

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7:553.43

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕДНЫХ РУД ВАРЬИРОВАНИЕМ РЕАГЕНТНОГО РЕЖИМА

Т. Н. Александрова<sup>1</sup>, А. В. Орлова<sup>1</sup>, В. А. Таранов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет, E-mail: s195064@stud.spmi.ru,  
Васильевский остров, 21 линия, д. 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АО "Механобр инжиниринг", E-mail: taranov.vadim@gmail.com,  
Васильевский остров, 22 линия, д. 3, к. 7, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены технологические схемы переработки медных руд ряда отечественных и зарубежных обогатительных фабрик. Анализу подлежали реагентный режим, показатели флотационного обогащения. Приводятся краткие сведения по видам применяемых реагентов-собирателей, пенообразователей и депрессоров. Изучено влияние рабочей среды при флотации медно-никелевой руды с целью получения коллективного медно-никелевого концентрата. Исследования проводились с получением черного концентрата в кислой и щелочной среде с последующей перечисткой.

*Технологическая схема переработки, флотация, обогатительная фабрика, сульфидные медные руды, медно-никелевая руда, медный концентрат*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200610

---

Медь является ковким и пластичным металлом, хорошо проводящим тепло и электричество, применяемым для изготовления силовых кабелей, проводов, теплообменников, ювелирных изделий и др. Высокий спрос на представленные конечные продукты определяет объем переработки медной руды.

В природе медь встречается в различной форме: сульфидные месторождения включают минералы халькопирит, борнит, ковеллин, халькозин; карбонатные месторождения, азурит и малахит; силикатные месторождения, представлены минералами хризоколлой и диоптазом. Выбор технологии переработки медной руды зависит от широкого спектра вещественного состава медной руды, в первую очередь от минералогического состава, физических свойств минералов, крупности зерен, их текстуры и структуры, а также содержания сульфатов, оксидов, карбонатов, силикатов меди.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-12002 ННИО\_а).

Переработка медной руды включает в себя рудоподготовительные процессы с последующим извлечением минералов путем флотации и процессы по обезвоживанию концентрата. Получаемый флотационный концентрат может содержать от 5 до 40 % меди, в зависимости от дальнейшей переработки медного концентрата пирометаллургическим или гидрометаллургическим способом.

#### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ВЫБОРА РЕАГЕНТОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ МЕДНЫХ РУД

Подходы к переработке медных руд, выбору и управлению реагентными режимами изложены в [1–4]. На отечественных обогатительных фабриках в качестве собирателя медных минералов применяют бутиловый ксантогенат, аэрофлот, тионокарбамат. В [5–7] приведены результаты исследований использования сочетания сульфгидрильных собирателей. Предложен новый собиратель М-ТФ, представляющий собой сочетание дитиофосфата и тионокарбамата в определенных пропорциях. Собиратель является селективным, обладает слабой флотационной активностью по отношению к сульфидам железа.

На Талнахской обогатительной фабрике для медной флотации используют аэрофлот 5–15 г/т руды, на Томинской фабрике — Aerophine 3418 10–20 г/т. На Михеевском ГОКе расход бутилового ксантогената и аэрофлота составляет 5–80 и 5–40 г/т соответственно. На Учалинском и Гайском в зависимости от схемы переработки расход ксантогената для медной флотации варьирует от 5 до 55 г/т. Расход ксантогената в цикле медной флотации Сибайской фабрики составляет 90–150 г/т.

На зарубежных обогатительных фабриках применяют несколько собирателей: дитиофосфаты, PAX (ксантогенат калия амиловый), топливное масло, SIPX (ксантогенат натрия изопропиловый), тионокарбаматы. На фабрике “Highland Valley” (Канада) и “Bagdad” (США) в качестве собирателей используют PAX с топливным маслом, на фабрике “El Salvador” (Чили) PAX и тионокарбамат. В качестве основного собирателя на обогатительной фабрике “Minera Candelaria” (Чили) используют AP3894 (Solvay) 6–8 г/т, вторичного — Hostafлот Lib K (Sansil-Clariant) 3–4 г/т. На проектируемой фабрике месторождения “Josemaría” будет применяться сразу три собирателя: PAX, Sascol 95 и Matcol TC-123.

