ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(4):120-135
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.765; 661.185 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_120

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИЙ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ

А.И. Городов[1], В.И. Павленко[1], Р.Н. Ястребинский[1], С.И. Городов[1], Н.А. Шаповалов[1]

[1] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, e-mail: gorodov-andreyy@mail.ru

Аннотация: Исследование направлено на решение проблемы низкой эффективности флотационного извлечения кремнеземсодержащих компонентов (кварц, силикаты) из минерального сырья (гематитовые кварциты, борогипс), обусловленной неселективностью традиционных собирателей и высоким расходом реагентов. Цель работы – выявление особенностей модификации собирателей путем составления композиций на основе ацетатов первичных аминов с поверхностно-активными веществами различной природы. Предложена методика выбора модифицирующих компонентов и определения их содержания в собирательной смеси на основе соотношения адсорбционных центров неоднородной поверхности извлекаемой части питания флотации. Исследовано влияние поверхностно-активных веществ и их смесей на смачивание минеральных поверхностей кварца и гематита. Экспериментально показано преимущество предлагаемых композиций, по сравнению с исходными веществами, для извлечения кремнеземсодержащих компонентов, как кристаллических, так и аморфных, методом флотации. Для прямой флотации кварца в гематитовых кварцитах применение композиции на основе ацетатов первичных аминов и триэтаноловых солей жирных кислот позволило снизить содержание общего SiO_2 в камерном продукте до 24,9% и повысить извлечение до 77,3%, сократив содержание железосодержащих примесей в пенном продукте. При обратной флотации кремнеземсодержащих компонентов из борогипса композиция на основе ацетатов первичных аминов и мыл талловых масел обеспечила получение концентрата с содержанием общего SiO_2 61,8% (из них 50,9% аморфного) при снижении расхода реагента в 3 раза и степени извлечения 42,6%.

Ключевые слова: смачивание, кремнезем, аморфный, кристаллический, диоксид кремния, гематит, кварц, борогипс, амины, жирные кислоты, талловое масло, хелатные агенты, флотация, пенная сепарация.

Благодарность: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2023-0004 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Для цитирования: *Городов А. И., Павленко В. И., Ястребинский Р. Н., Городов С. И., Шаповалов Н. А.* Применение композиций поверхностно-активных веществ для извлечения кремнеземсодержащих компонентов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 4. – С. 120–135. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_120.

© А.И. Городов, В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, С.И. Городов, Н.А. Шаповалов. 2026.

Application of compositions of surfactants in extraction of silica-bearing components

A.I. Gorodov[1], V.I. Pavlenko[1], R.N. Yastrebinsky[1], S.I. Gorodov[1], N.A. Shapovalov[1]

[1] Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, e-mail: gorodov-andreyy@mail.ru

Abstract: The study aims to solve the problem of low efficiency in flotation of silica-bearing components (quartz, silicates) from mineral raw materials (hematite quartzite, borogypsum). This inefficiency is conditioned by weak selectivity of conventional collectors and by high consumption of reagents. The objective of the study is to reveal the features of modification of collectors through composing acetates of prime amines with surfactants of various nature. A procedure is proposed for selecting modifiers and determining their contents in the collecting mixture on the basis of a ratio of adsorptions centers on inhomogeneous surface in extractable portion of flotation feed. The influence of surfactants and their mixes on wetting of mineral surfaces of quartz and hematite is investigated. The experiments show the advantage of the proposed compositions over the basic substances in extraction of silica-bearing components, both crystalline and amorphous, in flotation. In direct flotation of quartz in hematite quartzite, the use of the composition of prime amine acetates and triethanol salts of fat acids enabled reduction of total SiO_2 in middlings to 24.9% and the increased recovery to 77.3%, with the decreased content of iron-bearing impurities in froth product. In reverse flotation of silica-bearing components from borogypsum, the composition of prime amine acetates and tall oil soap ensured production of a concentrate with total SiO_2 content of 61.8% (including 50.9% amorphous) at the reagent consumption reduced by 3 times and at the recovery ratio of 42.6%.

Key words: wetting, silica, amorphous, crystalline, silicon dioxide, hematite, quartz, borogypsum, amines, fat acids, tall oil, chelate agents, flotation, froth flotation.

Acknowledgements: The study was carried out under contract with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Contract No. FZWN-2023-0004, using equipment of the High-Tech Center at the Shukhov Belgorod State Technological University.

For citation: Gorodov A. I., Pavlenko V. I., Yastrebinsky R. N., Gorodov S. I., Shapovalov N. A. Application of compositions of surfactants in extraction of silica-bearing components. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(4):120-135. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_120.

Введение

С каждым годом объем продукции из минерального сырья непрерывно растет. Для удовлетворения человеческих потребностей ежегодно извлекается более 30 млрд т полезных ископаемых [1]. Многие минеральные породы содержат в своем составе кремнеземсодержащие компоненты (кварц, силикаты и др.), которые затрудняют их дальнейшую переработку. Например, для получения брикетированного железа используют продукты с высоким содержанием железа (66—71%) и низким содержанием кремнезема (менее 3%), которые можно напрямую металлизировать.

Добываемая железосодержащая руда, как правило, не соответствует этим высоким требованиям, поэтому горнообогатительные комбинаты разрабатывают и внедряют новые технологии обогащения.

Минеральный состав, особенности поверхности минералов и наличие тонковкрапленных частиц являются основополагающими критериями при выборе технологии обогащения полезных ископаемых. В последние годы для обогащения минерального сырья широко используется флотационная технология. Например, флотацию применяют для удаления оксидов кремния из слабомагнитных железосодержащих руд, а также из продуктов (магнетитовых концентратов), полученных после мокрой или сухой магнитной сепарации магнитных железных руд. Дополнительное обогащение магнетитового концентрата дает возможность выпускать окатыши с повышенным содержанием железа и пониженным содержанием оксида кремния [2]. Флотационным методом выделяют кремнеземсодержащие компоненты, необходимые для производства наполнителей — белой сажи, и из отходов сернокислой переработки датолитовых руд (борогипс) [3, 4].

Эффективность обогащения во многом зависит от действия флотационных реагентов, в том числе от особенностей их адсорбции на различных границах раздела фаз и структуры образующихся адсорбционных слоев [5—7]. В свою очередь, на адсорбционную активность реагентов влияет множество факторов: природа и «чистота» минералов; подготовка руды (размер и форма частиц); условия приготовления рабочих дисперсий (время перемешивания, температура, pH), химическое строение, применение вспомогательных веществ и т.д. Перспективно использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) — веществ дифильного строения (молекула состоит одновременно из полярных и неполярных частей), адсорбирующихся на границе раздела фаз и снижающих на ней избыток поверхностной энергии. К преимуществам некоторых ПАВ относится их способность совмещать функции собирателя и пенообразователя.

