробирован селективный реагент — композиционный аэрофлот для флотационного извлечения сульфидных минералов с тонкой вкрапленностью золота и труднообогатимых руд [4].

Проведено исследование возможности флотационной переработки золотосодержащей руды с применением композиционного реагента на примере руды месторождения Бестюбе (Казахстан). Из руды, содержавшей 4,3 г/т золота, в свободном виде находится 44,3% Au. В сростках с сульфидами и породой — 23,26%, значительная часть золота ассоциирована с сульфидами — 27,91%. При оптимальном тонком измельчении руды до 98% класса -0,071 мм, расходе собирателя 150 г/т, пенообразова-

теля Т-92-100 получен золотосодержащий концентрат с содержанием золота 38,4 г/т при извлечении 88,9%. Применение композиционного флотореагента позволяет повысить извлечение золота в золотосодержащий концентрат при обогащении руды месторождения Бестюбе при снижении расхода композиционного собирателя на 25%, с 100 до 75 г/т. При этом получен золотосодержащий концентрат с содержанием золота 45,6 г/т при извлечении 92,2%; повышение извлечения золота составило 3,3%.

Проведены исследования по изучению возможности переработки хвостов флотационного обогащения Жезказганской обогатительной фабрики с применением композиционного флотореагента [5]. В качестве исходных реагентов были взяты: бутиловый ксантогенат, тионокарбамат марки ТС-1000 и композиционный аэрофлот, синтезированный из очищенного сивушного масла, сульфида фосфора (V) и гидроксида натрия. Соотношение реагентов составило — композиционный аэрофлот: тионокарбамат ТС-1000: бутиловый ксантогенат — 1:1:3.

Результаты испытаний показали, что применение композиционного собирателя в цикле флотации хвостов обогащения Жезказганской медной обогатительной фабрики позволяет существенно улучшить технологические показатели обогащения по сравнению с другими реагентами. По базовой технологии с применением только бутилового ксантогената (250 г/т) получен черновой медный концентрат с содержанием меди 7,9% при извлечении 48,82%. Применение тионокарбамата (60 г/т) и его сочетания с бутиловым ксантогенатом позволяет повысить содержание меди в черновом медном концентрате до 12,1% и извлечение меди до 76,65%. Наилучшие показатели по содержанию и извлечению меди достигнуты при применении композиционного флотореагента, расход ко-

того ниже базовых реагентов (25 г/т). При его применении получен черновой медный концентрат с содержанием 13,0% при извлечении 80,22%. По сравнению с базовой технологией содержание меди в черновом концентрате повышается на 5,1%, извлечение — на 31,4%.

Для оптимизации флотационного обогащения полиметаллической сульфидной руды на фабрике Jiama (Тибет) использовали новый собиратель С-7, который является смесью эфира ксантогената и тионоккарбамата. Руда содержит 0,78% Cu; 0,046% Mo; 0,31 г/т Au и 17,9 г/т Ag. При расходе нового собирателя С-7 15 г/т при pH 8,0 было достигнуто повышение извлечения всех металлов, в %: Cu 93,24; Mo 84,60; Au 78,13; Ag 75,41. Установлено, что хемосорбция реагента С-7 на поверхности халькопирита в 3,8 раза выше, чем на пирите [6].

С помощью современных физико-химических методов анализа изучены минералогические характеристики низкокачественной упорной золотосодержащей руды, и разработана схема извлечения микротонкого золота на обогатительной фабрике в провинции Yunnan (Китай).

Экспериментально изучено влияние тонкости измельчения и использование различных флотационных реагентных режимов, включая собирателей, депрессоров и активаторов на флотационное поведение микротонкого золотосодержащего пирита. С помощью двух стадийной флотации получен золотосодержащий коллективный концентрат высокого качества (32,71 г/т) при извлечении золота (80,02%). Разработанная технология дает возможность максимизировать извлечение Au из микротонкой низкокачественной упорной золотосодержащей руды, для которой низкие извлечения обычное явление [7].