Для повышения эффективности флотации медно-порфировой руды предложено применение дополнительных собирателей из третичных ацетиленовых спиртов ДК-80 (2-метил-3-бутин-2-ол) в сочетании с AeroMX5152 (15–40 % аллилового эфира амилксантогеновой кислоты) и ВК-901В (диалкилдитиофосфат-диалкилтионокарбамат) [8]. Дополнительные флотореагенты-собиратели на основе третичных ацетиленовых спиртов ДК-80 и ДМИПЭК эффективно взаимодействуют с поверхностью сульфидных минералов в комплексе с основными собирателями, содержащими в структуре функциональной группы двухвалентную серу.

В качестве основного собирателя сульфидов для флотации сульфидной платиноидно-медно-никелевой руды широко применяются ксантогенаты, которые хорошо флотируют металлы платиновой группы (ЭПГ). В случае нахождения свободных форм платиноидов на Норильском горно-металлургическом комбинате дополнительно применяют реагент ДП-4 (органическая серосодержащая добавка). Сотрудниками ИПКОН РАН под руководством академика В. А. Чантурия осуществлены работы по разработке нового класса реагентов — термоморфных полимеров, образующих комплексное соединение с металлами платиновой группы, а также проведены испытания реагента ДИФ для повышения извлечения Cu, Ni, Pt и Pd и качества Cu-Ni концентратов [9–13]. В [14, 15] показана эффективность применения композиций фосфорсодержащих собирателей и ксантогенатов при флотации платиноидно-медноникелевой руды Мончегорского района с повышением извлечения платины, палладия и никеля приблизительно на 10 % и выполнено сравнение флотационных режимов с собирателями: Aerophine 3416, бутиловый ксантогенат и депрессорами: Depgramine 347, жидкое стекло.

В [16, 17] исследована собирательная способность легко десорбируемых производных форм ксантогенатов. Показано, что назначением активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” десорбируемых форм ксантогенатов является снятие кинетического ограничения формирования флотационного контакта. Воздействие десорбируемых форм реагентов на прослойку воды, разделяющей минеральную частицу и пузырек воздуха, усиливается с увеличением длины углеводородного фрагмента ксантогената. В [18] дана оценка соотношений активностей физической и химической сорбции реагента на сульфидных минералах. На селективность флотационного разделения сульфидов оказывает влияние соотношение объемов жидкости, которые удаляются десорбируемой физической и недесорбируемой химической формами сорбции реагента.

Для создания и поддержания пены применяют терпинеол, ОПСБ (окись пропилен-спирт бутиловый), МИБК (метилизобутилкарбинол), Т-80, Dow 250, сосновое масло и др. Часто вспениватель бывает слабым для извлечения грубого промпродукта и недостаточно селективным по отношению к тонким флотируемым частицам, поэтому на обогатительных фабриках используют комплекс пенообразователей. Удельный расход вспенивателей на крупных зарубежных фабриках составляет в среднем 25 г/т руды, на отечественных фабриках: сосновое масло 0–5 г/т, МИБК 20–30 г/т, Т-80 при расходе 30–60 г/т.

Применение депрессора при флотации медных минералов играет важную роль. Наиболее часто используются такие депрессоры, как жидкое стекло,  $\text{NaHS}$ , известь, Акремон Д-13, КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза),  $\text{NaHSO}_3$ . В среднем расход жидкого стекла составляет 80–150 г/т, сернистого натрия 100–300 г/т, КМЦ 50–200 г/т. Для сульфидизации окисленных медных минералов на отечественных и зарубежных фабриках обычно применяют сернистый натрий 100–200 г/т, реже гидросульфид натрия.