В качестве собирателей при прямой флотации кремнеземсодержащих минералов (концентрируются в пенном продукте) используются катионоактивные азотсодержащие ПАВ: индивидуальные амины, эфиры первичных аминов, диамины и их эфиры [8]. Для обратной флотации кремнеземсодержащих минералов (остаются в камере флотации) применяют анионные собиратели оксигидрильного типа — карбоновые жирные кислоты и их мыла на основе щелочных металлов (K и Na). Среди жирных кислот и их мыл наиболее распространены олеиновая кислота, олеат натрия, талловое масло (побочный продукт переработки древесины, состоящий из смеси олеиновой, линолевой, линоленовой, предельных и окисленных смоляных кислот) [9, 10]. Среди катионных ПАВ для обратной флотации частиц кварца применяют хлоргидраты первичных аминов с длиной углеводородной цепью — C_{12}–C_{14}.

Основной тенденцией в разработке эффективных флотационных реагентов нового поколения является использование сочетаний различных ПАВ в их оптимальном соотношении [11—17]. Основные преимущества собирательных смесей, состоящих из композиций ПАВ, заключаются в получении необходимых технологических показателей флотации при низком расходе реагентов в разных условиях их применения (температура пульпы, содержание в ней ионов), а также в возможности регулировать параметры процесса (пенообразование, извлечение и др.). Учитывая переменный состав руд, разработка рецептур собирательных смесей в совокупности с применением современных дозировочных комплексов решает вопрос эффективного управления флотационными процессами.

Цель работы — выявление особенностей модифицирования собирателей для извлечения кремнеземсодержащих компонентов путем составления композиций ацетатов первичных аминов с различными поверхностно-активными веществами.

Методика проведения исследований

В настоящей работе модифицировали собиратели, как для прямой, так и для обратной флотации кремнеземсодержащих материалов. Модифицирование собирателей проводили путем смешения традиционных собирателей с поверхностно-активными веществами. В процессе модификации между компонентами может протекать как химическое взаимодействие с образованием новых продуктов, так и коллоидно-химическое, приводящее к образованию совместных агрегатов и мицелл [6, 11].

В качестве минеральных компонентов при прямой флотации кремнезема использовали гематитовые кварциты, при обратной — борогипс. Химический состав исходных кремнеземсодержащих компонентов представлен в табл. 1. Результаты рентгенофазового анализа гематитовых кварцитов (рис. 1, *а*) свидетельствуют о присутствии кристаллических фаз кварца (*d* = 4,27; 3,35; 2,47; 2,28; 1,82 Å), гематита (*d* = 2,706; 2,52; 2,21 Å), карбонатов (доломита), а также железосодержащих фосфатов и силикатов. На рентгенограмме борогипса (рис. 1, *б*) зарегистрированы кристаллические фазы гипса (*d* = 7,62; 4,29; 3,50; 3,19; 3,07 Å), ангидрита (*d* = 3,50; 3,19; 2,85; 2,70 Å), силикатов кальция (волластонит, андрадит, гранат). Малая интенсивность дифракционных отражений SiO_2 (*d* = 4,27; 3,35 Å) свидетельствует о преобладании в пробе аморфного диоксида кремния (~27,3%) по сравнению с кристаллическим.

Компонентами собирательных смесей для прямой флотации являлись ацетаты производных первичных ами-

Таблица 1

Химический состав питания флотации, %
Chemical composition of flotation feed, %

Проба	SiO_2	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3
Гематитовые кварциты	59,7	30,4	2,4	1,8	2,8	1,6	0,4	0,3	0,3	0,05
Борогипс	35,0	3,0	—	30,1	0,3	0,01	0,2	0,3	0,1	30,5

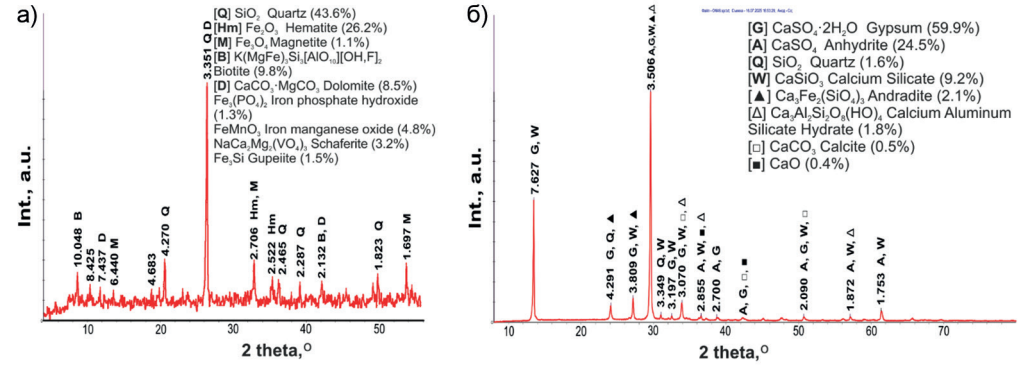


Рис. 1. Рентгенограммы гематитовых кварцитов (а) и борогипса (б)
Fig. 1. X-ray diffraction patterns of hematite quartzites (a) and borogypsum (b)

нов (катионный реагент ФЛОН, ТУ 20.41.20-034-49811247-21, ООО НПП «Промсинтез»), а для обратной — мыла хвойных талловых масел (МХТМ) (ООО «Техсервис», ТУ 13-0281078-119-89). Также в исследованиях для модифицирования использовали триэтаноламиновые соли жирных кислот (ТЭА-ЖК) (ООО «Шебекинская индустриальная химия»). Учитывая геометрические (стерические) ограничения молекул, энергетическую неоднородность поверхности (наличие дефектов кристаллов), наличие ионов в пульпе, а также то, что исследуемые реагенты представляют собой технические продукты, содержащие различные примеси, и их молекулярная масса может варьироваться в широких пределах, в исследовании для упрощения использовано массовое соотношение компонентов собирательных смесей, а не мольное. Композиции готовили путем смешения 5% водных растворов.

При составлении композиций учитывали, что поверхности минералов, отделяемых в пенный продукт, на которых необходимо создать равномерный мономолекулярный слой ПАВ (гидрофобной частью ориентированных в водный раствор), имеет адсорбционные центры различной природы. На каждый адсорбционный центр должна адсорбироваться соответствующая молекула собирателя. Поэтому выдвинуто предположение, что соотношение адсорбционных центров неоднородной поверхности (по химическому составу) извлекаемой части питания флотации будет соответствовать оптимальному соотношению реагентов.

