

УДК 622.765.061

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАГЕНТОВ-СОБИРАТЕЛЕЙ Tescflote  
ПРИ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД**

**Е. В. Черноусенко, Ю. С. Каменева**

*Горный институт Кольского научного центра РАН,  
E-mail: atletik-2010@yandex.ru, Dgeremi@mail.ru,  
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Изучены неионогенные органические реагенты Tescflote в качестве возможных собирателей для флотации сульфидных медно-никелевых руд. Исследована собирательная способность четырех реагентов Tescflote, отличающихся структурой алкильных радикалов и числом функциональных групп. Методом беспенной флотации на пробах руды, обогащенных халькопиритом и пентландит-пирротин, проведена оценка эффективности действия реагентов по отношению к медь- и никельсодержащим минералам. Показана специфичность их действия к исследуемым минералам, причем большая активность реагентов Tescflote по сравнению с сульфгидрильными собирателями проявляется по отношению к никельсодержащим минералам. Флотационными исследованиями показано, что использование реагентов Tescflote в качестве добавки к традиционному реагентному режиму позволяет повысить эффективность обогащения. Частичная замена ксантогената способствует увеличению извлечения меди и никеля в пенный продукт при снижении содержания никеля в хвостах флотации.

*Медно-никелевые руды, халькопирит, пентландит, пирротин, флотация, сульфгидрильные собиратели, комплексообразующие реагенты, реагенты Tescflote*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210614

Одно из направлений повышения эффективности флотационного обогащения руд — поиск и разработка новых эффективных реагентов и реагентных режимов. Особенно актуальным это становится в условиях истощения балансовых запасов и вовлечения в переработку бедных и труднообогатимых руд, характеризующихся низким содержанием и тонкой вкрапленностью ценных минералов [1]. При переработке такого минерального сырья традиционно используемые технологические схемы и реагентные режимы не обеспечивают получение необходимых показателей обогащения [2]. При флотационном обогащении сульфидных медно-никелевых руд наибольшее распространение получили сульфгидрильные собиратели — ксантогенаты и дитиофосфаты, взаимодействующие с поверхностью минералов через тиольный атом серы [3].

Перспективное направление — использование для флотации сульфидных руд комплексообразующих реагентов, склонных к образованию хелатных соединений с ионами переходных металлов. В качестве донорных атомов в хелатирующих реагентах в основном выступают ато-

мы азота, кислорода и серы. С ионами никеля, меди и кобальта, входящими в кристаллическую решетку сульфидных минералов медно-никелевых руд, более прочные связи образуют реагенты, имеющие в своей структуре атомы серы и азота [4].

В настоящее время синтезировано и изучено значительное количество комплексообразующих соединений. В качестве собирателей для флотации сульфидных минералов исследованы производные меркаптобензотиазола, тиомочевины, гидроксихинолина и имидазолина [5–7]. Ряд публикаций посвящен изучению взаимодействия тионокарбаматов и их производных с минералами сульфидных руд [8–11]. Синтезировано и исследовано поверхностно-активное вещество гидроксиэтилдибутилдитиокарбамат, содержащее тионные и гидроксидные группы. В [12, 13] выявлено, что реагент повышает селективность флотации халькопирита и галенита, адсорбируясь на поверхностях минералов за счет образования связей с атомами кислорода и серы.

В качестве перспективных собирателей сульфидных и смешанных руд цветных металлов рассмотрены гидроксамовые коллекторы как самостоятельные собиратели, так и совместно с ксантогенатом [14–16]. Показана эффективность использования для флотации медно-никелевых руд гидразидов 2-этилгексановой и *n*-пентановой кислот [17, 18]. Предполагается, что наличие в молекуле гидразидов разветвленных алкильных радикалов усиливает гидрофобизацию поверхности минералов. Предложены новые комплексообразующие бифункциональные реагенты — азотсодержащие производные алкенилянтарной кислоты. Наличие второй функциональной группировки кислотного характера обеспечивает дополнительное взаимодействие с неоднородной поверхностью минерала и увеличивает эффективность флотации [19]. Применение реагента дитиопириметана в сочетании с бутиловым ксантогенатом в процессе флотационного обогащения золотомышьяковой руды способствует улучшению качества концентрата по золоту при одновременном повышении извлечения [20].

В 2018 г. фирмой “Nouryon” разработан новый класс собирателей с нитрильной группировкой Tecflote [21]. Это неионогенные соединения, нерастворимые в воде, что принципиально отличает их от известных сульфгидрильных собирателей. Именно нерастворимость в воде — основа для объяснения механизма закрепления этих собирателей на поверхности минералов. На примере реагентов S10 и S11 (рис. 1) изучен механизм их действия на поверхности халькопирита [21–23].

