Анализ и совершенствование технологии обогащения лежалых хвостов Ковдорского ГОКа

Бармин И. С.¹, Морозов В. В.^{2*}, Поливанская В. В.²

¹ Минерально-химическая компания «Еврохим», г. Москва, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

*e-mail: dchmgtu@mail.ru

Реферат

Введение. Причинами потерь фосфатных минералов при флотации лежалых хвостов Ковдорского ГОКа является наличие трудноизвлекаемых минеральных фракций и отсутствие условий для эффективной флотации тонких классов фосфатных минералов.

Цель работы – повышение эффективности переработки сырья техногенного месторождения Ковдорского ГОКа путем оптимизации реагентного режима и схемы обогащения тонких классов лежалых хвостов с применением флокулянтов, селективных депрессоров и собирателей.

Методология. В разрабатываемом режиме подготовки шламов к флотации предполагается их сгущение с использованием флокулянта Праестол-2540, дефлокуляция сгущенного продукта смесью реагентов-диспергаторов (сульфит-спиртовой барды, кальцинированной соды и Неонола АФ 9-8), его дополнительное сгущение с последующим объединением с песковой частью хвостов, их кондиционирование с собирателем и подача на объединенную флотацию с применением комбинированного собирателя по схеме с промпродуктовым циклом.

Результаты. Разработанная схема и реагентный режим обогащения хвостов из труднообогащаемой части техногенного месторождения позволили достичь извлечения 45 % P_2O_5 от исходного питания и массовой доли P_2O_5 в апатитовом концентрате на 0,5 и 1,5 % выше, чем при использовании проектной схемы и технологии.

Выводы. Разработанная технология обогащения лежалых хвостов Ковдорского ГОКа обеспечивает повышение показателей переработки за счет создания условий для эффективной флотации тонких классов фосфатных минералов.

Ключевые слова: складированные хвосты; апатит; шламы; сгущение; дефлокуляция; флотация; диспергаторы; флокулянты; собиратели.

Введение. Техногенные месторождения складированных отвальных хвостов являются важным ресурсом для различных отраслей горно-перерабатывающей промышленности [1, 2]. Фосфорное сырье в России добывается преимущественно на месторождениях Мурманской области. Техногенное месторождение Ковдорского ГОКа является важным и перспективным источником фосфатного сырья (Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах» // Минприроды России. М.: ВИМС, 2018. С. 245–252). Однако технико-экономические показатели при освоении фосфатсодержащих техногенных месторождений, как правило, невысоки, что в значительной мере обусловлено прошедшими процессами гипергенного изменения свойств фосфатных минералов [3]. Поэтому без глубокого изучения свойств сырья разработка режимов переработки техногенных месторождений малоэффективна [4, 5]. Для решения задачи повышения эффективности переработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа необхо-

димо провести оптимизацию реагентного режима и схемы обогащения, используя данные об особенностях минерального и гранулометрического состава сырья [6, 7].

Анализ причин потерь апатита при обогащении лежалых хвостов. Анализ минерального состава лежалых хвостов показал, что главными минералами проб лежалых отходов являются апатит, форстерит, карбонаты, флогопит и магнетит.

Апатит лежалых хвостов является по составу фтороксигидроксилапатитом (содержание пятиокси фосфора $P_2O_5 = 41,50\%$). Зерна апатита часто покрыты светло-бурыми пленками, покрывающими до половины поверхности зерна. В песках наряду с апатитом содержится штаффелит. Форстерит мало изменен, и в редких случаях зерна форстерита покрыты пленками, аналогичными тем, что покрывают зерна апатита. Карбонаты представлены в основном кальцитом и доломитом, имеющим вид бесцветных прозрачных ромбоэдрических обломков, часто непрозрачных. В пробах встречается зеленый флогопит, реже встречается бурый тетраферрифлогопит, и еще реже темно-бурый железный флогопит.