Так, при прямой флотации кварца гематитовых кварцитов основными активными центрами адсорбции являются депротонированные в щелочной среде силанольные группы ($\equiv Si\text{-}O^-$), на которых за счет электростатического притяжения и образования водородных связей преимущественно способны адсорбироваться амины. Однако в исходном питании флотации присутствуют также карбонатные минералы, в которых адсорбционными центрами выступают Ca^{2+}, $CaOH^+$, Mg^{2+} и др. Для таких центров предпочтительно образование хелатных комплексов, например, с мылами жирных кислот [18, 19] или ТЭА-ЖК. Таким образом, соотношение компонентов в комплексном реагенте (ТЭА-ЖК : ФЛОН) для извлечения кварца и карбонатов из гематитовых кварцитов рассчитано как соотношение массовых частей оксидов разной природы извлекаемой части питания флотации: $(CaO+MgO)/SiO_2$) и составляет ~ 1:13 соответственно.

При получении из исходного борогипса концентрата, необходимого для производства аморфной «белой сажи» (обратной флотации SiO_2), требуется извлечь минералы с Ca-содержащими адсорбционными центрами мылами талловых масел. Однако в некоторых извлекаемых минералах (силикатах кальция, кристаллическом кварце) присутствуют силанольные адсорбционные центры. Поэтому соотношение компонентов в комплексном реагенте (МХТМ : ФЛОН) рассчитано как $(CaO+MgO)/(SiO_2)_{кр}$ и составляет ~4:1 соответственно.

Содержание кристаллического диоксида кремния в исходном питании флотации $(SiO_2)_{кр}$ определено в соответствии с теоретическим количеством SiO_2 в минералах.

Для оценки влияния собирателей на смачивание минералов использовали плоскополированные прямоугольные пластинки, изготовленные из кварца ($\omega(SiO_2)$ = 98,5%) и гематита ($\omega(Fe_2O_3)$ = = 98,3%) с помощью линейного прецизионного отрезного станка Buehler IsoMet 5000 (Германия) и шлифовально-полировального станка MetaServ® 250 с дополнительной полуавтоматической

насадкой Vector® (Buehler, Германия). Перед испытанием пластинку промывали теплой хромовой смесью и дистиллированной водой. Определение смачиваемости пластинки основано на методе Вильгельми [19, 20]. Подготовленную полированную пластинку закрепляли в держателе тензиометра KRUSS K100 (Германия), после чего опускали в термостатируемую (T = 22±0,5 °C) кювету до соприкосновения с жидкостью. Основные детали работы прибора описаны в [21, 22]. Со временем происходит насыщение поверхностного слоя молекулами реагентов, как на границе раздела фаз раствор–воздух, так и на границе пластинка–раствор, что влияет на смачивание пластинки жидкостью. Чувствительный тензиометрический датчик прибора позволяет зафиксировать максимальную силу без полного отрыва пластинки от жидкости, поэтому не происходит перемешивание поверхностного слоя (пластина только касается жидкости) и практически не нарушается процесс насыщения границ раздела фаз молекулами реагентов. В результате многократных циклов погружения–извлечения пластинки регистрируется зависимость силы отрыва от времени. Для получения кинетических изотерм смачивания строили график зависимости угла смачивания (θ) от времени. Угол смачивания (θ) определяли по максимальной силе отрыва (F) пластинки от жидкости, в зависимости от поверхностного натяжения на границе жидкость–воздух (σ), согласно уравнению (1) [20]. В качестве жидкости использовали водный раствор, состоящий из дистиллированной воды, регулятора pH среды и собирателя.

Измерения проводили с постепенным увеличением содержания собирателя в растворе, осуществляемым с помощью автоматической системы дозирования прибора.

$$\theta = \arccos\left(\frac{Fg}{2\sigma l}\right). \qquad (1)$$

Поверхностное натяжение жидкостей разных концентраций определено методом висящей капли с помощью прибора KRUSS DSA30 (Германия). По данным зависимости поверхностного натяжения от концентрации графическим методом [23] определены значения минимальной поверхностной энергии на границе раздела фаз раствор–воздух ($\sigma_{ж\text{-}г}$), поверхностной активности и критической концентрации мицеллообразования (ККМ) исследуемых реагентов.

Поверхностная активность

$$g = \lim_{C \to 0}\left(-\frac{\partial\sigma}{\partial C}\right)$$

определена как отрицательный тангенс угла наклона касательной, проведенной к участку кривой, отвечающей минимальной концентрации растворенного вещества. На рис. 2 представлен графический метод определения коллоидно-химических свойств реагентов на примере композиции МХТМ+ФЛОН. Полученные значения свойств для всех реагентов сведены в табл. 2.

Исследования по флотационному извлечению кремнеземсодержащих ком-

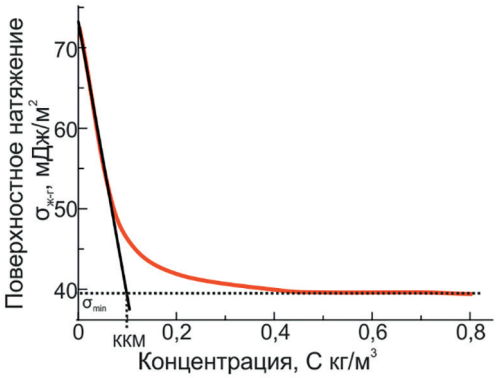


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации МХТМ+ФЛОН

Fig. 2. Dependence of surface tension on the concentration of MXTM+Flon

Таблица 2

Коллоидно-химические свойства исследуемых реагентов, %
Colloidal and chemical properties of the studied reagents, %

Название	$\sigma_{ж-г}$, мН/м	Поверхностная активность, мДж·м/кг	ККМ, мг/л
ФЛОН	40	108	200
МХТМ	35	444	400
МХТМ+ФЛОН	39	370	100
ТЭА-ЖК	49	190	250
ТЭА-ЖК+ФЛОН	45	230	150

понентов из водно-минеральных дисперсий проводили на лабораторной машине ФМ-3 (Россия).

Частота оборотов импеллера составляла 1460 — 1480 об/мин, расход подаваемого воздуха — 0,64 л/мин. Флотация осуществлялась в камере объемом 1 л, загруженность пульпы 38% минерального компонента, температура пульпы 22 °С. Щелочную среду (pH≈10) создавали 1%-ным раствором гидроксида натрия.

Определение химического и минерального составов флотируемых материалов и получаемых концентратов осуществлялось с использованием современного аналитического комплекса ARL 9900 WorkStation (производство Швейцарии). Данный прибор представляет собой интегрированную систему, объединяющую два аналитических метода: рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) и рентгеновской дифракции (XRD) с источником CoKa. Для идентификации минералов использовали базу ICDD (International Centre for Diffraction Data) и электронную картотеку PDF–2 (Powder Diffraction File). Содержание кристаллических фаз уточняли методом Ритвельда в программе Match 2.4.2.