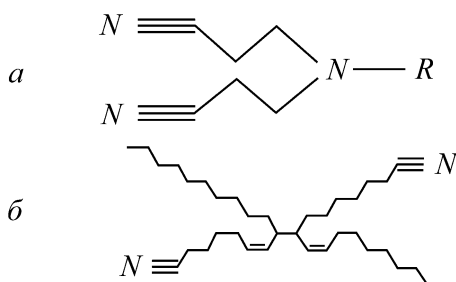


Рис. 1. Структурные формулы реагентов: *a* — Tecflote S10; *б* — Tecflote S11

Методом вторично-ионной масс-спектропии показано, что собиратель селективно закрепляется на поверхности медьсодержащих минералов и обеспечивает им необходимую гидрофобность. Сигналы ионов, полученных после ионизирующего воздействия на халькопирит из флотационного концентрата и соответствующих строению собирателя, значительно превышали по интенсивности аналогичные сигналы для хвостов [22]. На рис. 2 показан фрагмент ToF-SIMS спектра, отвечающий иону CN<sup>-</sup>. Интенсивность сигнала выражена как величина, приведенная к сумме сигналов всех десорбированных ионов, в том числе и “выбитых” из ре-

шетки самого минерала. Наличие сигнала иона  $\text{CN}^-$  в спектре концентрата свидетельствует о том, что взаимодействие с поверхностью идет за счет нитрильной функциональной группировки, способной образовывать комплексные соединения с ионами переходных металлов за счет  $\pi$ - и  $d$ -орбиталей [23]. На рис. 2 приведен фрагмент полученного при анализе халькопирита из концентрата и хвостов при флотации с реагентом Tecflote S10.

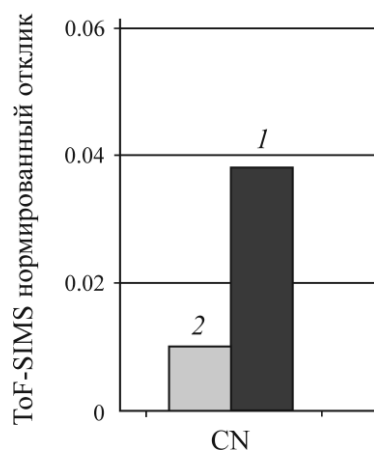


Рис. 2. Сигналы иона  $\text{CN}^-$ , полученные при ToF-SIMS анализе халькопирита, отобранного из концентрата (1) и хвостов (2) при флотации медной руды (Австралия) реагентом S10 [22]

Поскольку реагенты Tecflote нерастворимы в воде, невозможно их взаимодействие с минералом в растворе, как при использовании сульфгидрильных собирателей. Согласно [21, 22], в данном случае гидрофобизация минеральной частицы происходит после ее взаимодействия с пузырьком воздуха, по поверхности которого предварительно распределился собиратель. Процесс слияния и разрушения воздушных пузырьков позволяет быстро распределяться реагенту по поверхности раздела “воздух – вода”, обеспечивая быструю флотацию.

Результаты опробования собирателей Tecflote продемонстрировали эффективность их действия при флотации медьсодержащих руд и высокую селективность по отношению к халькопириту. Установлено, что реагенты Tecflote могут заменять или дополнять тиольные коллекторы, используемые для флотации сульфидных медьсодержащих руд, с повышением показателей обогащения [22, 23]. Представляло интерес оценить реагенты Tecflote в качестве возможных собирателей для флотации сульфидных медно-никелевых руд.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследована собирательная способность реагентов Tecflote S10, S11, S12, S13, отличающихся друг от друга структурой алкильных радикалов и количеством нитрильных групп (реагенты предоставлены фирмой “Nouyoon”). Оценка эффективности взаимодействия реагентов с минеральной поверхностью сульфидных минералов проводилась методом беспенной флотации в трубке Халимонда на образцах обогащенной пентландитом и пирротинном (МН-1) и халькопиритом (МН-2) медно-никелевой руды крупностью  $-0.09 + 0.063$  мм. Химический состав проб приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика проб

Проба	Содержание, %				Соотношение Cu/Ni
	Cu	Ni	Fe	S	
МН-1	1.40	5.81	52.64	34.62	1/4.15
МН-2	16.95	3.66	41.55	31.52	4.63/1

Навеску руды массой 0.5 г интенсивно перемешивали с регулятором среды рН (0.1 %-м раствором NaOH) 1 мин, затем 2 мин с собирателем; рН флотации выдерживался для всех опытов на уровне 9.5. Время флотации составляло 3 мин, скорость подачи воздуха 5.3 см<sup>3</sup>/мин. Содержание  $\beta$  меди и никеля в продуктах флотации определяли методом атомно-адсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра “Квант-2А”, извлечение  $\varepsilon$  меди и никеля в пенный и камерный продукты рассчитывали по формуле

$$\varepsilon = \frac{\gamma\beta}{\alpha},$$

где  $\gamma$  — выход пенного или камерного продукта, %;  $\alpha$  — содержание меди или никеля в исследуемой пробе руды, %.