Практика флотации упорных сульфидных медно-цинковых руд Урала (содер-

жание сульфидного железа — 75–95%) подтверждает, что использование комбинации селективных собирателей увеличивает селективное извлечение медных сульфидных минералов до 50% в первую фракцию, которая является кондиционным концентратом. Новые селективные сульфидрильные собиратели позволили достичь высоких уровней извлечения меди в концентрат — более чем 90% — против 70–72% (бутиловый ксантогенат) из медно-пиритной руды. Используя слабые селективные сульфидрильные собиратели можно снизить pH в коллективной или селективной флотации с 10–10,5 до pH 7,2–7,5, что повышает качество индивидуальных концентратов цветных металлов и их извлечение [8].

Предложен собиратель IMA-225-5 как более эффективный из класса диалкилдитиофосфатов, который увеличивает извлечение меди на 2,8% по сравнению с используемым в промышленности собирателем IMA-1413. Новый собиратель в своей структуре содержит тиоамидные группы (производные тионоккарбамата и тиомочевины). Опыты с реагентами с тиоамидной группой показали на увеличение извлечения меди на 3–4% при значительном увеличении извлечения мышьяка по сравнению с реагентом IMA-1413. Как более сильный собиратель с тиоамидными группой был рекомендован для промышленных испытаний на Приморской обогатительной фабрике, которая обогащает скарные шеелит-сульфидные руды. Для увеличения селективности собирателей класса IMA-225-5 рекомендуется их применять в комбинации диалкилдитиофосфатами [9].

Изучали гидрофобизирующую способность бутилового ксантогената в сочетании с интенсифицирующей добавкой моноэтаноламинксантогенатом (МАК). Опыты проводились в лабораторной фло-

томашине механического типа на чистых минеральных фракциях пирита и халькопирита золотомедной руды месторождения Кумбель. Установлено, что при флотации халькопирита и пирита добавка небольшого количества МАК в пульпу совместно с бутиловым ксантогенатом приводит к увеличению извлечения минералов на 3–4% [10].

С целью упрощения ранее разработанной схемы флотации и повышения общего извлечения золота проводились исследования на малосульфидной золотосодержащей руде месторождения Восточной Сибири. Исследуемая руда характеризуется наличием тонковкрапленного тесно ассоциированного сульфидами и углистым веществом золота, мышьяковистых минералов и до 30% глинисто-слюдистых минералов и карбонатов. Для достижения максимального извлечения золота предложено использовать частично окисленный бутиловый ксантогенат калия, жидкое стекло для подавления глинисто-гидрослюдистых шламов и серную кислоту для активации сульфидов. В результате сравнения показателей обогащения, полученных по двум технологиям, установлено, что прирост извлечения золота с применением слабодокислой среды и окисленного бутилового ксантогената составляет 3,6%. На основе выполненных полупромышленных исследований проведена корректировка технологического регламента для проектирования предприятия [11].

Заслуживает внимания подход к использованию селективных пенообразователей для предварительного обогащения сульфидных руд, содержащих углеродсодержащее вещество. Исследования проводились на медной руде месторождения Kupferschiefer (Польша). Удаление легко флотируемых компонентов перед основным циклом флотации повышает эффективность извлечения полезных элементов из руды. Проводились серии

опытов по предварительной флотации в присутствии различных поли(пропиленгликолей), поли(этиленгликолей) эфиров и алифатических спиртов. Полученные результаты показали, что типы и дозы пенообразователей определяют селективность флотации меди. Установлено в лабораторных условиях, что предварительная флотация улучшает качество и количество конечных медных концентратов из руды месторождения Kupferschiefer [12].

Изучали предварительную концентрацию полезных минералов из латеритовых руд, используя селективную агрегацию. Никель в латеритовых рудах находится в тонкодисперсном состоянии, и поэтому для его освобождения руду тонко измельчают, и возникают проблемы флотационного извлечения никеля. Для решения проблемы извлечения никеля предложен процесс селективной флокуляции тонких частиц полезных минералов, таким образом, повысив эффективность флотации низкокачественных латеритовых руд [13].