В [19] представлены результаты исследований влияния гуматного реагента на депрессию пустой породы. В операциях коллективной флотации и в перечистной операции коллективного концентрата при использовании гуматного реагента повышается извлечение никеля и меди в концентрат с сохранением качества последнего. Влияние электрохимической обработки пульпы с целью изменения поверхностных свойств минералов и сокращения расхода реагентов при повышении извлечения ценных компонентов показано в [20, 21]. Одна из главных задач при обогащении медных руд — удаление пирита, содержащегося в пределах 10–90% в сульфидных медных рудах. На депрессию пирита [22, 23] оказывает влияние водородный показатель пульпы (рН).

Важным параметром, способствующим селективности процесса при флотации медных руд, является рН. Для создания и регулирования водородного показателя пульпы используют известь, кальцинированную соду, серную кислоту и др. На современных обогатительных фабриках рН составляет 10–11 ед. На флотируемость медных минералов при различном рН оказывает влияние и тип применяемого вспенивателя. На фабрике “Utah Copper” (США) основную флотацию проводят при рН 8.5, перечистную при рН 9.5, в то время как на фабриках “Pinto Valley”, “Mineral Park” и “Bagdad” (США) показатель рН среды на основной и перечистной флотации составляет 11.5 [24].

На строящейся обогатительной фабрике месторождения Удокан коллективная флотация будет проводиться при рН 8.0–9.5, а сульфидная флотация кека атмосферного выщелачивания при рН 5–6. Для создания и поддержания щелочной среды будет использоваться 12% раствор известкового молока. Расход подаваемого регулятора среды может изменяться в широких пределах в зависимости от водородного показателя пульпы.

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФЛОТАЦИЮ МЕДНО-НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ**

Флотационное исследование проводилось на медно-никелевой руде с целью получения коллективного никель-медного концентрата при флотации в щелочной и кислой среде.

В составе пробы исследуемой руды преобладали амфибол, клинопироксен, оливин, серпентин и хлорит, рудные минералы: пентландит, пирротин, халькопирит, валлериит, магнетит. Среднее содержание меди в пробе составляло 0.16 %, никеля 0.39 %. В табл. 1 приведены данные химического анализа исследуемой медно-никелевой руды.

ТАБЛИЦА 1. Химический анализ пробы руды

Элемент	Содержание, %, г/т	Элементы	Содержание, %, г/т
Ni <sub>общ</sub>	0.3900	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.026
Cu <sub>общ</sub>	0.1600	Se	< 0.002
Co	0.0120	Te	< 0.002
Zn	0.0062	As	< 0.002
Pb	0.0057	Bi	< 0.001
Fe <sub>общ</sub>	9.0600	Na <sub>2</sub> O	0.590
SiO <sub>2</sub>	36.4000	K <sub>2</sub> O	0.250
TiO <sub>2</sub>	0.2600	S <sub>общ</sub>	0.690
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.3900	Au	0.080
MnO	0.1500	Ag	0.650
CaO	3.2700	Pt	0.250
MgO	27.5000	Pd	0.290

Минералам-носителем никеля в руде является пентландит, никель присутствует также в оливине, серпентине, хлорите. Минералы меди сосредоточены в основном в халькопирите, валлериите, кубаните, ковеллине и пирротине (рис. 1).