Реагенты Tecflote не растворяются и не эмульгируются в воде, поэтому их подача в суспензию руды весьма затруднительна. Добавление с помощью шприца даже минимальной капли расплавленного или размягченного в результате нагрева реагента обеспечивает необоснованно высокую для микрофлотации концентрацию собирателя [21]. Эксперименты по микрофлотации проводили на образце Tecflote S12, который удалось перевести в водорастворимое состояние с помощью 1 %-й уксусной кислоты. Действие реагента Tecflote S12 оценивали в сравнении с традиционными сульфгидрильными собирателями — бутиловым ксантогенатом калия (Кх) и дибутилдитиофосфатом натрия (аэрофлот Аф).

Для флотационных исследований использовали пробу тонковкрапленной труднообогатимой медно-никелевой руды Печенгского рудного поля с содержанием Ni = 0.5 % и Cu = 0.21 %, основными рудными минералами которой являются пирротин, пентландит, халькопирит и магнетит (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Минеральный состав руды по результатам РФА, %

Минерал	Содержание	Минерал	Содержание
Пирротин	2.6	Полевые шпаты	7.6
Пентландит	1.4	Слюды всего	4.6
Халькопирит	0.5	Клинохлор	10.5
Пирит	0.6	Тальк	7.4
Магнетит	1.4	Монтмориллонит	2.0
Ильменит	0.8	Карбонат кальциево-магниевый	1.1
Пироксены	4.7	Кварц	1.1
Серпентины	33.4	Эпидот	1.3
Амфиболы	19.0	Сумма	100.0

Дробление руды осуществляли в лабораторных щековой и валковой дробилках до крупности –2.0 мм стадийно, с отсевом готового продукта после каждой стадии. Для измельчения использовали шаровую мельницу объемом 7 л. Масса измельчаемой навески составляла 1.2 кг, соотношение жидкого к твердому 1 : 0.6. Флотационные опыты включали основную и контрольную флотацию в щелочной среде с получением хвостов и черного концентрата. Время основной флотации 10 мин, контрольной — 15 мин. Опыты проводили в открытом цикле на водопроводной воде. Необходимый рН среды создавали добавлением кальцинированной соды Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Для активации сульфидных минералов использовали медный купорос CuSO<sub>4</sub>. Ис-

следуемые реагенты сравнивали с традиционным реагентным режимом, предусматривающим применение в качестве собирателей Kx и Af. Во всех опытах расход соды и медного купороса оставался неизменным — 3 кг/т и 30 г/т руды соответственно.

Оптимальная крупность питания флотации, в соответствии с проведенными ранее исследованиями, составила 97 % класс  $-0.071$  мм [2]. Продукты обогащения анализировали на содержание меди и никеля. Результаты анализа использовали для расчета извлечения полезного компонента.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось, для реагентов Tecflote S10 и S11 показано предпочтительное закрепление их на халькопирите, по сравнению с породным минералом пиритом. Более высокое извлечение халькопирита в пенный продукт флотации по сравнению с пиритом свидетельствует о большей гидрофобизации этого минерала при взаимодействии с собирателем. Сравнительная оценка гидрофобизации медь- и никельсодержащих минералов при взаимодействии с реагентами Tecflote S12, ксантогенатом и аэрофлотом, проведенная методом беспенной флотации, представлена на рис. 3 в виде зависимостей извлечения никеля и меди от расхода реагента.

