

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.765

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ФЛОТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ФЛОТОРЕАГЕНТОВ

Кенжалиев Б.К.¹, Тусупбаев Н.К.¹, Медяник Н.Л.², Семушкина Л.В.¹¹Satbayev University, АО «Институт металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): повышение селективности реагентов режимов при флотации сульфидных минералов достигается за счет использования в качестве собирателей органических соединений сложной молекулярной структуры либо сочетаний собирателей. Исследование поверхностно-активных и флотационных свойств композиционного аэрофлота с учетом кинетики процесса адсорбции реагентов на границе раздела жидкость-газ и сопоставление его с базовыми реагентами является актуальной задачей. **Цель работы:** разработка способа получения эффективных композиционных аэрофлотов из отходов спиртового производства, определение их физико-химических и флотационных характеристик. **Используемые методы:** пилотная установка для синтеза реагентов (R-620 Selecta, Испания), измерение поверхностного натяжения – метод Вильгельми, флотация. **Новизна** заключается в том, что в отличие от базовых собирателей, имеющих в своем составе нормальные углеводородные радикалы (нормальные бутиловые скантогенаты и аэрофлоты), композиционные собиратели являются более поверхностно-активными за счет гидрофобного взаимодействия углеводородных радикалов нормального и изостроения. **Результат:** сырьем для получения композиционного аэрофлота является смесь спиртов $C_3H_7-C_6H_{13}-OH$, выделенная из осушенной спиртовой фракции (смесьсивушных масел Талгарского и Айдабульского спиртзаводов). Показано, что за равные промежутки времени по наибольшему снижению величины поверхностного натяжения аэрофлоты располагаются в следующем порядке: композиционный аэрофлот > смесь бутилового и изоамилового аэрофлотов > изоамиловый аэрофлот > бутиловый аэрофлот, т.е. наибольшим динамическим значением поверхностной активности обладает композиционный аэрофлот. Механизм взаимодействия композиционного аэрофлота с сульфидными минералами заключается в том, что на поверхности минералов происходит усиление гидрофобизации в результате перекрытия углеводородных радикалов нормального и изостроения. При этом улучшаются его флотационные действия за счет обнажения их полярных групп. Проведены испытания по флотации золотосодержащей руды месторождения Бестобе с применением композиционного аэрофлота. При использовании нового композиционного аэрофлота на руде «Шахта Новая» месторождения Бестобе содержание золота в концентрате увеличивается на 15,07%, извлечение золота в концентрат – на 18,74% при полном исключении из процесса флотации базовых реагентов – бутилового скантогената калия и пенообразователя Т-92. На золотосодержащей руде месторождения «Карабулак» применение нового композиционного аэрофлота позволило исключить из процесса флотации бутиловый скантогенат калия и вспениватель Т-92, при этом повысить извлечение золота на 8,5 % и увеличить содержание золота в концентрате на 2,3 г/т. Результаты испытания показали, что применение композиционного аэрофлота взамен базовых значительно интенсифицирует технологический процесс флотации руд благородных металлов. **Практическая значимость:** результаты исследований рекомендуется использовать для интенсификации флотационного обогащения труднообогатимых руд.

Ключевые слова: композиционные флотореагенты, минералы, поверхностное натяжение, смачивание, адсорбция, флотация.

Введение

Современная практика применения собирателей при флотации сульфидных руд в большинстве случаев предусматривает совместное использование скантогенатов и аэрофлотов. Дополнительное к скантогенатам использование аэрофлотов дает возможность не только улуч-

шить качество получаемых сульфидных концентратов за счет более селективного действия аэрофлотов, но и повысить извлечение металлов за счет способности аэрофлотов эффективно флотировать тонкие частицы [1–3].

В работе [3] приводятся результаты испытаний по флотации сульфидных медных минералов с применением гексилового скантогената фирмы «Хёхст» и его смесей с бутиловым и изопропиловым скантогенатами. Показано, что при использовании смеси гексилового и бутилового

© Кенжалиев Б.К., Тусупбаев Н.К., Медяник Н.Л., Семушкина Л.В., 2019

ксантогенатов при снижении ее расхода с 70 до 50 г/т извлечение меди увеличивается на 0,4%.