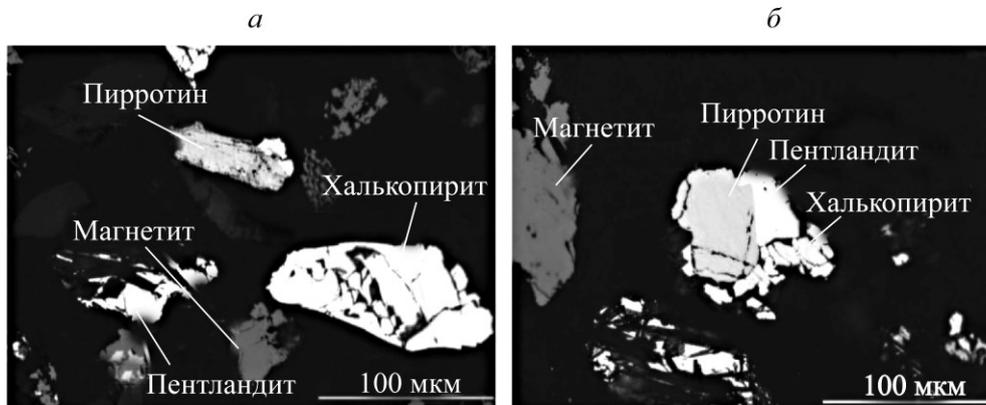


Рис. 1. Проба медно-никелевой руды: *а* — гипидиоморфное выделение халькопирита; *б* — сросток пирротина, пентландита и халькопирита

Схема проведения опытов в кислой среде представлена на рис. 2, схема проведения опытов в щелочной среде аналогична. Кислая среда создавалась за счет добавления серной кислоты для поддержания рН среды 5.5, щелочная — добавлением соды до рН 9.8.

При флотации медно-никелевой руды в кислой среде по сравнению с щелочной увеличилось извлечение меди в суммарный концентрат на 5.3 % (табл. 2). Извлечение и содержание никеля в суммарном концентрате выросло незначительно. По схеме (рис. 3) проведен опыт с получением черного концентрата в щелочной среде и последующими перераспределениями в кислой среде.