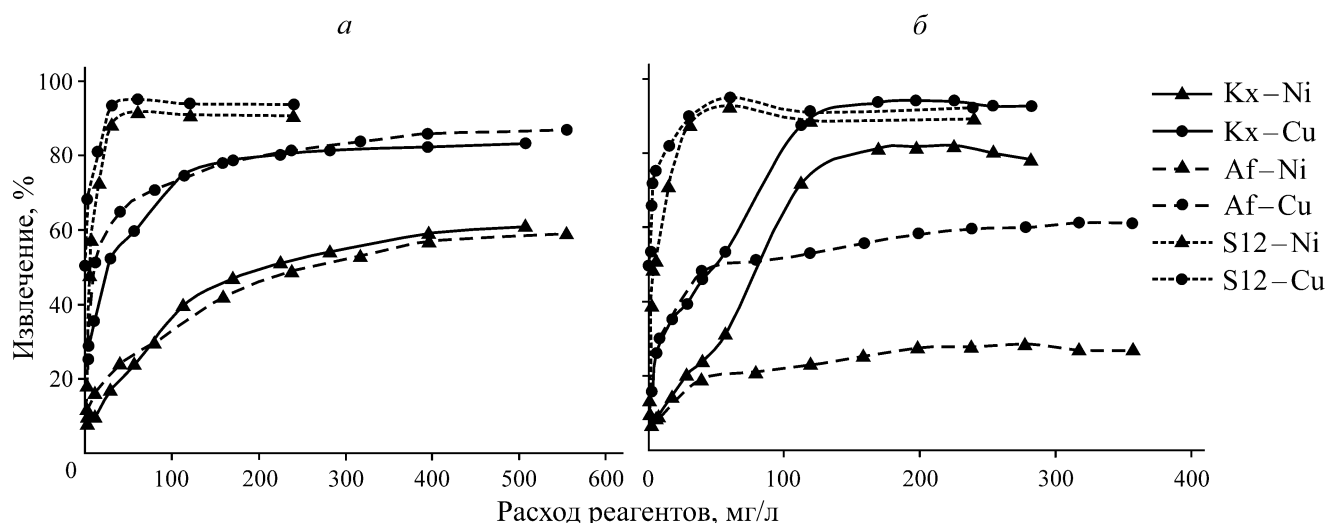


Рис. 3. Зависимость извлечения никеля и меди в пенный продукт флотации от расхода реагентов: а — проба МН-1; б — проба МН-2

Углеводородный радикал в бутиловом ксантогенате ( $C_4$ ) и бутиловом аэрофлоте (два радикала длиной  $C_4$ ) значительно короче, чем в реагенте Tecflote. Закономерно, что при микрофлотации в трубке Халимонда, когда результат определяется степенью гидрофобизации, более высокие показатели получены с исследуемым нитрильным реагентом. Максимальное извлечение цветных металлов в пенный продукт при использовании сульфгидрильных реагентов достигается при концентрации реагентов 400–500 мг/л для пробы МН-1 и 200–300 мг/л для МН-2. При использовании реагента S12 извлечение никеля и меди в пенный продукт уже при концентрации 50–60 мг/л составляет более 90 %.

Целесообразно рассматривать относительное расположение кривых извлечения меди и никеля для каждого из реагентов. Надо помнить, что халькопирит характеризуется большей собственной гидрофобностью по сравнению с никелевыми минералами. Видно, что ксантогенат

и аэрофлот проявляют большую активность по отношению к халькопириту. Для руды, обогащенной никельсодержащими минералами МН-1, разница в извлечении меди и никеля при использовании ксантогената и аэрофлота составляет  $\Delta\varepsilon = 30 - 40\%$  в диапазоне концентраций, обеспечивающих удовлетворительный выход пенного продукта. Для реагента Tecflote S12 извлечения меди и никеля в пенный продукт близки ( $\Delta\varepsilon \approx 5\%$ ).

Для руды, обогащенной халькопиритом МН-2, эти значения составили: для ксантогената  $\Delta\varepsilon \approx 15 - 20\%$ , для аэрофлота  $\Delta\varepsilon \approx 30\%$  и для Tecflote S12  $\Delta\varepsilon \approx 3 - 5\%$ . Это свидетельствует о том, что взаимодействие нитрильного собирателя Tecflote S12 идет практически в равной степени с медь- и с никельсодержащими минералами, в отличие от сульфгидрильных реагентов.

Результаты исследования кинетики основной флотации медно-никелевой руды в лабораторной флотомашине подтверждают это предположение. Фракционный съем пенного продукта проводили через определенные интервалы времени: 30, 30, 60, 120, 180, 180 с. В табл. 3 приведены интегральные значения извлечения меди и никеля в пенный продукт основной флотации в зависимости от времени съема продукта, полученные при флотации медно-никелевой руды с использованием бутилового ксантогената Кх и Tecflote S12 при расходе 130 г/т руды для каждого собирателя и 60 г/т аэрофлота. Оценка разницы в извлечении меди и никеля  $\Delta\varepsilon$  (Cu–Ni) для обоих реагентов показывает, что при равных расходах реагентов и прочих условиях флотации (рН среды, расход вспенивателя, температура пульпы) активность нитрильного реагента к никельсодержащим минералам более выражена, чем к халькопириту. Подобная специфичность действия Tecflote обусловлена способностью нитрильных группировок эффективно образовывать комплексы с никелем.

ТАБЛИЦА 3. Результаты исследования кинетики основной флотации медно-никелевой руды

Время флотации, с	Суммарное извлечение Ni, %		Суммарное извлечение Cu, %		$\Delta\varepsilon$ (Cu–Ni)	
	Кх	S12	Кх	S12	Кх	S12
30	24.72	25.36	39.19	34.28	14.47	8.92
60	38.61	36.22	52.99	45.19	14.38	8.97
120	51.51	49.66	63.97	56.85	12.46	7.19
240	63.03	62.00	72.48	66.80	9.45	4.80
420	70.00	70.24	77.99	74.02	7.99	3.78
600	73.71	74.09	80.87	77.51	7.16	3.42

Халькопирит характеризуется большей флотационной активностью по сравнению с пентландитом и пирротинном и на первой минуте флотируется в большей степени (рис. 4). Отметим, что флотация халькопирита с нитрильным реагентом развивается медленнее, чем с ксантогенатом. Это обусловлено механизмом действия данного собирателя. По мере развития процесса активность Tecflote возрастает по сравнению с ксантогенатом, причем и флотация никельсодержащих минералов идет активнее.