При необходимости вовлечения в переработку бедных, тонковкрапленных руд, раскрытие которых требует очень тонкого измельчения, проблема флотации мелких шламовых частиц может быть решена применением в процессе флотации микропузырьков воздуха, размер которых не превышает 50 мкм, улучшающих флотируемость шламовых частиц, что возможно путем использования разработанного генератора водовоздушной микроэмульсии (ГВВМЭ). На его основе был разработан принципиальный метод флотации ультрадисперсных минералов, получивший название «турбулентная микрофлотация» (ТМФ-обработка). Принципиальное отличие «турбулентной микрофлотации» от обычной флотации состоит в том, что пузырьки воздуха, используемые в процессе, формируются вне обрабатываемой пульпы в виде концентри-

рованной водо-воздушной микроэмульсии, которая затем смешивается с пульпой и пропускается по трубчатому статическому миксеру (флотореактору) в виде турбулентного потока. В результате такой обработки во флотореакторе осуществляется не только минерализация микропузырьков, но и их укрупнение за счет коалесценции и агрегирования в крупные флотокомплексы, содержащие тысячи исходных микропузырьков, что обеспечивает их быстрое отделение от пульпы седиментацией.

Для проведения исследований была использована технологическая проба руды Ридлер-Сокольского месторождения, в которой по результатам химического анализа, содержание меди составило 0,15%, свинца — 0,25%, цинка 0,32%, железа — 1,7%. Большая часть полезных компонентов сосредоточена во фракции 0—40 мкм. В качестве собирателя использовали смесь бутилового ксантогената и аэрофлота в соотношении 3:2, а руду измельчали до крупности 99,7% класса — 0,040 мм.

Показано, что совместное применение вспенивателя СВИМ и генератора водо-воздушной микроэмульсии позволяет повысить содержание меди в коллективном концентрате, по сравнению с базовым режимом, с 3,4 до 5,1%, свинца — с 3,8 до 5,3%, цинка — 7,7 до 8,3%, золота — с 24,2 до 25,1 г/т, серебра — с 145,6 до 154,2 г/т. Извлечение меди при этом повышается на 2,2%, свинца — на 6,0%, цинка — 2,1%, золота — на 2,7%, серебра — на 2,2%. Применение генератора водовоздушной микроэмульсии позволяет не только повысить качество и извлечение полезных компонентов в коллективный концентрат, но и одновременно уменьшить время флотации по всем операциям на 25—30% [14].

Изучали особенности флотационного поведения тонко и эмульсионновкрапленных руд в аппарате с высокочастот-

ным ротационным пульсирующим аэратором (ВРПА), принципиальным отличием которого является аэрация в поле упругих колебаний звукового и ультразвукового диапазона частот. Флотация в аппарате с ВРПА позволила существенно улучшить селекцию тонких частиц менее 44 мкм.

На рудных пробах двух золотосодержащих месторождений, существенно отличающихся минеральным составом и обогатимостью, проведены сравнительные испытания флотоаппаратов с традиционным лопастным аэратором и с ВРПА.

Результаты испытаний руд на флотомашине с ВРПА получены выше:

- на руде месторождения Юбилейное содержание золота в концентрате 181,44 г/т, извлечение 94,96% против 66,2 г/т руды и 90,4% содержания и извлечения на стандартной флотомашине соответственно, содержание повышено в 2,74 раза, извлечение на 4,56%;
- на руде месторождения Бакырчик содержание золота в концентрате составило 90,51 г/т, извлечение 83,57% против 43,46 г/т руды и 81,49% содержания и извлечения на стандартной флотомашине соответственно, содержание повышено в 2 раза, извлечение на 2,08%.

Таким образом, преимущества технологии флотации с ВРПА тонкодисперсных золотосодержащих руд очевидны по сравнению со стандартной флотационной технологией [15].