Таблица 1. Гранулометрический состав и характеристики классов крупности вторичных шламов

Table 1. Granulometric composition and characteristics of the grain-size categories of secondary sludge

Класс крупности, мкм	Выход класса, %	Содержание P_2O_5 , %	Потери P_2O_5 от исходного питания, %	Распределение P_2O_5 , %
+0,074	1,15	11,4	0,19	1,08
–0,074+0,04	6,91	12,6	1,24	6,62
–0,04+0,02	22,55	12,3	3,94	22,91
–0,020+0,010	24,48	11,9	4,14	24,48
–0,010+0,005	16,89	12,1	2,91	16,88
–0,005	28,02	11,6	4,62	28,02
<i>Итого</i>	100,00	12,1	17,03	100,00

В процессе выветривания хвостов происходило окисление неустойчивых железосодержащих минералов (в первую очередь пирротина, отчасти магнетита) с образованием оксидов и гидроксидов железа, которые и образовали бурые пленки на апатите, форстерите и других минералах.

В лежалых хвостах Ковдорского ГОКа содержится большое количество тонких классов минералов. В исходной пробе крупностью –1,5 мм содержание класса –0,020 мм составляет 21 %. Содержащиеся в исходных песках тонкие классы обеднены фосфатными минералами (около 9 % P_2O_5) и практически не извлекаются флотацией (извлечение P_2O_5 15–25 %).

В технологической схеме переработки лежалых хвостов предусмотрено удаление первичных шламов при подготовке исходного питания. Потери P_2O_5 с первичными шламами составляют от 8 до 9 %.

Существенно большие потери апатита связаны с образовавшимися в процессе рудоподготовки вторичными шламами, образуемыми после измельчения лежалых хвостов и теряемыми со сливом в операции сгущения.

Из данных табл. 1 видно, что задача повышения эффективности флотации тонких классов крайне важна при обогащении лежалых хвостов, поскольку потери P_2O_5 превышают 17 % и являются существенным резервом повышения извлечения. Большая часть потерь фосфатных минералов (более 69 %) связана с классами мельче 0,020 мм.

Анализ фракционного состава хвостов флотации, представленного в табл. 2, показывает, что наиболее селективно разделение фосфатных и породных минера-

лов идет в классах $-0,1+0,04$ мм, о чем свидетельствует сниженное содержание P_2O_5 . Наименьшая селективность флотации наблюдается для тонких классов, где массовая доля P_2O_5 в хвостах в 2,1–3,5 раза выше, чем средняя в питании флотации (табл. 2).

Таблица 2. Гранулометрический состав и характеристики классов крупности хвостов флотации доизмельченных лежалых хвостов
Table 2. Granulometric composition and characteristics of the grain-size of flotation tailings of crushed mature tailings

Классы крупности, мм	Выход, %	Содержание P_2O_5 , %	Распределение P_2O_5 , %	Потери P_2O_5 , %
+0,1	44,6	0,77	17,92	6,42
$-0,1+0,074$	14,3	0,73	11,16	4,00
$-0,074+0,040$	8,1	0,67	4,88	1,75
$-0,040+0,020$	7,4	0,60	4,32	1,55
$-0,020+0,010$	8,5	0,99	7,76	2,78
$-0,010+0,005$	8,5	1,28	10,71	3,83
$-0,005$	8,6	4,38	43,25	15,47
<i>Итого</i>	100,0	1,26	100,00	35,80

По данным опробования были рассчитаны величины извлечения P_2O_5 в концентрат в операции флотации по отдельным классам крупности. Результаты расчетов, представленные на рис. 1, показали, что извлечение фосфатных минералов ($-0,02$ мм) из тонких классов измельченных лежалых хвостов на 25–40 % меньше, чем классов крупности $0,04–0,074$ мм. Особенно низкое извлечение характерно для шламовых классов ($-0,01$ мм).

Дальнейший анализ причин повышенных потерь фосфатных минералов в шламовых классах проводился с применением анализа кинетических закономерностей процесса флотации [8]. Критерием флотационной активности фосфатных минералов служила величина константы скорости флотации ($K_{фл}$), рассчитываемая по извлечениям отдельной фракции или класса крупности ($\varepsilon_{фр}$) в момент времени τ по уравнению:

$$K_{фл} = 1 / \tau \log(1 - \varepsilon_{фр}). \quad (1)$$

Зависимости извлечения в пенный продукт фосфатных минералов имеют вид кривой с насыщением, что характерно для флотационных кривых, описываемых уравнением кинетики первого порядка. Перестроение экспериментальных данных в логарифмических координатах (рис. 1) позволяет рассчитать значения константы скорости флотации фосфатных минералов из отдельных классов крупности.