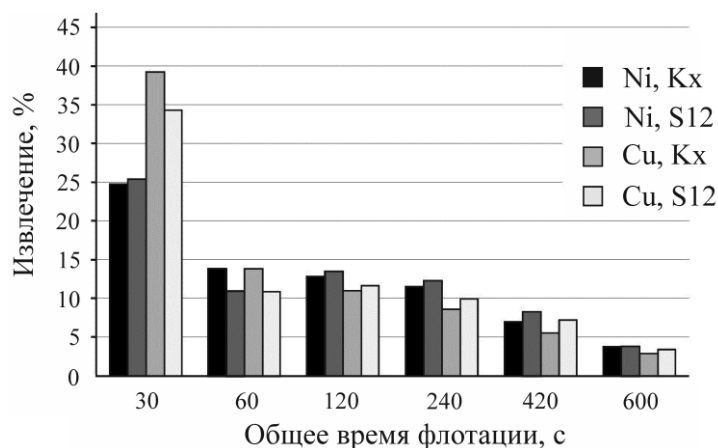


Рис. 4. Дифференциальные величины извлечения меди и никеля

Для нерастворимых в воде реагентов Tecflote S10 и S11 предложен и подтвержден экспериментальными данными механизм действия при флотации, когда реагенты подавались в процесс в натуральном или размягченном виде [21, 22]. С целью определить распространяется ли описанный механизм на реагент Tecflote S12 — единственный, который удалось перевести в раствор, провели сравнительную флотацию медно-никелевой руды реагентами, растворенными в гексане. В этом случае реагент также концентрируется на поверхности “жидкость – воздух”, так как растворитель быстро испаряется, т. е. механизм взаимодействия собирателя с минералом будет тот же, но подача его в пульпу осуществляется значительно проще, что подтверждается близостью результатов, полученных для реагентов Tecflote S10 и S11 при разном способе подачи реагентов (табл. 4). С реагентом Tecflote S12 для сравнения провели флотацию, подавая его в пульпу в виде раствора в гексане, уксусной кислоте и в натуральном виде. Близость результатов, полученных при подаче в виде раствора и в натуральном виде, свидетельствует о том, что и в случае, когда реагент подается в объем пульпы, взаимодействие его с минералом идет после распределения реагента по границе “жидкость – воздух”. Если бы реализовывался механизм взаимодействия собирателя в ионном виде с минералом в объеме раствора, то наблюдалось бы преимущество такого способа подачи.

Для реагента Tecflote S13 выявлены аналогичные закономерности. Результаты флотации этим собирателем при подаче его в пульпу в виде раствора в гексане и в размягченном виде близки, т. е. и для данного реагента реализуется механизм, когда сначала реагент распределяется по поверхности воздушного пузырька, затем к пузырьку прикрепляется минеральная частица.

Такой механизм действия реагентов Tecflote с нитрильной функциональной группировкой объясняет результаты исследования кинетики флотации (рис. 4). Гидрофобизация минералов после взаимодействия с воздушным пузырьком требует больше времени, по сравнению с тем, когда растворенный реагент закрепляется на минерале в объеме пульпы.

Проведено сравнение эффективности действия исследуемых собирателей при флотации труднообогатимой медно-никелевой руды по сравнению с традиционным режимом. Общий расход нитрильных реагентов в основную и контрольную флотации составил ~ 100, ~ 200 и ~ 300 г/т. Ввиду того, что реагенты Tecflote демонстрируют низкое пенообразование в лабораторных условиях, при флотации использовали в качестве вспенивателя метилизобутилкарбинол.

ТАБЛИЦА 4. Результаты флотации медно-никелевой руды при разном способе подачи реагентов