Для повышения эффективности обогащения золотосодержащих руд с двойной упорностью (тонкодисперсное золото + углистое вещество), месторождения Невада разработан пузырьковый генератор двойного действия.

Конструкция генератора двойного действия производит два вида пузырьков (микронного размера и типичной флотационной крупности). Микронного размера пузырьки получают на поверх-

ности частиц в кавитационных трубах, усиливающих прилипание тонких частиц к пузырькам в стандартных флотационных машинах. Они также действуют как вторичный собиратель, который потенциально может снижать эксплуатационные расходы и улучшить флотационное извлечение. Пузырьковый генератор двойного действия был испытан на золотосодержащей руде с содержащей 3 г/т Au, 1,5% общего карбонатного вещества и 0,7% сульфидов. По сравнению с коммерческим пузырьковым генератором использование пузырькового генератора двойного действия повышает извлечение золота, демонстрируя потенциальные возможности пузырькового генератора двойного действия при флотации тонкодисперсных руд [16].

В совместной работе исследователей из Швеции и Франции проблему флотации тонких частиц решали через изменение расхода энергии, подаваемой во флотокамеру. Опыты проводились на тонкоизмельченной медно-никелевой руде. Наблюдали увеличение флотационного извлечения тонких минеральных частиц при повышении скорости импеллера с 450 до 1200 оборотов/мин. Экспериментальные результаты показали увеличение извлечения воды и улучшения кинетики флотации шламов с увеличением подачи энергии во флотокамеру [17].

Моделированием двух субпроцессов захвата пузырьком и отрыва частиц, входящих в 36 фракций руды, различающихся размером и массовой долей меди, показано, что при раздельной флотации можно получить дополнительный эффект селективности. На медной руде по сравнению с обычной флотацией достигается повышение качества концентрата в 2–3 раза при одинаковом извлечении.

В шламовой флотации при увеличении энергии диссипации от 1 до 8,0 Вт/кг возможно самое большое качество концентрата для всех значений извлечения.

В песковой флотации качество концентрата снижается как при уменьшении, так и при увеличении энергии диссипации от оптимального значения, равного 2,0 Вт/кг [18].

На медно-золотой обогатительной фабрике Afton в Британской Колумбии (Канада) внедрен стадийный флотационный реактор (SFR), который отличается высокой производительностью: высокое качество медного концентрата и превосходное извлечение, при этом реактор имеет меньшие размеры по сравнению со стандартной флотокамерой и занимает значительно меньшую производственную площадь. Три реактора были установлены в 2015 г. и запущены в эксплуатацию. Номинальная мощность каждого реактора по исходному питанию 700 м<sup>3</sup>/час. По данным 10-месячной эксплуатации трех реакторов, установленных последовательно, получен концентрат с содержанием меди 32%, оставшаяся часть меди извлекалась в стандартных условиях фабрики с получением концентрата с содержанием 28% Cu [19].

Рудник Red Dog, один из крупнейших в мире по производству цинка, также поставляет свинец и серебро, при этом он находится в отдаленном районе, на Аляске, что обуславливает дополнительные эксплуатационные расходы. Для повышения показателей обогащения на фабрике были установлены две бисерные мельницы M5000 IsaMills для цинкового цикла доизмельчения и одна камера Jameson для повышения эффективности цикла предварительной флотации. Для достижения эффективной сепарации сульфидных минералов на фабрике требуется их тонкое измельчение, что позволяет получать на фабрике качественные концентраты, но создает проблемы с извлечением металлов: свыше половины свинца теряется в хвостах свинцового цикла флотации и почти половина

цинка остается в конечных хвостах обогащения в наиболее тонких фракциях (–10 мкм). Чтобы улучшить извлечение металлов на Red Dog в фабричных условиях протестировали и установили аппараты магнитного кондиционирования в обоих циклах флотации. За счет агрегации тонких парамагнитных сульфидов селективность их флотации возросла и, таким образом, получены положительные результаты [20].