Анализ кинетики извлечения фосфатных минералов из лежалых хвостов (рис. 2) позволяет определить особенности процесса флотации. При линейной аппроксимации зависимости $\lg(1 - \varepsilon_{фр})$ от продолжительности флотации значения коэффициента детерминации от 0,67 до 0,76 говорят о изменении формальной константы скорости флотации в течение эксперимента. Такие результаты характерны при флотации полиминеральной композиции, когда в начальный момент флотируются хорошо извлекаемые фракции, а в конечный момент эксперимента скорость флотации определяется извлечением труднофлотируемой фракции [9].

Анализ полученных результатов показывает, что максимальная скорость (константа скорости) флотации наблюдается для класса $+0,074$ мм ($0,087–0,12$).

Мелкие классы фосфатных минералов имеют сниженную скорость флотации, а шламы (класс –10 мкм) имеют скорость флотации в 2,75 раза ниже (0,29–0,37), чем класс –0,074+0,02 мм (рис. 2).

Таким образом, можно констатировать, что в условиях применяемой схемы флотации лежащих хвостов причинами потерь фосфатных минералов с тонкими классами являются как наличие трудноизвлекаемых минеральных фракций, так и отсутствие условий для эффективной флотации мелких классов фосфатных минералов.

Рис. 1. Показатели флотации лежащих хвостов по действующей схеме:

1 – извлечение P_2O_5 , %, в класс крупности концентрата (от исходной руды); 2 – извлечение P_2O_5 , %, в класс крупности хвостов (от исходной руды); 3 – содержание P_2O_5 , %, в классе крупности концентрата; 4 – извлечение P_2O_5 , %, в класс крупности концентрата (от питания флотации)

Fig. 1. Indicators of mature tailings flotation according to the scheme: 1 – extraction of P_2O_5 , %, into the concentrate grain-size category (from the base ore); 2 – extraction of P_2O_5 , %, into the tailings grain-size category (from the base ore); 3 – P_2O_5 content, %, into the concentrate grain-size category; 4 – extraction of P_2O_5 , %, into the concentrate grain-size category (from flotation feed)

Разработка технологии обесшламливания и флотации лежащих хвостов Ковдорского ГОКа. Повышение эффективности переработки сырья техногенного месторождения Ковдорского ГОКа достигалось путем оптимизации реагентного режима и схемы обогащения тонких классов лежащих хвостов с применением современных реагентов – флокулянтов, селективных депрессоров и собирателей.

При определении оптимальных условий обогащения ошламованных лежащих хвостов Ковдорского ГОКа первоначальной задачей был выбор реагента – флокулянта для операции сгущения шламовых классов. Были испытаны два режима сгущения с использованием флокулянтов различной силы – Праестол-2530 и Праестол-2540.

При проведении исследований на сгущение направлялся слив операции классификации цикла доизмельчения с плотностью 15 % твердого, массовой долей P_2O_5 – 11 % и массовой долей класса –10 мкм – 28 %. В проведенных сериях опытов варьировался расход флокулянта.

Результаты проведенных исследований показали, что наиболее эффективное сгущение достигается при использовании флокулянта Праестол-2540. При рас-

ходе 12 г/т достигается выделение сгущенного продукта с плотностью более 56 %. Однако при использовании этого флокулянта происходит неселективное сгущение с захватом в осадок тонких классов породных минералов, что не способствует последующему процессу флотации. Сфлокулированный осадок флотируется неудовлетворительно: извлечение P_2O_5 не превышает 55 % при содержании P_2O_5 в концентрате на уровне 25–27 %.

Для повышения показателей флотации необходимо разрушить неселективные флокулы фосфатных и породообразующих минералов [10, 11]. Для решения поставленной задачи была применена операция предварительного кондиционирования шламового продукта с реагентами-диспергаторами, используемыми в технологическом процессе. Для достижения дефлокулирующего эффекта было исследовано влияние на устойчивость дисперсной фазы подачи Неонола АФ 9-8 в операцию диспергирования сгущенных шламов вместе с ССБ и КС.