Продукт	Выход	Содержание, %		Извлечение, %		Общий расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Tecflote S10 (в гексане)						
Пенный	49.22	0.832	0.364	81.18	86.73	S10 = 200 Af = 95
Хвосты	50.78	0.187	0.054	18.82	13.27	
Исходный	100.00	0.504	0.206	100.00	100.00	
Tecflote S10 (в натуральном виде)						
Пенный	49.52	0.820	0.344	80.26	85.55	S10 = 200 Af = 95
Хвосты	50.48	0.198	0.057	19.74	14.45	
Исходный	100.00	0.506	0.199	100.00	100.00	
Tecflote S11 (в гексане)						
Пенный	42.90	0.931	0.418	78.99	86.27	S11 = 200 Af = 95
Хвосты	57.10	0.186	0.050	21.01	13.73	
Исходный	100.00	0.506	0.208	100.00	100.00	
Tecflote S11 (в натуральном виде)						
Пенный	47.64	0.835	0.358	79.58	85.78	S11 = 200 Af = 95
Хвосты	52.36	0.195	0.054	20.42	14.22	
Исходный	100.00	0.500	0.199	100.00	100.00	
Tecflote S12 (в гексане)						
Пенный	42.78	0.953	0.403	80.00	84.09	S12 = 200 Af = 95
Хвосты	57.22	0.178	0.057	20.00	15.91	
Исходный	100.00	0.509	0.205	100.00	100.00	
Tecflote S12 (в натуральном виде)						
Пенный	45.33	0.866	0.375	80.14	84.95	S12 = 200 Af = 95
Хвосты	54.57	0.178	0.055	19.86	15.05	
Исходный	100.00	0.500	0.200	100.00	100.00	
Tecflote S12 (в уксусной кислоте)						
Пенный	49.72	0.825	0.356	82.09	86.06	S12 = 200 Af = 95
Хвосты	50.28	0.178	0.057	17.91	13.94	
Исходный	100.00	0.500	0.206	100.00	100.00	
Tecflote S13 (в гексане)						
Пенный	40.34	0.994	0.428	79.06	84.27	S13 = 200 Af = 95
Хвосты	59.66	0.178	0.054	20.94	15.73	
Исходный	100.00	0.507	0.205	100.00	100.00	
Tecflote S13 (в натуральном виде)						
Пенный	39.98	0.989	0.446	78.54	84.14	S13 = 200 Af = 95
Хвосты	60.02	0.180	0.056	21.46	15.86	
Исходный	100.00	0.503	0.212	100.00	100.00	



При увеличении расхода реагентов со 100 до 200 г/т извлечение в пенный продукт флотации возрастает на 3–5 %. Дальнейшее увеличение расхода собирателя до 300 г/т не приводит к заметному изменению показателей флотации. На рис. 5 представлены результаты флотации, полученные при расходе нитрильных собирателей ~ 200 г/т, наиболее близком к расходу бутилового ксантогената в базовом режиме. Расход реагентов в базовом режиме составил: ксантогената — 175, аэрофлота — 95 г/т. Видно, что реагенты Tecflote, как монособиратели, характеризуются меньшей активностью по сравнению с ксантогенатом. Суммарное извлечение никеля и меди в пенный продукт основной и контрольной флотаций при использовании нитрильных собирателей в сочетании с метилизобутилкарбинолом значительно ниже, чем в базовом опыте.

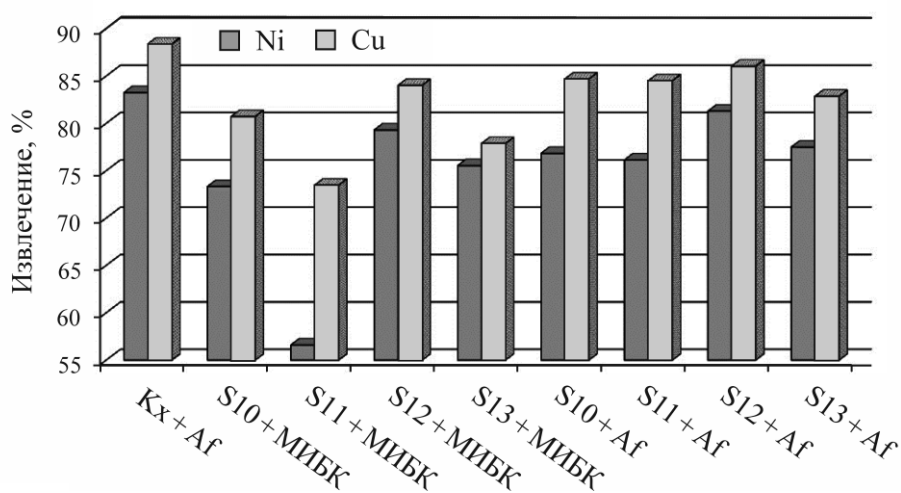


Рис. 5. Извлечение цветных металлов в пенный продукт флотации при использовании разных собирателей (МИБК — метилизобутилкарбинол)

Использование совместно с реагентами Tecflote бутилового аэрофлота Af в качестве пенообразующего компонента, обладающего собственными собирательными свойствами, позволило повысить извлечение цветных металлов, но показатели также не достигли значений, полученных в базовом опыте.

Меньшей собирательной способностью по отношению к сульфидным минералам данного типа руды из нитрильных реагентов характеризуются Tecflote S10 и S11. Более стабильно выглядят реагенты Tecflote S12 и S13. Их применение позволяет получить более высокое извлечение цветных металлов в пенный продукт и более низкое содержание в хвостах при совместном применении Tecflote с метилизобутилкарбинолом и аэрофлотом. Но и в этом случае извлечение Ni и Cu ниже, чем при использовании традиционного режима, а минимальное содержание полезных компонентов в хвостах также не достигло полученного в базовом опыте. Наибольшее извлечение полезных компонентов наблюдалось при использовании Tecflote S12 и аэрофлота, составив 82.09 % Ni и 86.06 % Cu, при содержании в хвостах 0.178 и 0.057 % соответственно.