### Заключение

По мере истощения богатых месторождений и возникновения необходимости вовлечения в переработку бедных тонковкрапленных (упорных) руд, раскрытие которых требует очень тонкого измельчения, проблема флотационного извлечения тонкого золота и сульфидов цветных металлов приобретает особое

значение. В этих рудах золото тесно ассоциирует с сульфидными минералами и возникает вопрос их селективного извлечения.

Решение данных вопросов, как показано выше, может быть успешно решено на основе использования эффективных реагентных режимов, флокулянтов, сорбентов, собирателей и необходимого оборудования. Для повышения эффективности извлечения тонкодисперсного золота применяются флокулянты серии Super floc и Magnofloc, собиратели С 7 и IMA-225-5, селективные пенообразователи. Из новых методов и оборудования можно отметить турбулентную микрофлотацию, аппарат с высокочастотным ротационным пульсирующим аэратором, пузырьковый генератор двойного действия, специальный флотационный реактор SFR.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеева Т. Н., Чантурия В. А., Гапчич А. О. Исследование термоморфных и флокулирующих свойств полимера ТМПФ при флотации золотосодержащих сульфидов / *Материалы Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья»* (Плаксинские чтения—2016), Санкт-Петербург, 26–30 сент., 2016. — М., 2016. — С. 88–91.
2. Усманова Н. Ф., Брагин В. И., Плотникова А. А., Меркулова Е. Н. Применение флокулянтов при флотационном обогащении золотосодержащего сырья коры выветривания / *Материалы Международной конференции «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья»* (Плаксинские чтения—2015), Иркутск, 21–25 сент., 2015. — Иркутск, 2015. — С. 253–255.
3. Чантурия В. А., Зимбовский И. Г., Иванова Т. А. Получение модифицированных сорбентов и модельных материалов для исследования способа доизвлечения тонкодисперсного золота из хвостов флотации / *Материалы Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья»* (Плаксинские чтения—2016), Санкт-Петербург, 26–30 сент., 2016. — М., 2016. — С. 103–105.
4. Тусупбаев Н. К., Семушкина Л. В., Турысбеков Д. К., Нарбекова С. М. Переработка золотосодержащего сырья с использованием композиционного реагента / *Материалы Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья»* (Плаксинские чтения—2016), Санкт-Петербург, 26–30 сент., 2016. — М., 2016. — С. 141–142.
5. Тусупбаев Н. К., Семушкина Л. В., Турысбеков Д. К., Сатылганова С. Б. Влияние композиционного флотореагента на флотацию медьсодержащего техногенного сырья / *Материалы 21 Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья»*, Екатеринбург, 6–7 апр., 2016. — Екатеринбург, 2016. — С. 217–220.
6. Yong Chen, Yongsheng Song. Минералогическая характеристика и обогащение микронной низкокачественно упорной золотосодержащей руды / *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.



7. *Yong Chen, Yongsheng Song, Wenjuan Li.* Минералогическая характеристика и обогащение микро-тонкой и низкокачественной золотосодержащей руды / 28 International Mineral Processing Congress (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

8. *Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Милович Ф. О.* Селективные композиции сульфидрильных собирателей и кинетика флотации сульфидных минералов из упорных пирит-пиротинновых руд цветных металлов / 28 International Mineral Processing Congress (IMPC), Quebec Canada, Sept. 11–15, 2016.

9. *Рябой В. И., Шелета Е. Д., Кретов В. П., Рябой И. В.* Сравнительное изучение активности диалкилдитиофосфатов и реагентов с тиоамидной группой при сепарации меди и мышьяка / 28 International Mineral Processing Congress (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

10. *Молмакова М. С.* Изучение флотуемости сульфидных минералов золотомедной руды месторождения Кумбель / Наука и образование: проблемы и стратегии развития: Материалы Международной научно-практической конференции, Уфа, 15–16 нояб., 2015. — Уфа, 2015. — С. 145–148.

