

УДК 622.765

**ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ ТОНКОЗЕРНИСТЫХ ХВОСТОВ ПЕРЕРАБОТКИ  
МАГНЕТИТ-АПАТИТОВОЙ РУДЫ КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**Г. В. Митрофанова<sup>1</sup>, Ю. П. Поспелова<sup>1</sup>, Д. Ф. Сединин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Горный институт КНЦ РАН, E-mail: y.pospelova@ksc.ru,  
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup>АО “Ковдорский ГОК”, E-mail: Dmitry.Sedinin@eurochem.ru,  
ул. Сухачева, 5, 184141, г. Ковдор, Россия

Представлены результаты лабораторных исследований обогатимости тонкозернистых лежалых хвостов Ковдорского ГОКа. Исследованы действия реагентов-собирателей жирных кислот таллового масла (ЖКТМ). Методом беспенной флотации показана высокая селективность реагента Berol-2015 по отношению к апатиту. По результатам лабораторных флотационных испытаний установлено, что при использовании собирателя ЖКТМ содержание  $P_2O_5$  в концентрате не превышает 24.4 %, несмотря на высокую степень обесшламливания питания флотации (~70.0 %). При работе с собирателем Berol-2015 получен концентрат с содержанием 35.0–37.7 %  $P_2O_5$  без предварительного обесшламливания.

*Хвостохранилище, тонкозернистые лежалые хвосты, обесшламливание, флотация апатита и кальцита, беспенная флотация, реагенты-собиратели, сгущение, шламы*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230513

В современных условиях на предприятиях горно-перерабатывающей отрасли все больше рассматривают складированные отходы обогащения как источник расширения своей минерально-сырьевой базы [1, 2]. Переработка таких техногенных месторождений интересна с точки зрения получения дополнительных объемов выпускаемой продукции и с позиции снижения негативного влияния на окружающую среду огромных площадей хвостохранилищ [3–5]. АО “Ковдорский ГОК” первым приступило к освоению своего хвостохранилища и имеет успешный опыт переработки фосфорсодержащих лежалых хвостов обогащения, полученных в начальный период работы предприятия.

В процессе отработки техногенного месторождения выявлены основные проблемы, возникающие при обогащении такого рода сырья. Ввиду естественной сегрегации сырье более глубоких горизонтов хвостохранилища представляет собой тонкую минеральную фракцию. Для материала с содержанием 50 % класса –0.071 мм отмечаются трудности с получением кондиционного апатитового концентрата [6]. Флотация тонкодисперсного материала характеризуется низкой селективностью разделения, механическим выносом в пену частиц крупностью менее 10 мкм [7], низкой скоростью флотации тонких частиц. Согласно [8], шламы (–10 мкм) фосфатных минералов имеют скорость флотации в 2.75 раза ниже, чем частицы

флотационного класса крупности  $-0.074 + 0.02$  мм. Важный фактор, способствующий повышению эффективности обогащения тонкозернистого минерального сырья, — оптимизация ключевых гидродинамических параметров: плотности пульпы; расхода воздуха; скорости вращения импеллера флотомашин [9].

В технологических схемах, разработанных для обогащения тонкозернистого материала, применяется предварительное сгущение шламовых фракций с помощью флокулянтов и возвращение их обратно в процесс [10]. При этом обязательно проводится оценка влияния используемых полимеров на флотационный процесс. Кроме этого, значимую роль играют используемые при флотации реагенты-диспергаторы тонких частиц, собиратели, депрессоры [11, 12]. Реагенты-диспергаторы, в качестве которых выступают этоксилаты изононилфенолов [13], кальцинированная сода или лигносульфонаты [10, 14], способствуют разрушению неселективно сфлуктурированных минеральных комплексов. Это обеспечивает рост извлечения фосфатных минералов и качество концентратов, получаемых из сильно ошламованных лежалых хвостов.

Оксиэтилированные алкилфенолы или алифатические спирты — обязательная составная часть реагентного режима при флотации апатит-карбонатных руд [15, 16]. В качестве собирателя используются жирные кислоты таллового масла. Применение ЖКТМ в сочетании с оксиэтилированным цетиловым спиртом при флотации тонкозернистого апатит-карбонатного минерального сырья с содержанием более 85.0 % класса  $-36$  мкм позволило получить после двух перемешиваний апатитовый концентрат с качеством 31.2 %  $P_2O_5$  при извлечении 45.5 % от питания флотации [17].