Рис. 2. Кинетические зависимости флотации фосфатных минералов лежалых хвостов из класса:

1 – +0,074 мм; 2 – –0,074+0,02 мм; 3 – 0,02+0,01 мм; 4 – 0,01 мм

Fig. 2. Kinetic dependences of mature tailings phosphate minerals flotation from the class:

1 – +0.074 mm; 2 – –0.074 + 0.02 mm; 3 – 0.02 + 0.01 mm; 4 – 0.01 mm

Разработанный режим подготовки шламов к флотации предполагал их сгущение с использованием флокулянта Праестол-2540, обработку сгущенного шламового продукта смесью реагентов-диспергаторов (ССБ, КС и Неонол), его дополнительное сгущение с последующим объединением полученного осадка с песковой частью хвостов, их кондиционирование с собирателем и подачу на флотацию.

Результаты экспериментов показали, что максимальная степень диспергирования (дефлокуляции) сгущенных шламов достигается при концентрации флокулянта Неонол АФ 9-8 от 70 до 85 мг/л, а минимальная массовая доля P_2O_5 в сливе – при концентрации Неонола АФ 9-8 от 60 до 80 мг/л. При использовании флокулянта Неонол АФ 9-10 максимальная степень диспергирования шламовых фракций достигается при больших концентрациях (80–90 мг/л), чем при использовании Неонола АФ 9-8, что и определило использование последнего как более экономного реагента.

Использование предлагаемой смеси реагентов-диспергаторов (кальцинированная сода, ССБ, Неонол АФ-9-8) позволяет повысить извлечение P_2O_5 в кон-

центрат и улучшить качество апатитового концентрата при обогащении как тонкозернистых, так и сильноошламованных хвостов. Применение выбранного режима позволяет достичь извлечения P_2O_5 70–73 % при содержании P_2O_5 36–39 %.

Проведенные лабораторные технологические исследования позволили рекомендовать предварительное кондиционирование сгущенного продукта перед операцией флотации смеси ССБ, КС и Неонола АФ 9-8 для сильноошламованных хвостов. Для снижения расходов Неонола АФ 9-8 и ССБ было предложено применить технологию сухого складирования с использованием поциклового водооборота и возвратом оборотной воды, содержащей флотационные реагенты, в операцию классификации и флотации [12, 13].

Рис. 3. Влияние расхода собирателя MD 20542 на извлечение (1, 3) и на массовую долю (2, 4) P_2O_5 во флотационном концентрате при флотации тонкозернистых (1, 2) и сильноошламованных (3, 4) хвостов

Fig. 3. Influence of MD 20542 collector flow rate on the recovery (1, 3) and mass fraction (2, 4) of P_2O_5 in the flotation concentrate during flotation of fine-grained (1, 2) and heavily slimed (3, 4) tailings

Испытания режима обогащения лежалых хвостов проводились на укрупненной флотационной установке ОАО «Ковдорский ГОК». Для сильноошламованных песков была использована схема с последовательными операциями классификации и сгущения-обесшламливания с использованием добавок флокулянтов в процесс сгущения. Согласно выбранной схеме слив измельчения поступал на операцию классификации в гидроциклон, где отделялась песковая фракция. Слив гидроциклона направлялся в радиальный сгуститель, где с использованием флокулянта получали сгущенный продукт высокой плотности. Из сгущенного продукта после добавок реагентов-диспергаторов отделялся обедненный P_2O_5 слив, в котором концентрировались шламы породных минералов. Плотный продукт направлялся на объединенную флотацию. Данная схема характеризуется снижением потерь P_2O_5 на 1,5 % и одновременным повышением качества флотационного концентрата на 0,33 %.

Для решения задачи повышения эффективности флотации существенно измененного апатита лежалых хвостов была проведена апробация нового амфотерного собирателя MD 20542 фирмы Akzo Nobel. В лабораторных опытах были определены рациональные расходы собирателя MD 20542, показавшие, что увеличение расхода MD 20542 до уровня 600–700 г/т позволяет увеличить извлечение P_2O_5 и качество получаемого апатитового концентрата. При дальнейшем уве-

личении расхода MD 20542 (до 1000 г/т) извлечение P_2O_5 в концентрат увеличивается незначительно, однако при этом снижается качество концентрата (рис. 3).