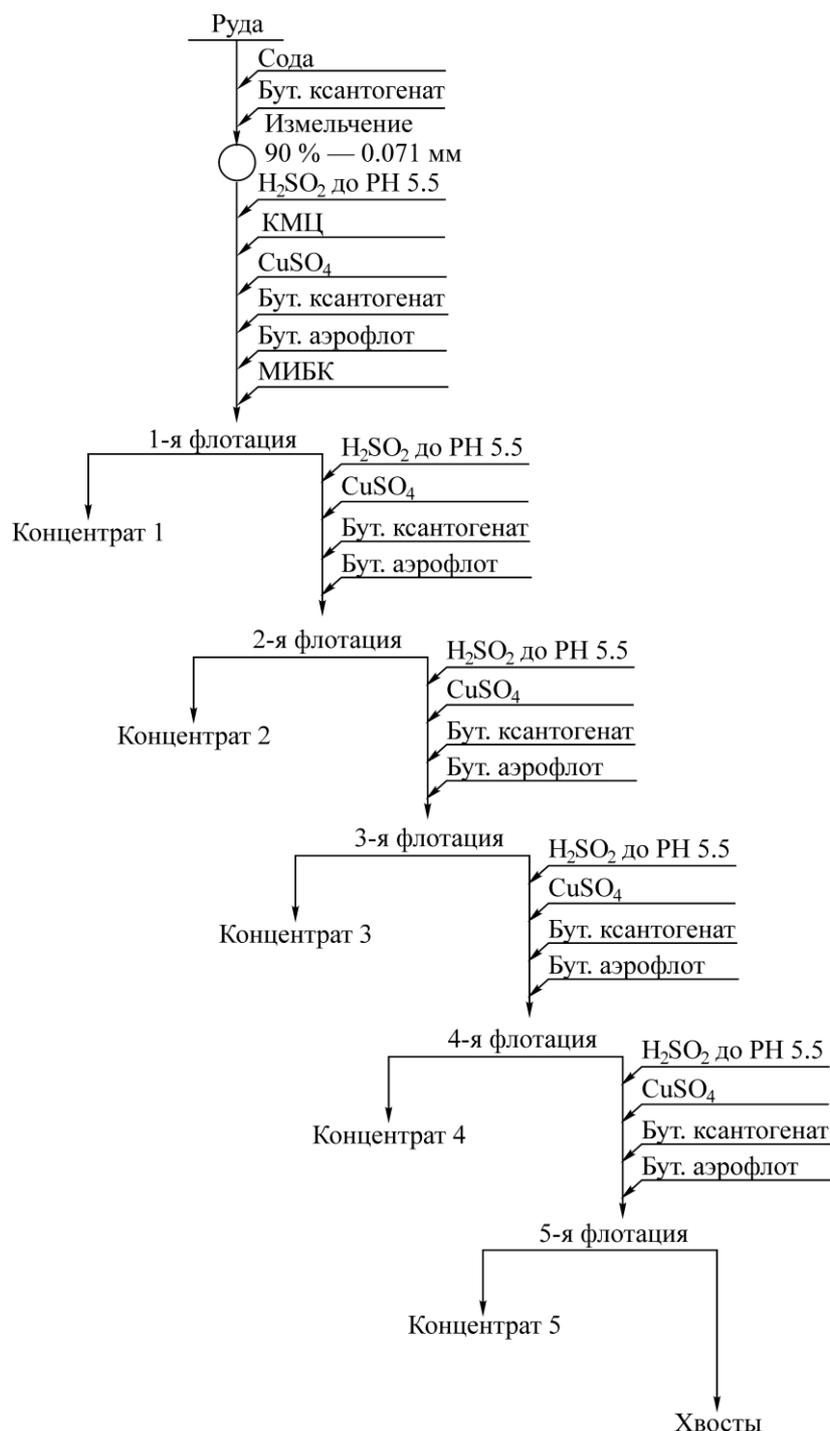


Рис. 2. Схема проведения опытов в кислой среде

Согласно данным табл. 3, проведение перечистных операций в кислой среде не оказывает влияние на рост извлечения и содержания меди и никеля по сравнению с проведением опыта в щелочной среде.

При флотации медно-никелевой руды в щелочной среде в черновой концентрат извлекается около 60% меди и более 70% никеля. В концентрат перечистки при щелочном pH извлекается на 8% больше меди и на 23% больше никеля, чем при перечистке в кислой среде, при содержании 4.09% меди и 10.08% никеля.

ТАБЛИЦА 2. Результаты опытов флотации в щелочной и кислой среде, %

Среда	Продукт	Выход продукта	Содержание		Извлечение	
			Cu	Ni	Cu	Ni
Щелочная (pH 9.8)	Концентрат 1 + 2	9.93	0.960	2.42	52.47	62.31
	Концентрат 3 + 4 + 5	20.50	0.180	0.32	20.89	16.91
	Суммарный концентрат	30.43	0.440	1.00	73.36	79.22
	Хвосты	69.57	0.070	0.12	26.64	20.78
	Руда	100.00	0.180	0.39	100.00	100.00
Кислая (pH 5.5)	Концентрат 1 + 2	15.13	0.770	1.84	63.88	67.92
	Концентрат 3 + 4 + 5	15.68	0.170	0.31	14.78	11.83
	Суммарный концентрат	30.81	0.460	1.06	78.66	79.75
	Хвосты	69.19	0.056	0.12	21.34	20.25
	Руда	100.00	0.180	0.41	100.00	100.00