Оценку флотационного разделения осуществляли по технологическим параметрам: выходу целевого продукта ($\gamma_ц$, %), содержанию SiO_2 в исходном (β_0, %), камерном ($\beta_к$, %) и пенном ($\beta_п$, %) продуктах, а также извлечению ($\varepsilon = \gamma_к \cdot \beta_к / \beta_0$). Минерализацию пены ($M$, %) определяли как отношение масс высушенного пенного продукта (P_1) и мокрой пены (P_2) [6].

Обсуждение результатов

Смачивание — одно из важных явлений, которое лежит в основе флотационного разделения минеральных дисперсий. Кроме того, смачивание неразрывно связано с адсорбцией ПАВ из растворов, что делает эту экспресс-характеристику важной при составлении рецептур собирательных смесей. Особое значение во флотационных процессах имеют кинетические изменения свойств, поскольку на этапе столкновения частиц с пузырьком воздуха время их контакта не превышает 5 — 10 мс [24].

На рис. 3 представлены кинетические изотермы смачивания плоскополированной пластинки кварца жидкостями, содержащими компоненты собирателей, используемые при прямой (ФЛОН) и обратной (МХТМ) флотации кремнеземсодержащих веществ, а также их композиция. Собиратель ФЛОН снижает смачиваемость кварцевой пластинки (см. рис. 3, *а*), при этом угол смачивания зависит от его содержания в растворе. Наибольший угол смачивания при достижении относительного равновесия в системе наблюдается при концентрации ФЛОН 100 мг/л. При увеличении концентрации собирателей до 200 — 400 мг/л, по-видимому, молекулы

адсорбируются в несколько молекулярных слоев, что способствует снижению угла смачивания по отношению к ранее образованному (при 100 мг/л) мономолекулярному слою. Высокое содержание катионного собирателя ФЛОН в растворе (600 мг/л) способствует резкому снижению смачивания (до θ≈59°) в начальный момент времени, с последующим медленным (по экспоненциальной зависимости) достижением равновесного состояния (θ≈23°). Такое поведение обусловлено адсорбцией мицелл (или ассоциатов молекул) на минеральной поверхности кварца и последующим их разрушением, с постепенной перестройкой молекул в сорбционном слое. Собиратель МХТМ в меньшей мере снижает смачивание кварца (см. рис. 3, *б*) по сравнению с ФЛОН, однако принципиальная зависимость угла смачивания от содержания ПАВ в растворе сохраняется: наибольший равновесный угол смачивания (θ≈15°) при 100 мг/л, при 200—400 мг/л — образование полимолекулярного адсорбционного слоя,

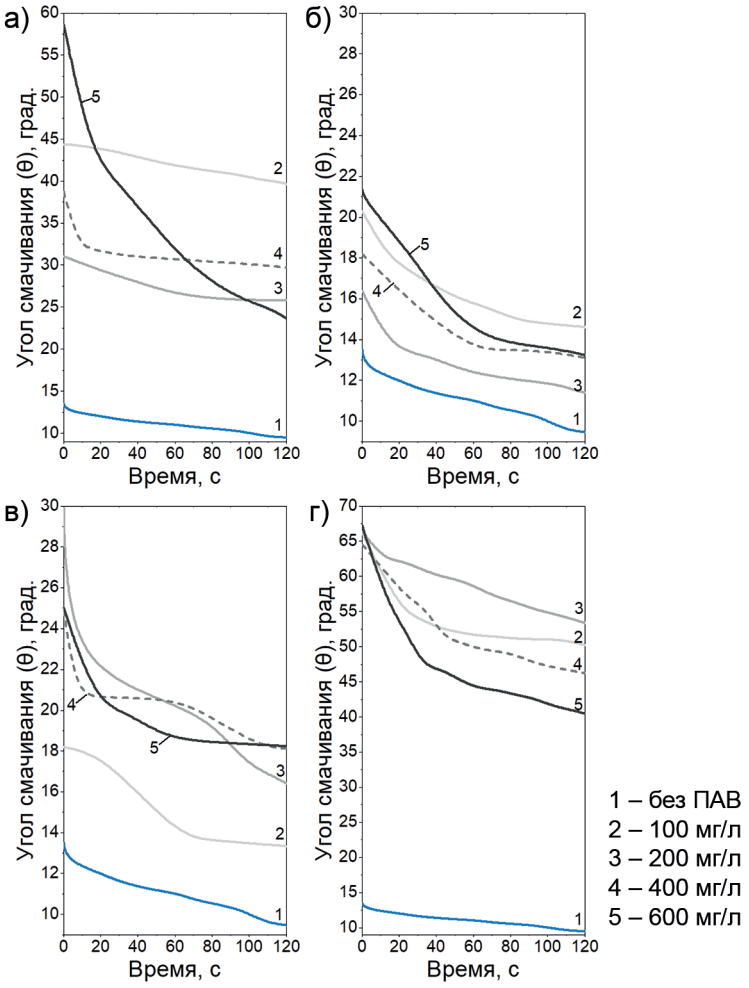


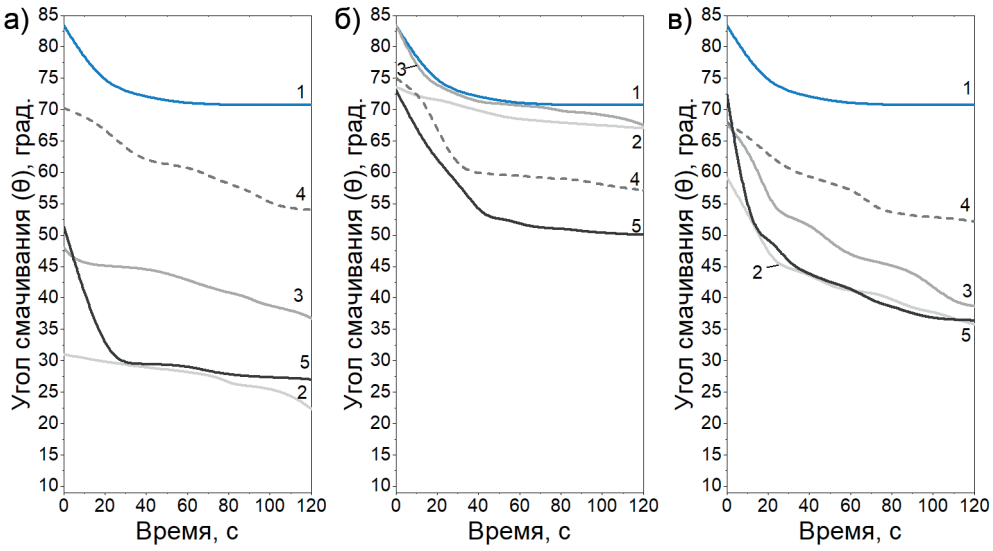
Рис. 3. Кинетические изотермы смачивания кварца жидкостью, содержащей ФЛОН (а), МХТМ (б), МХТМ+ФЛОН (в), ТЭА-ЖК+ФЛОН (г)

Fig. 3. Kinetics isotherms wetting angles quartz water solution Flon (a), MXTM (b), MXTM+Flon (v), TEA-FA+Flon (g)

при 600 мг/л — адсорбция мицелл. Кинетические кривые смачивания, полученные при использовании композиции МХТМ+ФЛОН, имеют сложный характер (см. рис. 3, *в*), что обусловлено наличием ассоциатов разнородных молекул в системе [6].