Результаты экспериментальных исследований собирателей из класса диалкилдитиофосфатов (аэрофлотов) показывают, что их совместное применение с ксантогенатами во многих случаях обеспечивает повышение извлечения металлов на 1–2% [4]. При оптимальном их соотношении наблюдается эффективная флотация минералов, которые не обладают природной гидрофобностью [1]. При наличии на поверхности только одной из форм сорбции собирателя такие минералы плохо флотируются. Для эффективной флотации природно-гидрофобных минералов достаточно наличия на их поверхности одного физически адсорбированного собирателя [1]. Полученные результаты подтверждаются широким кругом исследований и позволяют объяснить практически все непонятные с позиций рассмотренных теорий и гипотез явления во флотации [1,5]. Они позволяют также считать, что существование методов повышения эффективности и интенсификации флотации, часто приписываемых синергизму действия реагентов, является обеспечением оптимального соотношения химически закрепившегося и физически адсорбированного собирателя на поверхности флотируемых минералов. Использование смесей собирателей является эффективным средством для получения необходимого соотношения количеств химически и физически сорбированного собирателя на поверхности флотируемого минерала. В случаях комбинаций анионного и катионного собирателей используется противоположная направленность их гидролиза с изменением pH, а при использовании смеси ксантогенатов – различная способность их низших и высших гомологов к окислению на минеральной поверхности до диксантогенонида. При использовании во флотации композиций собирателей механизм их взаимодействия с поверхностью минералов определяется особенностями поверхности минералов и активностью каждого компонента собирателя. Технологические результаты флотации зависят от соотношения компонентов и от последовательности их дозирования [5]. Однако используемые на практике композиционные реагенты представляют собой физическую смесь известных флотореагентов в определенных массовых соотношениях. Но эти реагенты дают небольшой эффект повышения извлечения цветных и благородных металлов в концентрат – на 0,5–2%, зависящий от оптимального соотношения компонентов.

Существуют разные точки зрения на механизм действия сочетания слабого и сильного со-

бирателей. Но в основном многие ученые считают, что эффект действия связан с формированием адсорбционного слоя на поверхности разделяемых минералов [6–10]. Абрамов А.А. сформулировал принцип об оптимальном соотношении химической и физической форм сорбции собирателей на поверхности минералов для эффективной флотации. Установлено, что диксантогенид способствует флотации сростков сульфидных минералов крупных классов, наиболее хорошие результаты получены при массовой доле диксантогенонида 15–40%. Тионокарбаматы (ИТК, Z-200 и др.) отличаются повышенной флотационной активностью к медным сульфидным минералам. А в сочетании с буттиловым ксантогенатом тионокарбаматы способствуют повышению флотируемости галенита из сульфидных полиметаллических руд.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Сырьем для получения композиционного аэрофлота является смесь спиртов $C_3H_7-C_6H_{13}-OH$, выделенная из осушенной спиртовой фракции (смесь сивушных масел Талгарского и Айдабульского спиртзаводов).

Состав сивушного масла Талгарского спиртзавода в результате фракционной разгонки составил: этанол – 0–5%; н-пропанол – 5–11%; изопропанол – 0–6%; изобутанол – 14–24%; изоамиловый спирт – 50–68%, а сивушное масло Айдабульского спиртзавода имеет следующий состав: этанол – 0–6%; н-пропанол – 6–13%; изопропанол – 0–6%; изобутанол – 15–28%; изоамиловый спирт – 54–71%.

Отработаны оптимальные параметры синтеза композиционного аэрофлота на пилотной установке (R-620 Selecta, Испания).

Синтез композиционного аэрофлота осуществляется следующим образом.

В реактор, снабженный механической мешалкой, термометром, обратным холодильником и воронкой для ввода сыпучих веществ, помещают 12,0 кг осушенного сивушного масла (14,7 л) и при перемешивании подогревают до 60°C, после чего загружают пятисернистый фосфор в реактор небольшими порциями в количестве 7,6 кг, со скоростью, рекомендуемой по температуре в реакторе 65–70°C. Реакционную смесь при перемешивании выдерживают при 70°C в течение 2 ч, после чего охлаждают и выгружают в промежуточный реактор. Во время реакции происходит выделение сероводорода. Получают 18,10 кг маслянистой коричневой жидкости, содержащей 0,31 кг примесей (в виде

непрореагировавшего P_2S_5), газообразный продукт 1,78 кг. Выход по стадии 91,10%. Образующийся при реакции сероводород через обратный холодильник, в котором происходит конденсация спирта, поступает на две последовательно сообщаемые склянки Вульфа с раствором гидросульфата натрия ($NaHSO_4$) и гидроксида натрия ($NaHSO_4 - 20 \text{ г/дм}^3$, $NaOH - 40 \text{ г/дм}^3$) для поглощения газа. Полученную реакционную массу 17,98 кг, содержащую непрореагировавший пентасернистый фосфор, фильтруют под вакуумом 100–200 мм рт. ст. в колбе Бунзена. Получают отфильтрованную реакционную массу, содержащую смесь диалкилдитиофосфорных кислот (ДАДТФК) и отдельно примеси. Масса фильтрата 16,12 кг, выход 86,92%.