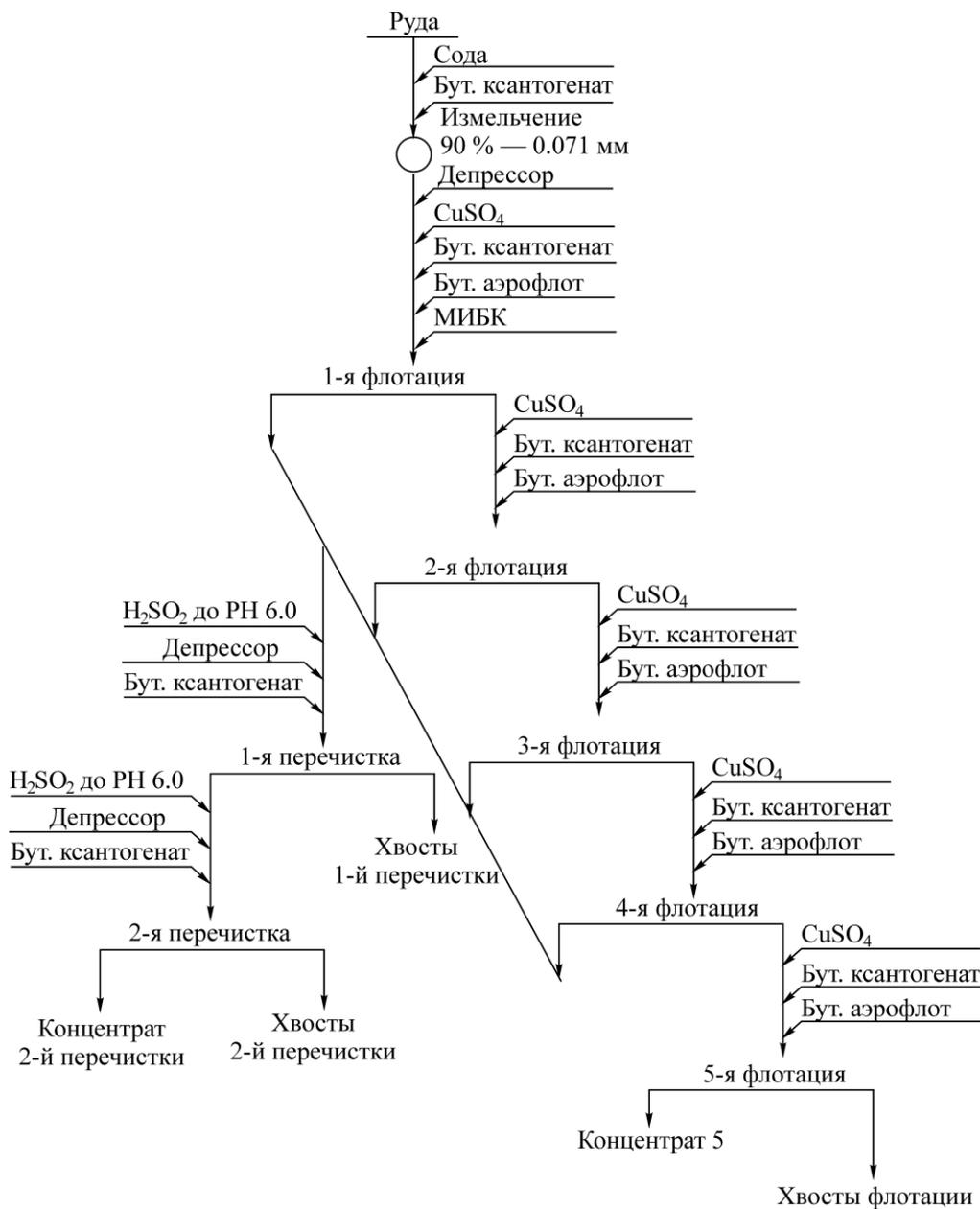


Рис. 3. Схема проведения опытов в щелочной среде

ТАБЛИЦА 3. Результаты опытов флотации черного концентрата в щелочной среде и перечистками в кислой и щелочной среде, %