11. *Богудлова А. И., Бескровная В. П., Войлошников Г. И.* Совершенствование флотационной технологии обогащения малосульфидной золотосодержащей руды // Вестник ИргТУ. — 2015. — № 3. — С. 188–194.

12. *Duchnowska Magdalena, Bakalarz Alicja, Luszczkiewicz Andrzej, Drzymala Jan* Влияние селективных пенообразователей на предварительную флотацию руды месторождения Kupferschiefer / 28 International Mineral Processing Congress (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

13. *Farrokhpay Saeed, Filippov Lev* Предварительная концентрация полезных минералов в никелевых латеритовых рудах с помощью селективной агрегации / 28 International Mineral Processing Congress (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

14. *Тусупбаев Н. К., Рулев Н. Н., Турысбеков Д. К., Семушкина Л. В., Калдыбаева Ж. А.* Флотация тонковкрапленных полиметаллических руд с применением нового оборудования / Материалы Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения — 2016), Санкт-Петербург, 26–30 сент., 2016. — М., 2016. — С. 139–141.

15. *Жарменов А. А., Сарсенбай А. А., Хайрулина С. Т., Денисова Н. В., Абдиманатов Н. Б.* Испытания пульсационной технологии с выделением газов из их водного раствора при флотации тонковкрапленных золотосодержащих руд в полупромышленном аппарате / Материалы Международной конференции «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Плаксинские чтения—2015), Иркутск, 21–25 сент., 2015. — Иркутск, 2015. — С. 182–185.

16. *Huang Jian, Li Haipeng, Liu Qingxia, Xu Zhenghe* Повышение извлечения золота из золотосодержащих руд с двойной упорностью месторождения Nevada с использованием нового пузырькового генератора двойного действия / 28 International Congress Proceedings (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

17. *Manouchehri H. R., Farrokhpay* Флотация тонких частиц — не является ли это вопросом расхода энергии и размера пузырьков во флотокамере / 28 International Congress Proceedings (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

18. *Самыгин В. Д., Григорьев П. В.* Моделирование влияния гидродинамических факторов на селективность процесса флотации. Ч. 2. Влияние разделения исходного питания на крупные и мелкие фракции частиц // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 2. — С. 161–166.

19. *Swedburg K., Bennett C., Samuels M., Wells P. F.* Применение стадийного флотационного реактора в технологии новой обогатительной фабрики Afton, Канада / 28 International Congress Proceedings (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

20. *Lacouture B., Wilson B., Oliver J., Lumsden B.* Повышение извлечения тонких сульфидных минералов в условиях эксплуатации фабрики Red Dog / 28 International Congress Proceedings (IMPC), Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016. **ПЛАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Комогорцев Борис Владимирович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

Вареничев Анатолий Алексеевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, зав. Отделением наук о Земле, e-mail: avar@viniti.ru,

<sup>1</sup> Всероссийский институт научной и технической информации РАН Федерального агентства научных организаций.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 10, pp. 180–190.

## Improvement of flotation technologies for finely dispersed gold-bearing sulfide ore

Komogortsev B.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Varenichev A.A.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department, e-mail: avar@viniti.ru,

<sup>1</sup> All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of Russian Academy of Sciences (VINITI), Federal Agency Scientific Organizations, 125190, Moscow, Russia.

**Abstract.** As high-grade mineral reserves are being depleted, processing increasingly involves low-grade finely dispersed (rebellious) ore. In this case, mineral dissociation requires fine milling, and the problem of recovery of fine gold and sulfides of nonferrous metals by flotation becomes of particular concern. Gold is tightly associated with sulfide minerals in such kinds of ore, and it is required to extract them selectively. The problem can be successfully solved using efficient reagent modes, flocculants, sorbents, collecting agents and equipment. Based on the analysis of modern scientific achievements and flotation technologies in Russia and abroad, general estimate of their efficiency in processing of finely dispersed gold-bearing sulfide ore of nonferrous metals is given. In this connection, it is pointed at development and application of efficient reagent modes based on compound agents and their combinations. For finely dispersed emulsion-impregnated sulfide ore, efficient microbubble generators are designed and tested. Among new methods and equipment, the article highlights turbulent microflotation, apparatus with high-frequency rotary pulsed oxygenator, double-action bubble generator, and special flotation reactor AFR. The application of the selective reagent modes and microbubble generators in flotation of nonferrous metal ore is illustrated.