В реактор с обратным холодильником, термометром, капельницей для подачи эфира помещают раствор едкого натра 5,06 л (раствора массовой концентрации 37%) с учетом 32% избытка щелочи. Нагревают до 40°C, при интенсивном перемешивании подают 12,95 л кислого эфира. Нейтрализацию проводят в течение 30–40 мин при температуре 25–30°C. Капля реакционной массы должна окрашивать 0,1%-ный водный раствор индикатора бромфенолового красного в красно-сиреневый цвет. Продукт при температуре 25°C густеет и при 30°C становится подвижным, но при комнатной температуре загустевает. Масса полученного аэрофлота 20,47 кг, выход – 95,39%, содержание основного вещества в пересчете на натриевую соль диизоамилдитиофосфорной кислоты 62,10%. Массовая доля гидроксида натрия 3,1%. При исследовании процесса нейтрализации установлено, что при определении необходимого для нейтрализации количества едкого натра нужно предусмотреть дополнительное его введение для обеспечения избыточной щелочности в готовом продукте в пределах 2,5–4%, с тем чтобы избежать возможности выделения сероводорода при хранении.

Для существенного удешевления и повышения эффективности реагентов при получении ксантогенатов и аэрофлотов в качестве исходного сырья было использовано специально подготовленное сивушное масло, являющееся отходом спиртового производства. Очищенное сивушное масло по данным хроматографического анализа включает пять спиртов (изопропиловый, изобутиловый, бутиловый, амиловый и изоамиловый), содержание изоамилового спирта в них колеблется в пределах 50–65%.

Композиционный аэрофлот, имеющий в своем составе углеводородные радикалы нормаль-

ного и изостроения на границе раздела фаз «вода–воздух», может образовывать уплотненные гидрофобные пленки за счет дисперсионного взаимодействия, т.е. более прочные пузырьки приблизительно одинакового размера, а полярная часть становится более доступной для взаимодействия с поверхностью сульфидных минералов. С другой стороны, плотной гидрофобной частью он может гидрофобизировать более крупные частицы и флокулировать тонкие гидрофобные шlamы.

Важной физико-химической характеристикой различной структуры и смеси аэрофлотов является их поверхностная активность на границе раздела жидкость–газ. На наш взгляд, необходимо учитывать не только поверхностную активность реагента, но и кинетику процесса адсорбции соединения на границе раздела жидкость–газ.

Показано, что исследованные аэрофлоты обладают способностью снижать поверхностное натяжение на границе раздела вода–воздух аналогично поверхностно-активным веществам. Однако для них характерно медленное установление равновесия на границе раздела вода–воздух, особенно в области низких флотационных концентраций (рис. 1).

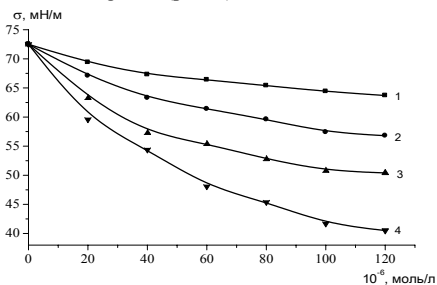


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения, измеренного после 4-часового выдерживания от концентрации различных аэрофлотов:

- 1 – бутиловый аэрофлот; 2 – изоамиловый аэрофлот; 3 – смесь бутилового аэрофлота с изоамиловым аэрофлотом при соотношении = 1:1; 4 – композиционный аэрофлот

На рис. 2 приведены значения $\sigma_{ж-г}$, близкие к равновесным (статическим), измеренные после 4 ч. Из данных рис. 2 следует, что наиболее эффективным поверхностно-активным веществом является композиционный аэрофлот. Исследование кинетики процесса адсорбции на границе вода–воздух показало, что для растворов в области малых концентраций ($10-60 \cdot 10^{-6}$ моль/л) наблюдалось уменьшение $\sigma_{ж-г}$ в течение 4–6 ч.

Результаты изучения зависимости $\sigma_{ж-г} = f(\tau)$, где τ – период времени от 1 мин до 1 ч, для растворов равной концентрации $60 \cdot 10^{-6}$ моль/л, при которой различие в поверхностно-активных свойствах аэрофлотов максимально (см. **рис. 1**), представлены на **рис. 2**. Из результатов измерений, приведенных на **рис. 2**, следует, что за равные промежутки времени наибольшее снижение величины располагается в следующем порядке: композиционный аэрофлот > смесь бутилового и изоамилового аэрофлотов > изоамиловый аэрофлот > бутиловый аэрофлот, то есть наибольшим динамическим значением поверхностной активности обладает композиционный аэрофлот.