Среда	Продукт	Выход продукта	Содержание		Извлечение	
			Cu	Ni	Cu	Ni
Перечистка в щелочной среде	Концентрат 2-й перечистки	1.76	4.090	10.08	42.55	53.42
	Хвосты 2-й перечистки	3.25	0.240	0.76	4.61	7.45
	Концентрат 1-й перечистки	5.01	1.590	4.03	47.16	60.87
	Хвосты 1-й перечистки	15.02	0.160	0.25	14.23	11.32
	Питание 1-й перечистки	20.03	0.520	1.20	61.39	72.19
	Концентрат 5	5.28	0.160	0.19	5.00	3.03
	Суммарный концентрат основной флотации	25.31	0.440	0.99	66.39	75.22
	Хвосты 1	74.69	0.076	0.11	33.61	24.78
	Руда	100.00	0.170	0.33	100.00	100.00
	Перечистка в кислой среде	Концентрат 2-й перечистки	1.17	4.950	8.26	34.56
Хвосты 2-й перечистки		5.14	0.370	1.76	11.32	28.34
Концентрат 1-й перечистки		6.31	1.220	2.97	45.88	58.69
Хвосты 1-й перечистки		13.57	0.170	0.34	13.72	14.44
Питание 1-й перечистки		19.88	0.500	1.17	59.60	73.13
Концентрат 5		5.69	0.160	0.20	5.41	3.56
Суммарный концентрат основной флотации		25.57	0.430	0.96	65.01	76.69
Хвосты 1		74.43	0.079	0.10	34.99	23.31
Руда		100.00	0.170	0.32	100.00	100.00

## ВЫВОДЫ

Приведены сведения по видам применяемых флотационных реагентов-собирателей на отечественных и зарубежных обогатительных предприятиях. Показано, что на зарубежных предприятиях большое распространение получило применение сочетания собирателей. На отечественных фабриках композиции сульфидрильных собирателей с дополнительными реагентами используются в основном во флотации сложной по составу руды, с низким содержанием ценных компонентов. Номенклатура применяемых флотационных реагентов на отечественных и зарубежных фабриках имеет отличия, обусловленные различными производителями реагентов.

Выполнены исследования по флотации медно-никелевой руды, согласно которым основная флотация медно-никелевой руды в кислой среде (рН 5.5) позволяет повысить извлечение меди в суммарный черновой концентрат на 5.3 % при содержании 0.46 % и извлечение никеля

на 0.5 % при содержании 1.06 %, по сравнению с флотацией в щелочной среде (рН 9.8). В операциях перечистной флотации наблюдалась обратная тенденция, в концентрате 2-й перечистки при флотации в щелочной среде извлечение меди больше на 7.99 % при содержании 4.09 %, а извлечение никеля на 23 % при содержании 10.08 %, чем в кислой среде.

Показано, что проводить флотацию целесообразно в щелочной среде с использованием соды в качестве регулятора среды. Сода относится к умеренно опасному веществу по степени воздействия на организм человека, ее транспортировка и хранение проводится в твердом виде и не вызывает дополнительных эксплуатационных проблем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курчуков А. М. Алгоритм управления реагентным режимом флотации медно-никелевых руд на основе оптимизации параметров ионного состава пульпы // Зап. Горн. ин-та. — 2011. — Т. 189. — С. 292.
2. Boduen A. Ya., Ivanov B. S., and Ukraintsev I. V. Copper concentration from sulfide ore: State of the art and prospects Non-ferrous Metals, 2015 (1). — P. 17–20.
3. Иванов Б. С., Бодуэн А. Я., Петров Г. В. Отечественные медно-цинковые колчеданные руды: проблемы переработки и технологические перспективы // Обогащение руд. — 2014. — № 3. — С. 7–13.
4. Бодуэн А. Я., Иванов Б. С., Коновалов Г. В. Влияние повышения качества медных концентратов на эффективность их переработки // Зап. Горн. ин-та. — 2011. — Т. 192. — С. 46.
5. Игнаткина В. А., Бочаров В. А. Схемы флотации сульфидов цветных металлов на основе использования сочетания собирателей // Горн. журн. — 2010. — № 12. — С. 58–64.
6. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Хачатрян Л. С. Проблемы разделения минеральных комплексов при переработке массивных упорных руд цветных металлов // Цв. металлы. — 2014. — № 5. — С. 16–23.
7. Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Милович Ф. О., Иванова П. Г., Хачатрян Л. С. Селективное повышение флотоактивности сульфидов цветных металлов с использованием сочетаний сульфгидрильных собирателей // Обогащение руд. — 2015. — № 3. — С. 18–24.
8. Юшина Т. И., Пурэв Б., Д'Элия Янес К. С., Намуунгэрэл Б. Повышение эффективности флотации медно-порфириновых руд с применением дополнительных собирателей на основе ацетиленовых спиртов // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения–2019). — 2019. — С. 140–144.
9. Chanturiya V. A., Matveeva T. N., Ivanova T. A., and Getman V. V. Mechanism of interaction of cloud point polymers with platinum and gold in flotation of finely disseminated precious metal ores, Mineral Proc. and Extractive Metallurgy Review, 2016, Vol. 37, No. 3. — P. 187–195.
10. Чантурия В. А., Недосекина Т. В., Гетман-Степанова В. В. Экспериментально-аналитические методы изучения влияния реагентов-комплексобразователей на флотационные свойства платины // ФТПРПИ. — 2008. — № 3. — С. 68–75.
11. Чантурия В. А., Недосекина Т. В., Гетман В. В., Гапчич А. О. Новые реагенты для извлечения благородных металлов из труднообогатимых руд и продуктов // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 78–84.
12. Матвеева Т. Н. Научное обоснование высокоэффективных реагентных режимов флотационного извлечения платиносодержащих сульфидных минералов из труднообогатимых руд // ФТПРПИ. — 2011. — № 6. — С. 128–134.