Результаты показали, что реагенты Tecflote, с одной стороны, являются слабыми по сравнению с ксантогенатом собирателями (рис. 5), с другой — имеют в своей структуре комплексобразующую группировку, определяющую их специфичность по отношению к никелю (рис. 3). Поэтому проведена оценка действия реагентов Tecflote в качестве добавки к традиционному режиму (табл. 5). Реагенты ксантогенат и Tecflote подавались в соотношении 2.9 : 1,

общий расход собирателей соответствовал расходу ксантогената в стандартном режиме. В исследованиях на медьсодержащей руде также отмечен синергизм совместного действия амиллового ксантогената и реагента Tecflote S11 [23].

ТАБЛИЦА 5. Результаты флотации медно-никелевой руды при использовании комбинации собирателей

Продукт	Выход	Содержание, %		Извлечение, %		Общий расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Стандартный режим						
Пенный	47.31	0.885	0.372	83.25	88.38	K <sub>x</sub> = 175 A <sub>f</sub> = 95
Хвосты	52.69	0.160	0.044	16.75	11.62	
Исходный	100.00	0.503	0.199	100.00	100.00	
Tecflote S10						
Пенный	48.12	0.874	0.365	83.78	88.50	K <sub>x</sub> = 130 S10 = 45 A <sub>f</sub> = 95
Хвосты	51.88	0.157	0.044	16.22	11.50	
Исходный	100.00	0.502	0.198	100.00	100.00	
Tecflote S11						
Пенный	45.80	0.921	0.393	83.30	88.54	K <sub>x</sub> = 130 S11 = 45 A <sub>f</sub> = 95
Хвосты	54.20	0.156	0.043	16.70	11.46	
Исходный	100.00	0.506	0.203	100.00	100.00	
Tecflote S12						
Пенный	50.37	0.845	0.356	84.69	89.14	K <sub>x</sub> = 30 S12 = 45 A <sub>f</sub> = 95
Хвосты	49.63	0.155	0.044	15.31	10.86	
Исходный	100.00	0.503	0.201	100.00	100.00	
Tecflote S13						
Пенный	49.35	0.867	0.364	84.50	88.96	K <sub>x</sub> = 30 S13 = 45 A <sub>f</sub> = 95
Хвосты	50.65	0.155	0.044	15.50	11.04	
Исходный	100.00	0.506	0.202	100.00	100.00	

Выявлено, что частичная замена ксантогената комплексобразующими реагентами Tecflote позволяет улучшить показатели разделения. При использовании этих реагентов наблюдается увеличение извлечения никеля в пенный продукт при снижении его содержания в хвостах флотации. Максимальное повышение технологических показателей происходит при использовании в составе собирательной смеси реагента S12. Реагент S13 демонстрирует технологические показатели, близкие к S12. По-видимому, реагенты Tecflote, способные образовывать комплексные соединения с ионами металлов на поверхности минералов, усиливают прочность закрепления ксантогената за счет совместной адсорбции. В большей степени это проявляется для никельсодержащих минералов, что и обеспечивает более полное извлечение никеля в пенный продукт и снижение его потерь с хвостами флотации.

#### ВЫВОДЫ

Выполнена оценка возможности применения неионогенных органических реагентов Tecflote в качестве собирателей при флотации медно-никелевых руд. Опытами по беспенной флотации показана специфичность их действия по отношению к сульфидным минералам никеля и меди, причем большая активность проявляется по отношению к никелевым минералам.

При флотации труднообогатимой медно-никелевой руды реагенты Tecflote в случае их использования отдельно от стандартно применяемых реагентов продемонстрировали меньшую по сравнению с ксантогенатом собирательную способность.