Данные, представленные на рис. 3, наглядно показывают возможность использования ФЛОН для прямой флотации кремнеземсодержащих компонентов, так как в данном процессе необходимо как можно больше увеличить их угол смачивания. В этом случае важно создать условия мономолекулярной адсорбции, чтобы избежать негативного действия избыточного содержания ПАВ в водно-минеральной системе. Реагент МХТМ слабо снижает смачиваемость кремнезема, поэтому подходит для обратной флотации. В этом случае необходимо минимальное снижение смачивания извлекаемых минералов, т.е. предпочтительнее полимолекулярная адсорбция жирнокислотного собирателя на их поверхности. Поэтому на практике выделение кремнеземсодержащего концентрата методом обратной флотации осуществляют с большим расходом реагента [25]. Композиция МХТМ+ФЛОН также в малой степени снижает смачивание SiO_2, поэтому перспективно ее использование в процессах обратной флотации кремнеземсодержащих компонентов. Также стоит отметить, что достижение сопоставимых углов смачивания растворами, содержащими собиратель МХТМ (кривая *4* на рис. 3, *б*) и композицию МХТМ+ФЛОН (кривая *2* на рис. 3, *в*), происходит при меньшей концентрации последнего реагента.

Несмотря на то, что МХТМ теоретически обладает способностью к образованию хелатных комплексов с Са-содержащими соединениями, для прямой флотации кремнеземсодержащих компонентов данный реагент не подходит, поскольку, как уже отмечалось, слабо увеличивает угол смачивания кварца. Поэтому исследовано влияние другого



1 – без ПАВ; 2 – 100 мг/л; 3 – 200 мг/л; 4 – 400 мг/л; 5 – 600 мг/л

Рис. 4. Кинетические изотермы смачивания гематита жидкостью, содержащей ФЛОН (а), ТЭА-ЖК (б), ТЭА-ЖК+ФЛОН (в)

Fig. 4. Kinetics isotherms wetting angles hematite water solution Flon (a), TEA-FA (b), TEA-FA+Flon (v)

хелатирующего агента на смачивание кварца: триэтаноламиновых солей жирных кислот (ТЭА-ЖК). Присутствие в растворе ТЭА-ЖК, независимо от концентрации (100 — 600 мг/л), способствует увеличению угла смачивания до 60 — 70° (изотермы в статье не приведены). Композиция ТЭА-ЖК+ФЛОН также способствует ухудшению смачивания кварца (см. рис. 3, *г*). Наибольший эффект достигается при концентрации ТЭА-ЖК+ФЛОН 100 — 200 мг/л. Комплексный собиратель ТЭА-ЖК+ФЛОН в большей степени снижает смачивание кварца по сравнению с исходным ФЛОН.

Для проверки действия реагентов на другие компоненты водно-минеральных дисперсий построены кинетические изотермы смачивания гематита (рис. 4). Анализ представленных данных показал, что ФЛОН увеличивает смачивание гематита (см. рис. 4, *а*), что, вероятно, связано с определенной ориентацией молекул на поверхности минерала: гидрофобный хвост направлен к поверхности, а лиофильная группа $-NH_3^+$ — в раствор. Реагент ТЭА-ЖК в малых концентрациях (100 — 200 мг/л) практически не влияет на смачивание гематита (см. рис. 4, *б*), что свидетельствует о слабой адсорбционной способности молекул к исследуемой поверхности. Изотермы смачивания водно-минеральных систем, содержащих композицию ТЭА-ЖК+ФЛОН (см. рис. 4, *в*), практически не отличаются по характеру от изотерм для исходного ФЛОН (см. рис. 4, *а*). Таким образом, перспективно применение композиции ТЭА-ЖК+ФЛОН для прямой флотации кварца: амины будут гидрофилизировать Fe_2O_3 и одновременно с ТЭА-ЖК гидрофобизировать кварц.

Результаты флотационных тестов собирателей и их смесей (табл. 3), проведенных в лабораторных условиях, согласуются с данными, полученными по кинетическим изотермам смачивания. При использовании композиции ТЭА-ЖК+ФЛОН для флотации гематитовых кварцитов содержание общего диоксида кремния в камерном продукте снижается до 24,9%, что меньше, чем при отдельном использовании ФЛОН (26,3%) или ТЭА-ЖК (44%). Слабое извлечение SiO_2 реагентом ТЭА-ЖК (51,7%) связано с малым выходом пенного продукта (48,3%) и низким показателем минерализации пены (26,9%). Несмотря на то, что выход пенного продукта при использовании смеси ТЭА-ЖК+ФЛОН (47,7%) ниже, чем при ис-

Таблица 3

Результаты флотационных тестов, %
Flotation test results, %

Собиратель	Расход собирателя, г/т	Технологические параметры				
		$\gamma_ц$, %	$\beta_к$, %	$\beta_п$, %	ε, %	*M*, %
Гематитовые кварциты						
ФЛОН	250	48,3	26,3	95,4	77,2	30,7
ТЭА-ЖК	250	34,5	44,0	89,4	51,7	26,9
ТЭА-ЖК+ФЛОН	250	47,7	24,9	96,7	77,3	29,1
Борогипс						
ФЛОН	100	42,6	39,5	31,6	48,1	30,3
МХТМ	1500	17,1	60,4	29,7	29,5	26,0
МХТМ+ФЛОН	500	24,1	61,8	26,5	42,6	23,1

Таблица 4

Минеральный состав пенных продуктов флотации гематитовых кварцитов разными собирателями
The mineral composition of foam products of flotation of hematite quartzites by different collectors

Минерал	Теоретическая формула	Содержание, %		
		ФЛОН	ТЭА-ЖК	ТЭА-ЖК + ФЛОН
Кварц	SiO_2	55,9	49,6	69,4
Гематит	Fe_2O_3	6,7	7,3	3,5
Магнетит	Fe_3O_4	0,8	0,9	2,8
Железосодержащие силикаты	Fe_3Si $K(MgFe)_3Si_3[AlO_{10}][OH,F]_2$	14,8	16,1	10,7
Карбонаты	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	2,7	4,5	6,4
Железосодержащие фосфаты	$Fe_3(PO_4)_2$	17,3	20,4	1,5
Прочее		1,8	1,2	5,7

пользовании ФЛОН (48,3%), ее применение позволяет достичь большего извлечения кремнеземсодержащего компонента. Композиционный собиратель ТЭА-ЖК+ФЛОН выносит в пену большее количество кварца и карбонатов, но меньшее количество железосодержащих силикатов и фосфатов (табл. 4). Следовательно, в камерном продукте при флотации композицией ТЭА-ЖК+ФЛОН будет более высокое содержание железосодержащего компонента, чем при применении ФЛОН в отдельности.