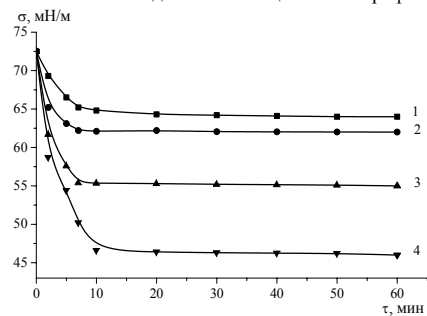


Рис. 2. Кинетические кривые изменения поверхностного натяжения различных аэрофлотов при их одинаковой концентрации равной $60 \cdot 10^{-6}$ моль/л: 1 – бутиловый аэрофлот; 2 – изоамиловый аэрофлот; 3 – бутиловый аэрофлот: изоамиловый аэрофлот = 1:1; 4 – композиционный аэрофлот

Наиболее сильными собирательными свойствами по отношению к галениту, сфалериту из числа испытанных реагентов обладает композиционный аэрофлот. Результаты мономинеральной флотации сфалерита в зависимости от концентрации аэрофлотов приведены на **рис. 3**. Как следует из данных **рис. 3**, максимальная скорость флотации наблюдается также при подаче композиционного аэрофлота.

Результаты опытов флотации галенита различными аэрофлотами представлены на **рис. 4**.

Аналогично опытам со сфалеритом, наиболее высокое извлечение галенита достигается при использовании композиционного аэрофлота. Исследования поверхностной активности изучаемых продуктов показали, что композиционный аэрофлот обладает способностью снижать поверхностное натяжение на границе раздела жид-

кость–газ аналогично сильным поверхностно-активным веществам, а также обнаружено медленное установление равновесия на границе раздела жидкость–газ в области низких флотационных концентраций.

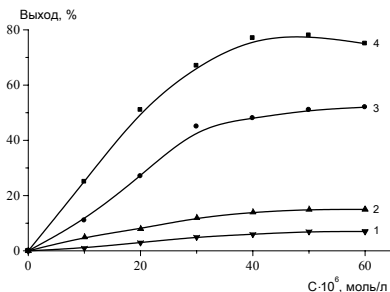


Рис. 3. Зависимость флотуемости сфалерита от концентрации различных аэрофлотов: 1 – бутиловый аэрофлот; 2 – изоамиловый аэрофлот; 3 – смесь бутиловый аэрофлот : изоамиловый аэрофлот = 1:1; 4 – композиционный аэрофлот

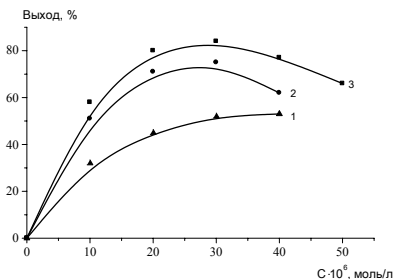


Рис. 4. Зависимость флотуемость галенита от концентрации различных аэрофлотов: 1 – изоамиловый аэрофлот; 2 – смесь бутиловый аэрофлот: изоамиловый аэрофлот = 1:1; 3 – композиционный аэрофлот

В работе [11] высказано предположение, что на флотационные свойства высших аэрофлотов существенное влияние могут оказывать их сильные поверхностно-активные свойства. Этот факт установлен Г.В. Живанковым и В.И. Рябком [12] при изучении поверхностно-активных свойств в ряду диалкилдитиофосфатов с длиной углеводородной цепи C_4 – C_{12} . Было показано, что собирательная способность диалкилдитиофосфатов по отношению к сульфидам симбатна отношению $ds/d\tau$ (где σ – величина поверхностной активно-

сти, мН/м; τ – время, с), т.е. скорости установления равновесия поверхностного натяжения водных растворов диалкилдитиофосфатов. Сначала скорость возрастает с увеличением длины радикала диалкилдитиофосфата до C_{10} , а затем начинает снижаться. Диалкилдитиофосфату C_{10} соответствуют максимум извлечения сульфидов и максимальная скорость установления равновесия на границе раздела жидкость–газ.

Сравнение результатов флотационных опытов и поверхностной активности показывает, что собирательная сила реагентов и скорость флотации симбатны динамическим, а не статическим значениям поверхностной активности исследованных различных аэрофлотов. Следовательно, чем с большей скоростью происходит установление равновесия на границе жидкость–газ в начальный момент времени, тем большей флотационной активностью обладает реагент.