13. Чантурия Е. Л., Иванова Т. А., Зимбовский И. Г. О повышении селективности флотации сульфидов колчеданных руд // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 146–152.
14. Лавриненко А. А., Макаров Д. В., Шрадер Э. А., Саркисова Л. М., Кузнецова И. Н., Глухова Н. И. Обоснование режимов флотации, содержащей ЭПГ медно-никелевой руды Мончегорского района // ГИАБ. — 2017. — № 10. — С. 141–145.
15. Чантурия В. А., Лавриненко А. А., Саркисова Л. М., Иванова Т. А., Глухова Н. И., Шрадер Э. А., Кунилова И. В. Действие сульфгидрильных фосфорсодержащих собирателей при флотации платинометалльного медно-никелевого минерального сырья // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 132–139.
16. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П., Коновалов И. А. Оценка собирательной способности легко десорбируемых форм ксантогенатов // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 164–173.
17. Кондратьев С. А., Коновалов И. А. Флотационная активность солей ксантогеновой кислоты // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 114–123.
18. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П., Бурдакова Е. А. Определение оптимального соотношения активностей разных форм сорбции реагента на сульфидных минералах // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 146–154.
19. Усманова Н. Ф., Маркосян С. М., Тимошенко Л. И., Пасюга Д. В. Применение гуматного реагента в качестве депрессора при флотации медно-никелевых руд // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения–2019). — 2019. — С. 164–166.
20. Aleksandrova T., Romanenko S., and Arustamian K. Research of slurry preparation before selective flotation for sulphide-polymetallic ores, IMPC 2018, 29<sup>th</sup> Int. Min. Proc. Cong., 2019. — P. 2071–2078.
21. Alexandrova T. N., Romanenko S., and Arustamian K. M. Electrochemistry research of preparation slurry before intermediate flotation for sulfide-polimetallic ores, 17<sup>th</sup> Int. Multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Conf. Proc., Albena, Bulgaria, 2017, Vol. 17. — P. 841–848.
22. Костович М., Лазич П., Вучинич Д., Деушич С., Томанец Р. Факторный план эксперимента селективной флотации халькопирита из сульфидных медных руд // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 167–176.
23. Лазич П., Никшич Д., Томанец Р., Вучинич Д., Цветичанин Л. Флотируемость халькопирита в промышленных условиях // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 131–137.
24. Zanin M., Lambert H., C. A. du Plessis. Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review, Min. Eng., 2019, Vol. 143.

*Поступила в редакцию 12/V 2020  
После доработки 18/IX 2020  
Принята к публикации 03/XI 2020*