**Key words:** flotation, finely dispersed sulfide ore, fine gold, sulfide minerals of nonferrous metals, selective flocculation, selective compound reagent modes, microbubble generators.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-180-190

## REFERENCES

1. Matveeva T.N., Chanturiya V.A., Gapchich A.O. Issledovanie termomorfnykh i flokkuliruyushchikh svoystv polimera TMPF pri flotatsii zolotosoderzhashchikh sulfidov [Research termomorfnyh and flocculating properties of the polymer TMPF flotation gold sulphides]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Resursosberezhenie i okhrana okruzhayushchey sredy pri obogashchenii i pererabotke mineral'nogo syr'ya» (Plakinskie chteniya—2016)*, Saint-Petersburg, 26–30 Sept., 2016], Moscow, 2016, pp. 88–91. [In Russ].
2. Usmanova N. F., Bragin V. I., Plotnikova A. A., Merkulova E. N. Primenenie flokulyantov pri flotatsionnom obogashchenii zolotosoderzhashchego syr'ya kory vyvetrivaniya [The use of flocculants in the flotation enrichment of gold ores of weathering crust]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki trudnoobogatimogo mineral'nogo syr'ya» (Plakinskie chteniya—2015)*, Irkutsk, 21–25 Sept., 2015. Irkutsk, 2015, pp. 253–255. [In Russ].
3. Chanturiya V.A., Zimbovskiy I.G., Ivanova T.A. Poluchenie modifitsirovannykh sorbentov i model'nykh materialov dlya issledovaniya sposoba doizvlecheniya tonkodispersnogo zolota iz khvostov flotatsii [Preparation of modified sorbents and model materials for studying the method of additional recovery of fine gold from the flotation tailings]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Resursosberezhenie i okhrana okruzhayushchey sredy pri obogashchenii i pererabotke mineral'nogo syr'ya» (Plakinskie chteniya—2016)*, Saint-Petersburg, 26–30 Sept., 2016], Moscow, 2016, pp. 103–105. [In Russ].
4. Tusupbaev N.K., Semushkina L.V., Turysbekov D.K., Narbekova S.M. Pererabotka zolotosoderzhashchego syr'ya s ispol'zovaniem kompozitsionnogo reagenta [Processing gold ores using a composite reagent]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Resursosberezhenie i okhrana okruzhayushchey sredy pri obogashchenii i pererabotke mineral'nogo syr'ya» (Plakinskie chteniya—2016)*, Saint-Petersburg, 26–30 Sept., 2016], Moscow, 2016, pp. 141–142. [In Russ].

5. Tusupbaev N.K., Semushkina L.V., Turysbekov D.K., Satylganova S.B. Vliyaniye kompozitsionnogo flotoreagenta na flotatsiyu med'soderzhashchego tekhnogennoyo syr'ya [Influence of composite flotation reagent in the flotation of copper-containing man-made materials]. *Materialy 21 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennoyo syr'ya»*, Ekaterinburg, April 6–7, 2016. Ekaterinburg, 2016, pp. 217–220. [In Russ].

6. Yong Chen, Yongsheng Song. Mineralogical characterization and enrichment mikronkoy low-grade refractory gold ore. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

7. Yong Chen, Yongsheng Song, Wenjuan Li. Mineralogical characterization and processing of micro-thin, low-grade gold ore. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

8. Ignatkina V.A., Bocharov V.A., Milovich F.O. Selective composition sulfhydryl collectors and kinetics of flotation of sulfide minerals from refractory pyrite pirotinnykh non-ferrous metals. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec Canada, Sept. 11–15, 2016.