Обнаружена зависимость между кинетической характеристикой реагентов и их флотационной способностью. Эта зависимость может быть использована в качестве критерия флотационной способности различной структуры и смеси аэрофлотов. Аналогичная зависимость, полученная в работе [12], показала, что выявленная симбатность между зависимостью $\Delta\sigma = f(\tau)$ при постоянной концентрации и собирательным действием реагентов будет сохраняться для гомологических рядов высших аэрофлотов. Данное предположение следует из рассмотрения элементарного флотационного акта. При взаимодействии гидрофобизированной частицы с пузырьком воздуха, имеющим динамическое значение величины $\sigma_{жг}$, возможен переход некоторой части ПАВ с границы раздела твердое–жидкость на границу раздела жидкость–газ. Переход и последующее растекание реагента по всей поверхности пузырька обуславливает уменьшение свободной энергии системы, и следовательно, чем выше поверхностная активность собирателя на границе раздела жидкость–газ, тем больше вероятность прилипания частицы. Однако, с другой стороны, с увеличением углеводородной цепи (что симбатно изменению поверхностно-активных свойств) возрастает дисперсионное взаимодействие молекул, в результате чего их переход с твердой поверхности на границу раздела жидкость–газ становится менее вероятным. Этим объясняется тот факт, что обладающий большей поверхностной активностью додециловый аэрофлот уступает по собирательной силе дециловому [12]. Изложенное позволяет наметить новый подход к определению оптимального углеводородного радикала собирателя на основе использования кинетической характеристики капиллярных свойств реагента. Мето-

дом радиоактивных изотопов был экспериментально подтвержден переход собирателя с границы раздела ж–г на границу ж–г. Предположение о возможности такого перехода ранее было высказано Сазерлендом и Уорком. В изучении механизма закрепления гидрофобизированной минеральной частицы на пузырьке воздуха это положение является фундаментальным и интенсивно исследуется за рубежом и в России [11, 13–15]. Согласно этим представлениям такой переход собирателя способствует повышению кинетики утоньшения пленки воды между пузырьком и частицей, что в отдельных случаях увеличивает скорость флотации и извлечение минералов. Влияние и следствия такого перехода с термодинамических позиций сформулированы Г.В. Живанковым [16]. Эти исследования явились базой для разработки более эффективных типов диалкилдитиофосфатных реагентов и составов на их основе.

Возможный механизм взаимодействия композиционного аэрофлота с минералами цинка и свинца заключается в следующем: композиционный аэрофлот при адсорбции на поверхности минералов приводит к усилению гидрофобизации за счет перекрывания углеводородных радикалов нормального и изостроения. При этом улучшаются его флотационные действия за счет обнажения их полярных групп.

Проведены испытания по флотации золотосодержащей руды месторождения Бестобе с применением композиционного аэрофлота. По результатам испытаний, в сравнении с действующим фабричным режимом, установлено, что при применении нового композиционного аэрофлота на руде «Шахта Новая» месторождения Бестобе содержание золота в концентрате увеличивается на 15,07%, извлечение золота в концентрат увеличивается на 18,74% при полном исключении из процесса флотации базовых реагентов – бутилового ксантогената калия и пенообразователя Т–92.

На золотозвлекательной фабрике ТОО «ИНВЕСТ-РТ» проведены испытания по флотации сульфидной золотосодержащей руды месторождения «Карабулак» с применением нового композиционного аэрофлота, в ходе которых переработано порядка 840 т руды с содержанием золота 1,0–1,12 г/т.

Вещественный состав руды месторождения «Карабулак» характеризуется следующим образом: валовое содержание сульфидов в рудах от 3 до 7%, из них от 4 до 6% приходится на пирит, 1–1,5% на арсенопирит, остальные рудные минералы. Из нерудных минералов присутствуют кварц, слюдястые минералы, в т.ч. графитоид. Основные результаты работы по двум сравнительным режимам, приведены в **таблице**. По результатам промышленных испытаний установлено: в дей-

ствующем базовом (фабричном) режиме с применением бутилового ксантогената калия и вспенивателя Т-92 среднее извлечение золота в концентрат с содержанием 22,0 г/т составило 76,7%; при применении нового композиционного аэрофлота извлечение золота составило 85,2% при содержании в концентрате 24,3 г/т.

Результаты флотации золотосодержащих руд месторождения «Карабулак»

Наименование	Выход, %	Содержание, г/т	Извлечение, %	Реагентный режим
Флотационный концентрат	3,90	22,0	76,7	При действующем базовом (фабричном) реагентном режиме
Хвосты	96,10	0,27	23,3	
Исходная руда	100	1,12	100	При применении в реагентном режиме нового композиционного собирающего аэрофлота
Флотационный концентрат	3,92	24,3	85,2	
Хвосты	96,08	0,17	14,8	
Исходная руда	100	1,12	100	

Применение нового композиционного аэрофлота позволило исключить из процесса флотации бутиловый ксантогенат калия и вспениватель Т-92, при этом повысить извлечение золота на 8,5% и увеличить содержание золота в концентрате на 2,3 г/т.

Заключение

Получены композиционные реагенты (композиционный аэрофлот и композиционный ксантогенат), сырьем для которых является композиционная смесь спиртов $C_3H_7-C_6H_{13}-OH$, выделенная из осушенной спиртовой фракции (смесь свишущих масел Талгарского и Айдабульского спиртзаводов).

Отработаны оптимальные параметры синтеза композиционных реагентов на пилотной установке (R-620 Selecta, Испания).