В дальнейших замкнутых опытах по флотации применяли собирательную смесь, состоящую из ЖКТМ и MD 20542. Результаты опытов показали, что применение комбинированного собирателя позволило увеличить и выход, и качество концентрата. Так, при использовании собирательной смеси, состоящей из 20 %

Рис. 4. Схема обогащения ошламованных лежалых хвостов с промпродуктовой флотацией

Fig. 4. Processing flowsheet of slimed mature tailings with middlings flotation

ЖКТМ и 80 % MD 20542, был получен концентрат с содержанием P_2O_5 37,1 % при извлечении (от исходных хвостов) 46,3 %. При увеличении доли MD 20542 в собирательной смеси до 90 % повышается качество апатитового концентрата (до 37,4 % P_2O_5), однако одновременно происходит существенное снижение извлечения P_2O_5 (до 38,3 %).

Полученные результаты позволили рекомендовать смесь собирателей из 15–20 % ЖКТМ и 80–85 % MD 20542 (при суммарном расходе 800–850 г/т) в операции флотации апатита из ошламованных лежалых хвостов.

Для повышения извлечения P_2O_5 и качества получаемого апатитового концентрата были проведены дополнительные исследования по оптимизации

схемы флотации путем выделения в отдельный цикл флотации пром-продуктов.

Испытанная схема включала основной цикл флотации, состоящий из основной, контрольной и двух перераспределительных операций, и промпродуктовый цикл, состоящий из основной и двух перераспределительных операций. Исходное питание промпродуктового цикла – пенный продукт контрольной флотации и камерные продукты 1 и 2 перераспределителей – предварительно направлялись на сгущение (рис. 4).

Таблица 3. Параметры и показатели обогащения ошламованных лежалых хвостов с использованием комбинированного собирателя и схемы с промпродуктовым циклом флотации

Table 3. Parameters and indicators of slimed mature tailings processing using an integrated collector and a scheme with a middlings cycle

Характеристики сырья – лежалых хвостов:

Выход класса –0,071 мм в исходных хвостах, % 76,2–88,7

Массовая доля P_2O_5 в исходных хвостах, % 9,0–9,8

Расход реагентов, г/т питания флотации:

Собиратель ЖКТМ 100

Собиратель MD 20542 730

Неонол 150

Кальцинированная сода 1000

Жидкое стекло 80

Показатели флотации:

Содержание P_2O_5 в концентрате, % 37,1

Извлечение P_2O_5 от потока исходных лежалых хвостов, % 45,0

Результаты укрупненных испытаний процесса флотации с промпродуктовым циклом, приведенные в табл. 3, показали, что разработанная схема и технология обогащения тонких лежалых хвостов хвостохранилища, содержащих до 90 % классов менее 0,071 мм, с использованием в качестве собирателя апатита смеси амфотерного реагента MD 20542 и ЖКТМ и выделением в отдельный цикл флотации промпродуктов позволяет получить кондиционный апатитовый концентрат.

Разработанная схема и реагентный режим обогащения хвостов подпродуктовой зоны (из наиболее труднообогатимой части техногенного месторождения) позволили достичь приемлемых результатов: извлечение P_2O_5 составило 45 % (от исходного питания), а массовая доля P_2O_5 в апатитовом концентрате составила 37,1 %, что на 0,5 и 1,5 % выше, чем при использовании исходной схемы и технологии.

Разработанный реагентный режим и схема флотации были включены в регламент переработки лежалых хвостов Ковдорского ГОКа и реализованы на действующей обогатительной фабрике, где обеспечили повышение извлечения P_2O_5 на 1,5 %.