9. Ryaboy V.I., Shepeta E.D., Kretov V.P., Ryaboy I.V. A comparative study of the activity dialkylidithiophosphates and reagents with thioamide group for the separation of copper and arsenic. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

10. Molmakova M.S. Izucheniye flotiruемости sulfidnykh mineralov zolotomednoy rudy mestorozhdeniya Kumbel' [The study of flotation of sulfide minerals of gold-ore mestorozhdeniya Kumbel']. *Nauka i obrazovanie: problemy i strategii razvitiya: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Ufa, November 15–16, 2015. Ufa, 2015, pp. 145–148.

11. Bogudlova A.I., Beskrovnyaya V.P., Voyloshnikov G.I. Sovershenstvovaniye flotatsionnoy tekhnologii obogashcheniya malosulfidnoy zolotosoderzhashchey rudy [Improved flotation technology low-sulfide gold ore]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015, no 3, pp. 188–194. [In Russ].

12. Duchnowska Magdalena, Bakalarz Alicja, Luszczkiewicz Andrzej, Drzymala Jan Effect of selective foaming agents for preliminary flotation ore Kupferschiefer field. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

13. Farrokhpay Saeed, Filippov Lev Advance concentration of minerals in lateritic nickel ores by selective aggregation. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

14. Tusupbaev N.K., Rulev N.N., Turysbekov D.K., Semushkina L.V., Kaldybaeva Zh.A. Flotatsiya tonkovkraplennykh polimetallicheskikh rud s primeneniem novogo oborudovaniya [Flotation finely disseminated ores with the use of new equipment]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Resursosberezenie i okhrana okruzhayushchey sredy pri obogashchenii i pererabotke mineral'nogo syr'ya» (Plaksinskie chteniya–2016)*, Saint-Petersburg, 26–30 Sept., 2016], Moscow, 2016, pp. 139–141. [In Russ].

15. Zharmenov A.A., Sarsenbay A.A., Khayrullina S.T., Denisova N.V., Abdimanapov N.B. Ispytaniya pul'satsionnoy tekhnologii s vydeleniem gazov iz ikh vodnogo rastvora pri flotatsii tonkovkraplennykh zolotosoderzhashchikh rud v polupromyshlennom apparate [Testing the pulse technology with the release of gases from their aqueous solution with finely disseminated gold ore flotation in a semi-industrial machine]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennyye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki trudnoobogatimogo mineral'nogo syr'ya» (Plaksinskie chteniya–2015)*, Irkutsk, 21–25 Sept., 2015. Irkutsk, 2015, pp. 182–185. [In Russ].

16. Huang Jian, Li Haipeng, Liu Qingxia, Xu Zhenghe Improving the recovery of gold from gold ore with double Nevada stubborn deposits using a new bubble generator double action. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

17. Manouchehri H.R., Farrokhpay Flotation fine particles – not whether it is a matter of power consumption and size of the bubbles in the flotation cell. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

18. Samygin V.D., Grigor'ev P.V. Modelirovaniye vliyaniya gidrodinamicheskikh faktorov na selektivnost' protsessa flotatsii. Ch. 2. Vliyaniye razdeleniya iskhodnogo pitaniya na krupnye i melkie fraktsii chastits [Modeling of hydrodynamic factors on the selectivity of the flotation process. Part 2. Effect of initial separation of supply to large and small particles fraction]. *Fiziko-tekhnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 2, pp. 161–166. [In Russ].

19. Swedburg, K., Bennett C., Samuels M., Wells P.F. Application by stages flotation reactor technology in the new processing plant Afton, Canada. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.

20. Lacouture B., Wilson B., Oliver J., Lumsden B. Increased extraction of thin sulfide minerals in operation Red Dog factory. *28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016)*, Quebec, Canada, Sept. 11–15, 2016.