Получения эффективных композиционных собирающих можно достичь путем регулирования углеводородных радикалов нормального и изостроения при их синтезе. В отличие от базовых собирающих, имеющих в своем составе нормальные углеводородные радикалы (нормальные бутиловые ксантогенаты и аэрофлоты), композиционные собирающие являются более поверхностно-активными за счет гидрофобного взаимодействия углеводородных радикалов нормального и изостроения. При перекрытии указанных углеводородных радикалов обнажаются полярные группы, и это приводит к усилению

собирающих свойств. Композиционные собирающие, в отличие от своих аналогов, являются дешевыми, экономически выгодными реагентами. Для получения указанных собирающих исходным сырьем является специально подготовленное свишущее масло, являющееся отходом спиртового производства.

В качестве одного из существенных критериев оценки собирающей силы различной структуры и смеси аэрофлотов и их скорости флотации предложено использовать зависимость $\sigma_{жг} = f(\tau)$. На основании установленной зависимости в качестве сильного собирающего сульфидов предложено использовать композиционные аэрофлоты, полученные из свишущего масла.

Показано, что за равные промежутки времени по наибольшему снижению величины поверхностного натяжения аэрофлоты располагаются в следующем порядке: композиционный аэрофлот > смесь бутилового и изоамилового аэрофлотов > изоамиловый аэрофлот > бутиловый аэрофлот, т.е. наибольшим динамическим значением поверхностной активности обладает композиционный аэрофлот.

В отличие от базовых собирающих, имеющих в своем составе нормальные углеводородные радикалы (нормальные бутиловые аэрофлоты), композиционные собирающие являются более эффективными за счет гидрофобного взаимодействия углеводородных радикалов нормального и изостроения.

Механизм взаимодействия композиционного аэрофлота с сульфидными минералами заключается в том, что на поверхности минералов происходит усиление гидрофобизации в результате перекрытия углеводородных радикалов нормального и изостроения. При этом улучшаются его флотационные действия за счет обнажения их полярных групп.

Результаты испытаний показали, что применение указанных реагентов взамен базовых значительно интенсифицирует технологический процесс флотации руд благородных металлов.

Список литературы

1. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения. 3-е изд. М.: МГУ, 2008. 670 с.
2. Рябой В.И. Проблемы использования и разработки новых флотореагентов в России //Цветные металлы. 2011. №3. С.7-14.
3. Матвеева Т.Н. Современные реагентные режимы флотации платины и золотосодержащих руд // Проблемы освоения недр в XXI в. глазами молодых: материалы 5-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. Москва: Изд-во ИПКОН РАН, 2008. С. 12-15.
4. Селективное повышение флотоактивности сульфидов цветных металлов с использованием сочетаний

- сульфгидрильных собирателей // Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Милович Ф.О. и др. // Обогащение руд. 2015. №3. С.18–24. <https://doi.org/10.17580/or.2015.03.03>
5. Ignatkina V.A., Bocharov V.A. and B.T. Tubdenova (Puntsukova). Combinations of different-class collectors in selective sulphide-ore flotation // Journal of Mining Science, Springer New York. 2010. Vol. 46. № 1. P. 82–88.
 6. Alan N. Buckley, Gregory A. Hope, Kenneth C. Lee, Eddie A. Petrovic, Ronald Woods Adsorption of O-isopropyl-N-ethyl thionocarbamate on Cu sulfide ore minerals // Minerals Engineering. 2014. Vol. 69. P. 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.002>
 7. Bekturganov N.S., Tussupbayev N.K., Semushkina L.V., Turyzbekov D.K. Application of multifunctional flotation reagents for processing of man-made raw materials // Materials 16th SGEM GeoConferences. Bulgaria. 2016. P.1035–1042.
 8. Флотационная переработка техногенного минерального сырья с использованием композиционного реагента / Тусупбаев Н.К., Семушкина Л.В., Турысбеков Д.К., Сургурбекова А.К., Мухамедилова А.М. // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2016. С.214–216.
 9. Влияние поверхностно-активных свойств реагентов, содержащих диалкилдитиофосфаты натрия, на флотацию сульфидов / Рябой В.И., Шелета Е.Д., Кретов В.П. и др. // Обогащение руд. 2015. № 2. С.18–22. <https://doi.org/10.17580/or.2015.02.04>
 10. Коллоидно-химические и флотационные характеристики полифункциональных реагентов / Билялова С.М., Тусупбаев Н.К., Ержанова Ж.А. и др. // Комплексное использование минерального сырья. 2017. № 1. С.5–10. www.kims-imio.kz
 11. Рябой В.И. Исследования ООО «Механобр-Оргсинтез-реагент» в области флотореагентов // Обогащение руд. 2016. № 5. С.67–74.
 12. Живанков Г.В., Рябой В.И. Собирательные свойства и поверхностная активность высших аэрофлотов // Обогащение руд. 1985. № 3. С.48–55.
 13. Pan Lei, Jung Sunghwan, Yoon Rol-Hoan. A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interaction // Int. J. Miner. Process. 2012. Vol. 106–109. P. 37–41.
 14. Karimian A., Rezaei B., Masoumi A. The effect of mixed collectors in the rougher flotation of sungun copper // Life Science Journal. 2013. No. 10. P. 268–272.
 15. Nooshabadi A.J., Rao K.H. Formation of hydrogen peroxide by sulphide minerals // Hydrometallurgy. 2014. No. 141. P. 82–88.
 16. Improvement of diamond recovery in froth of kimberlite ores with the help of flotation reagents / V.I. Ryabov, G.V. Zhivankov, V.A. Shenderovich, M.N. Zlobin, M.V. Zaskovich // XX IMPC. Aachen, Germany, 1997. P. 81–84.