В ходе проведения исследований по флотационному разделению борогипса и кремнезема (см. табл. 3) установлено, что использование только катионного реагента ФЛОН не позволяет получать качественные концентраты. Близкие значения содержания SiO_2 в камерном

Таблица 5

Минеральный состав камерных продуктов флотации борогипса разными собирателями
The mineral composition of the chamber products of borogypsum flotation by different collectors

Минерал	Теоретическая формула	Содержание, %		
		ФЛОН	МХТМ	МХТМ+ФЛОН
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	35,2	16,1	14,9
Ангидрит	$CaSO_4$	14,1	2,5	2,2
Волластонит	$CaSiO_3$	4,5	16,7	14,6
Кварц	SiO_2	4,6	8,9	7,8
Андрадит	$Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$	13,7	8,4	5,3
Гранат	$Ca_3Al_2Si_2O_8(HO)_4$	2,8	4,2	3,1
Кальцит	$CaCO_3$	1,1	1,3	1,2
Аморфный диоксид кремния	SiO_2	24,0	41,9	50,9

(39,5%) и пенном (31,6) продуктах, а также высокий показатель минерализации пены (*М* = 30,3%) уже при низком расходе (100 г/т) свидетельствуют о низкой селективности катионного реагента. По-видимому, молекулы ФЛОН активно сорбируются как на поверхности диоксида кремния, так и на поверхности гипса, что приводит к практически равномерному распределению компонентов между камерным и пенным продуктами. Для получения концентрата с содержанием SiO_2 ~60% и извлечением 29,5% собирателем на основе МХТМ необходим его высокий расход, 1500 г/т. Использование композиции МХТМ+ФЛОН уже при расходе 500 г/т позволяет получать концентрат с содержанием общего SiO_2 61,8%, выходом 24,1% и извлечением 42,6%. Анализ минеральных составов камерных продуктов флотации (табл. 5) показал, что при флотации композицией МХТМ+ФЛОН в концентрате остается меньшее количество кальцийсодержащих компонентов (гипса, ангидрита, волластонита, гранат и др.), кристаллического кварца, но большее количество аморфного диоксида кремния, по сравнению с исходным собирателем МХТМ.

Таким образом, использование в качестве собирателя композиции МХТМ+ +ФЛОН при флотационном разделении кремнезема и борогипса позволяет при меньшем расходе, по сравнению с применением только МХТМ, значительно увеличить выход кремниевого концентрата, содержание аморфного SiO_2 в концентрате, извлечение диоксида кремния. Качество полученного концентрата удовлетворяет требованиям для дальнейшей переработки в «белую сажу».

Заключение

Проведенные исследования показали, что модификация собирателей путем создания композиций ПАВ улучшает флотацию кремнеземсодержащих компонентов. Состав композиций подбирали на основе данных о соотношении адсорбционных центров неоднородной поверхности извлекаемой части питания флотации. При выборе компонентов собирательной смеси важно учесть теоретическую возможность адсорбции каждого реагента на исследуемых минеральных поверхностях в конкретных условиях (pH среды водно-минеральной дисперсии). Показано, что оценка смачивания является информативным экспресс-методом проверки действия реагентов и их смесей на минеральные компоненты.

Результаты флотационных исследований показали, что для прямой флотации кварца в гематитовых кварцитах наиболее эффективным является собиратель на основе композиции ТЭА-ЖК и ФЛОН, по сравнению с их отдельным применением. Комплексный собиратель обеспечивает снижение содержания общего SiO_2 в камерном продукте до 24,9% (против 26,3% для ФЛОН и 44% для ТЭА-ЖК), а также повышение извлечения кварца (77,3%) при сокращении выноса железосодержащих силикатов и фосфатов в пену. Кроме того, использование композиции ТЭА-ЖК+ФЛОН влияет на селективность флотации за счет гидрофобизирущего действия молекул ТЭА-ЖК и ФЛОН на кварц и гидрофилизирующего действия ФЛОН на гематит.

Для обратной флотации кремнеземсодержащих компонентов из борогипса наиболее эффективным является собиратель на основе композиции МХТМ и ФЛОН, по сравнению с их отдельным применением. Комплексный собиратель позволяет увеличить содержание общего SiO_2 в концентрате до 61,8% (против 60,4% для МХТМ) при снижении расхода реагента в 3 раза (500 г/т против 1500 г/т для МХТМ), повысить извлече-

ние кремнезема до 42,6% (против 29,5% для МХТМ) и выход концентрата до 24,1%, а также уменьшить содержание кальцийсодержащих минералов (гипс, ангидрит) и кристаллического кварца в концентрате при сохранении высокого содержания аморфного диоксида кремния (50,9%).

Разработанные реагентные смеси и методика определения в них соотношения компонентов решают проблему селективного разделения руд с переменным составом. В дальнейшем будут продолжены исследования по апробации методики определения оптимального соотношения ПАВ для руд сложного минерального состава.

Автор выражает признательность за помощь коллегам и людям, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортников Н. С.*, *Волков А. В.*, *Галямов А. Л.*, *Викентьев И. В.*, *Лаломов А. В.*, *Мурашов К. Ю.* Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России // Геология рудных месторождений. — 2022. — Т. 64. — № 6. — С. 617—633. DOI: 10.31857/S0016777022060028.

2. *Шаповалов Н. А.*, *Крайний А. А.*, *Городов А. И.*, *Макущенко И. С.* Изучение влияния различных видов собирателей и депрессоров на флотацию железосодержащих минералов Михайловского месторождения // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9-2. — С. 318—323.

3. *Khatkova A., Nikitina L., Pateyuk S.* Use of borogypsum as secondary raw / 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, 2019, pp. 90—93. DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0_20.

4. *Fang J., Ge Y., Chen Z., Xing B., Bao S., Yong Q., Chi R., Yang S., Ni. B. J.* Flotation purification of waste high-silica phosphogypsum // Journal of Environmental Management. 2022, vol. 320, article 115824. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115824.