Выводы. Для повышения показателей флотации за счет снижения неселективной флокуляции разработаны схема и режим подготовки шламового продукта, предполагающие его сгущение с использованием флокулянта Праестол-2540 и дефлокуляцию сгущенного продукта добавками сульфит-спиртовой барды, кальцинированной соды и реагента Неонол АФ 9-8. Использование загрузки реагентов-диспергаторов в добавляемый во флотацию песков шламовый продукт позволяет за счет разрушения неселективных флокул повысить эффективность апатитовой флотации и повысить содержание и извлечение P_2O_5 в концентрат при переработке ошламованных лежалых хвостов на 1,35 и 1,7 % соответственно. По результатам исследований обосновано применение при флотации апатита смеси собирателей, состоящей из 20 % жирнокислотной фракции талового масла и 80 % MD 20542. Для повышения извлечения P_2O_5 в концентрат обоснована

организация отдельного цикла флотации промпродуктов. Проведенными полупромышленными испытаниями показано, что разработанная схема и реагентный режим подготовки и флотации наиболее труднообогатимой части техногенного месторождения позволяют повысить содержание P_2O_5 в апатитовом концентрате на 0,5 % и извлечения P_2O_5 на 1,5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В. А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // Горный журнал. 2017. № 11. С. 7–13.
2. Трубецкой К. Н. Основные направления и пути решения проблем ресурсосбережения при комплексном освоении недр // Маркшейдерия и недропользование. 2010. № 3. С. 22–29.
3. Архипов А. В., Решетняк С. П. Техногенные месторождения. Разработка и формирование / под науч. ред. акад. Н. Н. Мельникова. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.
4. Белобородов В. И., Захарова И. Б., Андронов Г. П. Перспективы развития фосфорсодержащей минерально-сырьевой базы ОАО «Ковдорский ГОК» // Горный журнал. 2010. № 9. С. 73–77.
5. Брыляков Ю. Е., Гершенкоп А. Ш., Лыгач В. Н. Современное состояние и основные направления развития технологии глубокой и комплексной переработки фосфорсодержащих руд // Горный журнал. 2007. № 2. С. 30–38.
6. He H., Wang W., Li R., Yu L. Study on flotation of scrubbed tailings from phosphate ore // Ind. Miner. Process. 2015. No. 11. P. 4–10.
7. Yaoyang Ruan, Dongsheng He, Ruan Chi. Review on beneficiation techniques and reagents used for phosphate ores. Minerals. 2019. No. 9. P. 1–18.
8. Козин В. З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984. 113 с.
9. Рубинштейн Ю. Б., Филиппов Ю. А. Кинетика флотации. М.: Недра, 1980. 375 с.
10. Barmin I. S., Tugolukov A. V., Morozov V. V., Polivanskaya V. V. Analysis of the causes of apatite losses in the flotation of ores and technogenic products // Proceedings of IMPC 2018, Moscow, Russia. 2018. P. 2486–2496.
11. Kawatra S. Komar, Carlson J. T. Beneficiation of phosphate ore // Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood, Colorado, USA. 2014. 154 p.
12. Пестряк И. В. Обоснование и разработка эффективных методов кондиционирования оборотных вод обогатительных предприятий // ГИАБ. 2018. № 7. С. 153–159.
13. Иванова В. А., Митрофанова Г. В. Особенности флотации апатита из складированных отходов обогащения апатит-нефелиновой руды // ГИАБ. 2012. № 5. С. 135–141.

Поступила в редакцию 26 апреля 2020 года

Сведения об авторах:

Бармин Игорь Семенович – кандидат технических наук, главный обогатитель ОАО «Минерально-химическая компания «Еврохим». E-mail: igor.barmin@eurochem.ru

Морозов Валерий Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». E-mail: dchmgu@mail.ru

Поливанская Валерия Владимировна – доцент кафедры общей и неорганической химии Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». E-mail: vpolivanskaya@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-56-65

Improving the technology of mature tailings processing at the Kovdorsky GOK

Igor S. Barmin¹, Valerii V. Morozov², Valeriia V. Polivanskaya²

¹ MCC EuroChem, Moscow, Russia.

² National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia.

Abstract

Introduction. Phosphate minerals are lost during flotation of mature tailings of the Kovdorsky GOK due to difficult mineral fractions and poor conditions for effective flotation of thin classes of phosphate minerals.

Research aims to increase the efficiency of raw material processing at the technogenic deposit of the Kovdorsky GOK by optimizing the reagent regime and the scheme of dressing thin classes of mature tailings with the use of modern reagents-flocculants, selective depressors and collectors.