Поступила 03.06.19

Принята в печать 08.07.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>

UNDERSTANDING THE PHYSICO-CHEMICAL AND FLOTATION CHARACTERISTICS OF COMPOSITE FLOTATION REAGENTS

Bagdaulet K. Kenzhaliev – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector at Satbayev University, General Director Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Almaty, Kazakhstan

Nesipbay K. Tusupbaev – Dr.Sci. (Eng.), Head of Flotation Reagents and Beneficiation Laboratory Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: nesipbay@mail.ru

Nadezhda L. Medyanik – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Chemistry Novos Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: medyanikmagnitka@mail.ru

Larisa V. Semushkina – Cand.Sci. (Eng.), Lead Researcher at the Flotation Reagents and Beneficiation Laboratory Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: syomushkina.lara@mail.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): Selectivity of reagents used in sulphide mineral flotation can be increased through the use of organic compounds with complex molecular structures or combinations of collecting reagents. It is an important task to look at the surface activity and flotation properties of composite aérofloat taking into account the kinetics of the reagent adsorption at the liquid-gas interface and to compare aérofloat with basic reagents. **Objectives:** To develop a method for obtaining effective composite aérofloats from waste alcohol and to determine their physico-chemical and flotation properties. **Methods Applied:** A pilot plant for synthesizing reagents (R-620 Selecta, Spain), surface tension measurements - Wilhelmy plate method, flotation. **Originality:** The originality of this research lies in the fact that, unlike basic collectors which contain normal hydrocarbon radicals (normal butyl xanthates and aérofloats), composite collectors are more surface-active due to the hydrophobic interaction of hydrocarbon radicals with normal and iso-structures. **Findings:** The material for the production of composite aérofloats includes a mixture of C₃H₇-C₆H₁₃-OH alcohols isolated from a dry alcohol fraction (a mixture of fusel oils from Talgar and Aydabulsky distilleries). It is shown that the aérofloats can be arranged in the following order in terms of the biggest drop in the surface tension over equal periods of time: composite aérofloat > a mixture of butyl and isoamyl aérofloat > isoamyl aérofloat > butyl aérofloat. It means that compo-

ality: The originality of this research lies in the fact that, unlike basic collectors which contain normal hydrocarbon radicals (normal butyl xanthates and aérofloats), composite collectors are more surface-active due to the hydrophobic interaction of hydrocarbon radicals with normal and iso-structures. **Findings:** The material for the production of composite aérofloats includes a mixture of C₃H₇-C₆H₁₃-OH alcohols isolated from a dry alcohol fraction (a mixture of fusel oils from Talgar and Aydabulsky distilleries). It is shown that the aérofloats can be arranged in the following order in terms of the biggest drop in the surface tension over equal periods of time: composite aérofloat > a mixture of butyl and isoamyl aérofloat > isoamyl aérofloat > butyl aérofloat. It means that compo-

site aerofloats have the highest dynamic value of surface activity. The interaction of composite aerofloats with sulphide minerals takes place when the surface hydrophobization of the minerals becomes stronger as a result of overlapping of hydrocarbon radicals with normal and iso-structures. At the same time, its flotation activity improves due to the exposure of their polar groups. Tests have been carried out on the flotation of gold-bearing ore from the Bestobe deposit using composite aerofloat. When the new composite aerofloat was applied on the Shakhtha Novaya ore of the Bestobe deposit, the concentration of gold in the concentrate increased by 15.07%. The recovery of gold into the concentrate increased by 18.74% when the basic reagents – i.e. potassium butyl xanthate and T-92 foaming agent – were completely excluded from the flotation process. Application of the new composite aerofloat at the Karabulak gold deposit saved the need for using potassium butyl xanthate and T-92 foaming agent in the flotation process. At the same time the gold recovery rose by 8.5% and the concentration of gold in the concentrate increased by 2.3 g/t. The test results indicate that composite aerofloats used instead of the basic reagents significantly intensify the flotation of noble metal ores. **Practical Relevance:** The results of this research can be used to intensify the flotation of refractory ores.