Лабораторными флотационными испытаниями доказана эффективность их применения в качестве добавки к традиционному составу собирательной смеси. Использование реагентов Tecflote в составе собирательной смеси позволяет увеличить извлечение никеля в черновой концентрат при снижении его содержания в хвостах флотации. Наиболее эффективно при испытанных режимах показал себя реагент S12.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чантурия В. А.** Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: материалы междунар. конф. Плаксинские чтения – 2020. — Апатиты, 2020. — С. 3–4.
2. **Алгебраистова Н. К., Михеев В. Г., Маркова С. А., Гайворонская М. В., Кондратьева А. А., Гроо А. А., Развязная А. В.** Технологическая оценка обогащения вкрапленной медно-никелевой руды // ГИАБ. — 2013. — № 2. — С. 57–67.
3. **Шубов Л. Я.** Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья. — М.: Недра, 1990. — 263 с.
4. **Marabini A. and Barbaro M.** Chelating reagents for flotation of sulphide minerals, *Sulphide Deposits — their Origin and Proc.*, Springer, Dordrecht, 1990. — P. 103–117.
5. **Ackerman P. K.** Use of chelating agents as collectors in the flotation of copper sulfides and pyrite, *Miner. Metall. Proc.*, 1999, Vol. 16, No. 1. — P. 27–35.
6. **Матвеева Т. Н., Громова Н. К.** Особенности действия меркаптобензотиазола и дитиофосфата при флотации Au- и Pt-содержащих минералов // ГИАБ. Отд. выпуск: Обогащение полезных ископаемых: сб. науч. тр. по материалам симпозиума “Неделя горняка–2009”. — С. 62–71.
7. **Chai W., Huang Ya., Peng W., Han G., Yijun Cao, and Liu J.** Enhanced separation of pyrite from high-sulfur bauxite using 2-mercaptobenzimidazole as chelate collector: Flotation optimization and interaction mechanisms, *Miner. Eng.*, 2018, Vol. 129. — P. 93–101.
8. **Соложенкин П. М.** Взаимодействие тионокарбаматов с кластерами сульфидных минералов по данным компьютерного моделирования // Цв. металлургия. — 2016. — № 6. — С. 4–13.
9. **Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Алексейчук Д. А.** Новые научные подходы к выбору композиций сульфидрильных собирателей, механизму их действия и обоснованию условий селективной флотации сульфидных минералов // ГИАБ. — 2013. — № 10. — С. 59–67.
10. **Lu J., Tong Zh., Yuan Zh., and Li L.** Investigation on flotation separation of halcopyrite from arsenopyrite with a novel collector: N-butoxycarbonyl-O-isobutyl thiocarbamate, *Miner. Eng.*, 2019, Vol. 137. — P. 118–123.
11. **Forson Ph., Skinner W., and Asamoah R.** Decoupling pyrite and arsenopyrite in flotation using thionocarbamate collector, *Powder Technol.*, 2021, Vol. 385. — P. 12–20.
12. **Huang X., Huang K., Wang Sh., Cao Zh., and Zhong H.** Synthesis of 2-hydroxyethyl dibutyldithiocarbamate and its adsorption mechanism on chalcopyrite, *Appl. Surface Sci.*, 2019, Vol. 476. — P. 460–467.

13. **Huang X., Jia Yu., Cao Zh., Wang Sh., Ma X., and Zhong H.** Investigation of the interfacial adsorption mechanisms of 2-hydroxyethyl dibutyldithiocarbamate surfactant on galena and sphalerite, *Colloids and Surfaces, Physicochem. Eng. Aspects*, 2019, Vol. 583.
14. **Hamilton D., Natarajan R., and Nirdosh I.** Sphalerite flotation using an aryhydroxamic acid collector: improving grade while using a reduced amount of copper sulfate for activation, *Industrial Eng. Chemistry Res.*, 2009, Vol. 48, No. 12. — P. 5584–5589.
15. **Lee K., Archibald D., McLean J., and Reuter M. A.** Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors, *Miner. Eng.*, 2009, Vol. 22, Issue 4. — P. 395–401.
16. **Elizondo-Álvarez M. A., Uribe-Salas A., and Nava-Alonso F.** Flotation studies of galena (PbS), cerussite (PbCO<sub>3</sub>) and anglesite (PbSO<sub>4</sub>) with hydroxamic acids as collectors, *Miner. Eng.*, 2020, Vol. 155.
17. **Чеканова Л. Г., Заболотных С. А., Харитоновна А. В., Ельчищева Ю. Б., Юровских Е. С.** Гидразиды разветвленных карбоновых кислот — реагенты для флотации извлечения минералов цветных металлов // *Вестн. Перм. ун-та.* — 2019. — Т. 9. — Вып. 4. — С. 359–370.
18. **Чеканова Л. Г., Радусhev А. В., Байгачева Е. В., Чернова Г. В.** Новые собиратели для флотации сульфидных руд // *Обогащение руд.* — 2009. — № 9. — С. 34–36.
19. **Митрофанова Г. В., Черноусенко Е. В., Базарова Е. А., Тюкин А. П.** Поиск новых комплексообразующих реагентов для флотации медно-никелевых руд // *Цв. металлы.* — 2019. — № 11. — С. 27–33.
20. **Чеканова Л. Г., Радусhev А. В., Байгачева Е. В., Чернова Г. В.** Новые собиратели для флотации сульфидных руд // *Обогащение руд.* — 2009. — № 9. — С. 34–36.
21. **Holness T.** An investigation of the adsorption mechanism of an aliphatic nitrile (Tecflote S11) on sulphide mineral surfaces, *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 2020.
22. **Lewis A. and Lima O.** Tecflote — new collector chemistry for sulfide flotation, *Procemin Geomet, 14<sup>th</sup> Int. Miner. Proc. Conf., Santiago, Chile*, 2018. — P. 321–333.
23. **Schach E., Lewis A., and Rudolph M.** Investigations on the working mechanism of the nitrile based sulfide collector Tecflote TM, *Conference: MEI Flotation. Cape Town, South Africa*, 2019.

*Поступила в редакцию 16/VII 2021*

*После доработки 10/VIII 2021*

*Принята к публикации 11/XI 2021*