Methodology. The developed regime of sludge preparation for flotation involves their thickening using the Praestol-2540 flocculant, condensed sludge product processing with a mixture of dispersant reagents (SSB, sodium carbonate and Neonol AF 9-8), its additional thickening, followed by combining the resulting

sediment with the sand part of the tailings, their conditioning with the collector and feeding to the combined flotation with the use of the integrated collector according to the scheme with the middlings cycle.

Results. The scheme and reactant regime of enrichment tailings of complex parts of technological fields has allowed to achieve recovery of P_2O_5 45% (from power source) and the mass fraction of P_2O_5 in Apatite of 37.1%, or 0.5 and 1.5% higher than when using the design scheme and technology.

Summary. The developed technology of mature tailings processing at the Kovdorsky GOK ensures increased indicators of processing by means of creating the conditions for efficient flotation of fine classes of phosphate minerals.

Key words: stored tailings; apatite; sludge; thickening; defloculation; flotation; dispersants; flocculants; collectors.

REFERENCES

1. Chanturiia V. A. Scientific substantiation and development of innovative approaches to integrated mineral processing. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2017; 11: 7–13. (In Russ.)
2. Trubetskoi K. N. Main directions and ways of solving the problems of resource saving during integrated development of mineral resources. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2010; 3: 22–29. (In Russ.)
3. Arkhipov A. V., Reshetniak S. P., Melnikov N. N. (ed.) *Technogenic deposits. Development and generation*. Apatity: KSC RAS Publishing; 2017. (In Russ.)
4. Beloborodov V. I., Zakharova I. B., Andronov G. P. Prospects of development the phosphorus-containing mineral raw material base at ojsc "Kovdorsky mining and concentrating complex". *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2010; 9: 73–77. (In Russ.)
5. Bryliakov Iu. E., Gershenkop A. Sh., Lygach V. N. Current state and main directions of developing the technology of deep and integrated processing of phosphorus-containing ore. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2007; 2: 30–38. (In Russ.)
6. He H., Wang W., Li R., Yu L. Study on flotation of scrubbed tailings from phosphate ore. *Ind. Miner. Process*. 2015; 11: 4–10.
7. Yaoyang Ruan, Dongsheng He, Ruan Chi. Review on beneficiation techniques and reagents used for phosphate ores. *Minerals*. 2019; 9: 1–18.
8. Kozin V. Z. *Experimental simulation and optimization of mineral processing*. Moscow: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)
9. Rubinshtein Iu. B., Filippov Iu. A. *Flotation kinetics*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)
10. Barmin I. S., Tugolukov A. V., Morozov V. V., Polivanskaya V. V. Analysis of the causes of apatite losses in the flotation of ores and technogenic products. *Proceedings of IMPC 2018*, Moscow, Russia. 2018. P. 2486–2496.
11. Kawatra S. Komar, Carlson J. T. Beneficiation of phosphate ore. *Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood, Colorado, USA*. 2014. 154 p.
12. Pestriak I. V. Development and justification of efficient methods for recycling water conditioning at processing plants. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 7: 153–159. (In Russ.)
13. Ivanova V. A., Mitrofanova G. V. Characteristic features of apatite flotation from stored washery refuse of apatite-nepheline ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012; 5: 135–141.

Received 26 April 2020

Information about authors:

Igor S. Barmin – PhD (Engineering), Chief ore enrichment specialist, MCC EuroChem. E-mail: igor.barmin@eurochem.ru

Valerii V. Morozov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, National University of Science and Technology MISIS. E-mail: dchmggu@mail.ru

Valeriia V. Polivanskaia – Associate professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, National University of Science and Technology MISIS. E-mail: vpolivanskaya@mail.ru

Для цитирования: Бармин И. С., Морозов В. В., Поливанская В. В. Анализ и совершенствование технологии обогащения лежалых хвостов Ковдорского ГОКа // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 56–65. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-56-65

For citation: Barmin I. S., Morozov V. V., Polivanskaia V. V. Improving the technology of mature tailings processing at the Kovdorsky GOK. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 5: 56–65 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-56-65