Keywords: Composite flotation reagents, minerals, surface tension, wetting, adsorption, flotation.

References

- Abramov A.A. *Flotatsionnye metody obogashcheniya* [Flotation methods of mineral enrichment]. 3rd ed. Moscow: MSMU, 2008. 670 p. (In Russ.)
- Ryaboy V.I. The problems of usage and development of new flotation reagents in Russia. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2011, no. 3, pp. 7–14. (In Russ.)
- Matveeva T.N. Modern reagent regimes for the flotation of platinum and gold-bearing ores. *Problemy osvoyeniya nedr v XXI v. glazami molodykh: materialy 5-y Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov* [Problems of subsoil development in the 21st century as viewed by the young: Proceedings of the 5th International Scientific School of Young Researchers and Experts]. Moscow: IPKON RAS, 2008, pp. 12–15. (In Russ.)
- Ignatkina V.A., Bocharov V.A., Milovich F.O. et al. Selective increase in the flotation response of non-ferrous metal sulphides using combinations of sulfhydryl collectors. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of ores], 2015, no. 3, pp. 18–24. <https://doi.org/10.17580/or.2015.03.03> (In Russ.)
- Ignatkina V.A., Bocharov V.A. and B.T. Tubdenova (Puntsukova). Combinations of different-class collectors in selective sulphide-ore flotation. *Journal of Mining Science*, Springer New York, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 82–88.
- Alan N. Buckley, Gregory A. Hope, Kenneth C. Lee, Eddie A. Petrovic, Ronald Woods Adsorption of O-isopropyl-N-ethyl thionocarbamate on Cu sulfide ore minerals. *Minerals Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.002>
- Bekturганov N.S., Tusupbayev N.K., Semushkina L.V., Turyzbekov D.K. Application of multifunctional flotation reagents for processing of man-made raw materials. *Materials 16th SGEEM Conferences*, Bulgaria, 2016, pp. 1035–1042.
- Tusupbaev N.K., Semushkina L.V., Turyzbekov D.K., Sugurbekova A.K., Mukhamedilova A.M. Flotation processing of manmade mineral materials using a composite reagent. *Nauchnyye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific basis and the practice of processing ores and manmade raw materials: Proceedings of the International Conference]. Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2016, pp. 214–216. (In Russ.)
- Ryaboy V.I., Shepeta E.D., Kretov V.P. et al. Effect of the surface-active properties of reagents containing sodium di-alkyl dithiophosphates on the flotation of sulfides. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of ores], 2015, no. 2, pp. 18–22. <https://doi.org/10.17580/or.2015.02.04> (In Russ.)
- Bilyalova S.M., Tusupbaev N.K., Erzhanova Zh.A. et al. Colloid-chemical and flotation properties of polyfunctional reagents. *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syr'ya* [Comprehensive exploitation of mineral resources], 2017, no. 1, pp. 5–10. www.kims-imio.kz (In Russ.)
- Ryaboy V.I. Research undertaken by Mekhanobr-Orgsintez-reagent in the field of flotation reagents. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of ores], 2016, no. 5, pp. 67–74. (In Russ.)
- Zhivankov G.V., Ryaboy V.I. Collecting properties and surface activity of higher aerofloats. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of ores], 1985, no. 3, pp. 48–55. (In Russ.)
- Pan Lei, Jung Sunghwan, Yoon Rol-Hoan. A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interaction. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, vol. 106–109, pp. 37–41.
- Karimian A., Rezaei B., Masoumi A. The effect of mixed collectors in the rougher flotation of sungun copper. *Life Science Journal*, 2013, no. 10, pp. 268–272.
- Nooshabadi A.J., Rao K.H. Formation of hydrogen peroxide by sulphide minerals. *Hydrometallurgy*, 2014, no. 141, pp. 82–88.
- V.I. Ryaboy, G.V. Zhivankov, V.A. Shenderovich, M.N. Zlobin, M.V. Zaslavich. Improvement of diamond recovery in froth of kimberlite ores with the help of flotation reagents. *XX IMPC*. Aachen, Germany, 1997, pp. 81–84.

Received 03/06/19

Accepted 08/07/19

Образец для цитирования

Изучение физико-химических и флотационных характеристик композиционных флотореагентов / Кенжалиев Б.К., Тусупбаев Н.К., Медяник Н.Л., Семушкина Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 4–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>

For citation

Kenjaliev B.K., Tusupbaev N.K., Medyanik N.L., Semushkina L.V. Understanding the Physico-Chemical and Flotation Characteristics of Composite Flotation Reagents. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 4–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11>