5. *Семьянова Д. В.* Реагенты-собиратели во флотационном процессе // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2024. — Т. 11. — № 1. — С. 30—36. DOI: 10.15372/FPVGN2024110105.

6. *Городов А. И.*, *Шаповалов Н. А.* Коллоидно-химическое воздействие смеси анионных и катионных поверхностно-активных веществ на минеральные частицы // Научно-технический вестник Поволжья. — 2018. — № 10. — С. 31—34.

7. *Морозов В. В.*, *Бармин И. С.*, *Туголуков А. В.*, *Поливанская В. В.* Повышение эффективности флотации апатитсодержащих руд и складированных хвостов на основе регулирования агрегативной устойчивости шламов // Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 56—61. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.12.

8. *Крайний А. А.* Флотация отвальных хвостов мокрой магнитной сепарации неокисленных железистых кварцитов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2013. — № 5. — С. 156—159.

9. *Митрофанова Г. В.*, *Поспелова Ю. П.*, *Сединин Д. Ф.* Оценка обогатимости тонкозернистых хвостов переработки магнетит-апатитовой руды Ковдорского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 5. — С. 123—131. DOI: 10.15372/FTPRPI20230513.

10. *Уразова Ю. В.*, *Тиунов М. Ю.*, *Федотов Е. Н.*, *Чикин А. Ю.* Изучение механизма взаимодействия жирнокислотных собирателей с поверхностью кальцийсодержащих вольфрамовых минералов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2024. — № 1. — С. 74—83. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-74-83.

11. *Городов А. И.*, *Шаповалов Н. А.*, *Полуэктова В. А.*, *Могутова А. А.* Исследование сорбционных свойств композиционного собирателя на поверхности различных минералов // Вестник Технологического университета. — 2021. — Т. 24. — № 11. — С. 19—24.

12. *Зо Т. Х.*, *Колесников В. А.*, *Конькова Т. В.*, *Хейн Т. А.*, *Колесников А. В.* Извлечение гидроксида алюминия из водных хлоридных растворов в присутствии солей жесткости и по-

верхностно-активных веществ различной природы // Журнал прикладной химии. — 2021. — Т. 94. — № 9. — С. 1138—1144. DOI: 10.31857/S0044461821090036.

13. *Vidyadhar A., Rao K. H.* Adsorption mechanism of mixed cationic/anionic collectors in feldspar-quartz flotation system // Journal of Colloid and Interface Science. 2007, vol. 306, no. 2, pp. 195—204. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.10.047.

14. *He Y.-H., Sun Q., Xing H., Wu Y., Xiao J.-X.* Cationic — anionic fluorinated surfactant mixtures based on short fluorocarbon chains as potential aqueous film-forming foam // Journal of Dispersion Science and Technology. 2018, vol. 40, no. 3, pp. 1—13. DOI: 10.1080/01932691.2018.1468262.

15. *Zhang R., Xing Y., Xia Y., Guo F., Ding S., Tan J., Che T., Meng F., Gui X.* Synergistic adsorption mechanism of anionic and cationic surfactant mixtures on low-rank coal flotation // ACS Omega. 2020, vol. 5, pp. 20630—20637. DOI: 10.1021/acsomega.0c02948.

16. *Wang Y., Zhu G., Yu F., Lu D., Wang L., Zhao Y., Zheng H.* Improving spodumene flotation using a mixed cationic and anionic collector // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2018, no. 54, no. 2, pp. 567—577. DOI: 10.5277/ppmp1861.

17. *Shojaeimehr T., Schwarze M., Tupinamba Lima M., Schomäcker R.* Correlation of performance data of silica particle flotations and foaming properties of cationic and nonionic surfactants for the development of selection criteria for flotation auxiliaries // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022, vol. 649, article 129159. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129159.

18. *Muhoza E., Zhang W., Hassan Amini S.* Systematic investigation on bastnaesite flotation in the presence of dissolved calcium ions using organic acids as chelating agents // Minerals Engineering. 2024, vol. 218, article 108977. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108977.

19. *Zeng L., Ding K., Zhang X., Zhou Y., Han H.* New insights into the influence of mineral surface transformation on the flotation behavior of anhydrite/apatite // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024, vol. 685, article 133215. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.133215.

20. *Park J., Pasaogullari U., Bonville L.* Wettability measurements of irregular shapes with Wilhelmy plate method // Applied Surface Science. 2018, vol. 427, no. B, pp. 273—280. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.08.186.

21. *Park J., Ulsh M., Mauger S. A.* Solvent absorption rate of perfluorosulphonic acid membranes towards understanding direct coating processes // International Journal of Hydrogen Energy. 2021, vol. 46, no. 59, pp. 30239—30245. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.168.

22. *Součková M., Klomfar J., Pátek J.* Temperature dependence of the surface tension and 0.1 MPa density for 1-Cn-3-methylimidazolium tris(pentafluoroethyl)trifluorophosphate with n = 2, 4, and 6 // The Journal of Chemical Thermodynamics. 2012, vol. 48, pp. 267—275. DOI: 10.1016/j.jct.2011.12.033.

23. *Городов А. И., Шаповалов Н. А.* Исследование смеси анионных и катионных поверхностно-активных веществ в качестве собирателя для флотационного обогащения нефелина // Бутлеровские сообщения. — 2018. — Т. 55. — № 9. — С. 48—57.

24. *Герасименко Т. Е., Рубаева И. О., Максимов Р. Н., Васильев В. В.* Особенности взаимодействия полидисперсных частиц в процессах флотации микродисперсий золота // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 97—113. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-97-113.

25. *Хатькова А. Н., Никитина Л. Г., Патеюк С. А., Черкасов В. Г.* Борогипс: минеральный состав, технологии переработки // Вестник геонаук. — 2020. — № 3(303). — С. 22—27. DOI: 10.19110/geov.2020.3.3. ГИАБ

REFERENCES

1. Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikentiev I. V., Lalomov A. V., Murashov K. Yu. Fundamental problems of development of the mineral resource base of high-tech industry and energy in Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2022, vol. 64, no. 6, pp. 617—633. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0016777022060028.

2. Shapovalov N. A., Krayniy A. A., Gorodov A. I., Makuschenko I. S. Study of the influence of different kinds of collectors and depressant flotation iron-containing minerals Mikhailovsky deposit. *The Fundamental researches*. 2014, no. 9-2, pp. 318—323. [In Russ].

3. Khatkova A., Nikitina L., Pateyuk S. Use of borogypsum as secondary raw. *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, Belgorod, 2019, pp. 90—93. DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0_20.

4. Fang J., Ge Y., Chen Z., Xing B., Bao S., Yong Q., Chi R., Yang S., Ni. B. J. Flotation purification of waste high-silica phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*. 2022, vol. 320, article 115824. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115824.

5. Semyanova D. V. Collecting agents in flotation. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2024, vol. 11, no. 1, pp. 30 — 36. [In Russ]. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN2024110105.

6. Gorodov A. I., Shapovalov N. A. Colloidal chemical effect of a mixture of anionic and cationic surfactants on mineral particles. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2018, no. 10, pp. 31 — 34. [In Russ].

7. Morozov V. V., Barmin I. S., Tugolukov A. V., Polivanskaya V. V. Improvement of flotation efficiency of apatite-bearing ore and old tailings based on adjustment of aggregative stability of slimes. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 56 — 61. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.12.

8. Krayniy A. A. Flotation of dump tails of wet magnetic separation of non-oxidized ferruginous quartzites. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013, no. 5, pp. 156 — 159. [In Russ].

9. Mitrofanova G. V., Pospelova Yu. P., Sedinin D. F. Processibility of fine-grained magnetite-apatite ore mill tailings at kovdor deposit. *Journal of Mining Sciences*. 2023, no. 5, pp. 123 — 131. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230513.

10. Urazova Yu. V., Tiunov M. Yu., Fedotov E. N., Chikin A. Yu. Study of the mechanism of interaction of fatty acid collectors with the surface of calcium-containing tungsten minerals. *Minerals and Mining Engineering*. 2024, no. 1, pp. 74 — 83. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-74-83.

11. Gorodov A. I., Shapovalov N. A., Poluektova V. A., Mogutova A. A. Investigation of sorption properties of a composite collector on a mineral surface. *Herald of technological university*. 2021, vol. 24, no. 11, pp. 19 — 24. [In Russ].

12. Zo T. H., Kolesnikov V. A., Kon'kova T. V., Hein T. A., Kolesnikov A. V. Extraction of aluminum hydroxide from aqueous chloride solutions in the presence of hardness salts and surfactants of various nature. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021, vol. 94, no. 9, pp. 1138 — 1144. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0044461821090036.

13. Vidyadhar A., Rao K. H. Adsorption mechanism of mixed cationic/anionic collectors in feldspar-quartz flotation system. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2007, vol. 306, no. 2, pp. 195 — 204. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.10.047.

14. He Y.-H., Sun Q., Xing H., Wu Y., Xiao J.-X. Cationic — anionic fluorinated surfactant mixtures based on short fluorocarbon chains as potential aqueous film-forming foam. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2018, vol. 40, no. 3, pp. 1 — 13. DOI: 10.1080/01932691.2018.1468262.

15. Zhang R., Xing Y., Xia Y., Guo F., Ding S., Tan J., Che T., Meng F., Gui X. Synergistic adsorption mechanism of anionic and cationic surfactant mixtures on low-rank coal flotation. *ACS Omega*. 2020, vol. 5, pp. 20630 — 20637. DOI: 10.1021/acsomega.0c02948.

16. Wang Y., Zhu G., Yu F., Lu D., Wang L., Zhao Y., Zheng H. Improving spodumene flotation using a mixed cationic and anionic collector. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2018, no. 54, no. 2, pp. 567 — 577. DOI: 10.5277/ppmp1861.

17. Shojaeimehr T., Schwarze M., Tupinamba Lima M., Schomäcker R. Correlation of performance data of silica particle flotations and foaming properties of cationic and nonionic surfactants for the development of selection criteria for flotation auxiliaries. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022, vol. 649, article 129159. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129159.

18. Muhoza E., Zhang W., Hassan Amini S. Systematic investigation on bastnaesite flotation in the presence of dissolved calcium ions using organic acids as chelating agents. *Minerals Engineering*. 2024, vol. 218, article 108977. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108977.

19. Zeng L., Ding K., Zhang X., Zhou Y., Han H. New insights into the influence of mineral surface transformation on the flotation behavior of anhydrite/apatite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024, vol. 685, article 133215. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.133215.

20. Park J., Pasaogullari U., Bonville L. Wettability measurements of irregular shapes with Wilhelmy plate method. *Applied Surface Science*. 2018, vol. 427, no. B, pp. 273 — 280. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.08.186.

21. Park J., Ulsh M., Mauger S. A. Solvent absorption rate of perfluorosulphonic acid membranes towards understanding direct coating processes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, vol. 46, no. 59, pp. 30239 — 30245. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.168.

22. Součková M., Klomfar J., Pátek J. Temperature dependence of the surface tension and 0.1 MPa density for 1-Cn-3-methylimidazolium tris(pentafluoroethyl)trifluorophosphate with n = 2, 4, and 6. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2012, vol. 48, pp. 267 — 275. DOI: 10.1016/j.jct.2011.12.033.

23. Gorodov A. I., Shapovalov N. A. Study of a composition of anionic and cationic surfactants as a collector for flotation separation of nepheline. *Butlerov Communications*. 2018, vol. 55, no. 9, pp. 48 – 57. [In Russ].

24. Gerasimenko T. E., Rubayeva I. O., Maksimov R. N., Vasiliev V. V. Peculiarities of poly disperse particle interaction in gold micro dispersions flotation processes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 97 – 113. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-97-113.

25. Khat'kova A. N., Nikitina L. G., Pateyuk S. A., Cherkasov V. G. Borogypsum: mineral composition, processing technology. *Vestnik of Geosciences*. 2020, no. 3(303), pp. 22 – 27. [In Russ]. DOI: 10.19110/geov.2020.3.3.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Городов Андрей Иванович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: gorodov-andreyy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5530-3282,
Павленко Вячеслав Иванович[1] — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: belpavlenko@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3464-1880,
Ястребинский Роман Николаевич[1] — д-р техн. наук, директор
химико-технологического института, e-mail: yrndo@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6413-0002,
Городов Сергей Иванович[1] — аспирант,
e-mail: serg5254325@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2570-7195,
Шаповалов Николай Афанасьевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: shap.bstu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4624-3385,
[1] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Для контактов: Городов А.И., e-mail: gorodov-andreyy@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.I. Gorodov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: gorodov-andreyy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5530-3282,
V.I. Pavlenko[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: belpavlenko@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3464-1880,
R.N. Yastrebinsky[1], Dr. Sci. (Eng.),
Director of the Institute of Chemical Technology,
e-mail: yrndo@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6413-0002,
S.I. Gorodov[1], Graduate Student,
e-mail: serg5254325@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2570-7195,
N.A. Shapovalov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: shap.bstu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4624-3385,
[1] Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov,
308012, Belgorod, Russia.
Corresponding author: A.I. Gorodov, e-mail: gorodov-andreyy@mail.ru.

Получена редакцией 01.08.2025; получена после рецензии 22.12.2025; принята к печати 10.03.2026.
Received by the editors 01.08.2025; received after the review 22.12.2025; accepted for printing 10.03.2026.