В настоящей работе показана возможность повышения эффективности флотационного разделения тонкозернистого техногенного минерального сырья, отобранного с нижних горизонтов хвостохранилища обогатительной фабрики АО «Ковдорский ГОК», с помощью селективно действующих реагентов-собирателей.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на пробе тонких хвостов подпрудковой части поля хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК». Основные компоненты в исходной пробе составили, %:  $P_2O_5$  — 8.96;  $CO_2$  — 14.54;  $MgO$  — 19.24;  $SiO_2$  — 12.63. Минеральный состав пробы тонких хвостов Ковдорского ГОКа приведен ниже:

| Минерал         | Содержание, % масс. |
|-----------------|---------------------|
| Магнетиты       | 1.58                |
| Фторapatит      | 18.58               |
| Бадделит        | 0.64                |
| Слюды           | 14.72               |
| Форстерит       | 5.41                |
| Серпентин       | 8.23                |
| Клиногумит      | 5.81                |
| Карбонаты       | 24.43               |
| Пироксены       | 4.44                |
| Шорломит        | 3.15                |
| Мелилит-геленит | 0.95                |
| Перовскит       | 1.36                |
| Хлориты         | 1.71                |
| Амфиболы        | 5.78                |
| Сульфиды        | 2.35                |
| Ильменит        | 0.86                |
| Итого           | 100.00              |

Содержание класса  $-0.071$  мм в пробе составило 94.4 %, класса  $+0.16$  мм — 1.4 % (табл. 1). В качестве собирателей рассматривались жирные кислоты таллового масла (Сегежский ЦБК) и реагент Berol-2015 (Nouryon), представляющий собой смесь N-ацилированных производных саркозина и неионогенного ПАВ. Реагентом-регулятором выступал оксиэтилированный изононилфенол с 6 оксиэтильными группами Неонол 9-6 (АО “Нижнекамскнефтехим”), используемый в технологии получения апатитового концентрата на АО “Ковдорский ГОК” в составе реагентной смеси. Кальцинированная сода ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и жидкое стекло ( $\text{Ж}_{\text{ст}}$ ) применялись в качестве диспергирующих агентов и депрессоров. Необходимый уровень pH обеспечивался добавлением соды и гидроксида натрия NaOH. С целью обновления поверхности вводилась операция оттирки, в результате которой содержание класса  $-0.028$  мм увеличилось с 64.9 до 74.2 % (табл. 1). Около 96.0 % апатита сконцентрировалось в классе  $-0.071$  мм.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрические характеристики пробы тонких хвостов до и после оттирки, %

| Класс крупности, мм | Выход             |               |
|---------------------|-------------------|---------------|
|                     | Исходный материал | После оттирки |
| $+0.16$             | 1.4               | 0.2           |
| $-0.16+0.10$        | 1.7               | 0.6           |
| $-0.10+0.071$       | 2.5               | 1.8           |
| $-0.071+0.05$       | 5.1               | 4.2           |
| $-0.05+0.036$       | 6.2               | 5.5           |
| $-0.036+0.028$      | 18.2              | 13.5          |
| $-0.028$            | 64.9              | 74.2          |
| Итого               | 100.0             | 100.0         |

После оттирки проводилось обесшламливание, степень которого варьировалась. Операции измельчения и дешламации велись с использованием оборотной воды АБОФ АО “Ковдорский ГОК”. Флотационные опыты в открытом цикле при температуре  $18-20$  °C включали основную флотацию (ОФ) и 3–6 перечистных операций (ПФ) на “смешанной флотоваде”, когда оборотная и водопроводная вода смешивались в соотношении 1:1. Содержание ионов жесткости в оборотной воде в период исследований составляло  $24-40$  мг/л  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $23-35$  мг/л  $\text{Mg}^{2+}$ .

Минеральный состав исходного сырья определялся рентгенофазовым методом на порошковом рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (Bruker AXS GmbH, Германия). Результаты флотации оценивались по выходу концентрата  $\gamma$ , содержанию  $\text{P}_2\text{O}_5$  в пенных продуктах  $\beta$  и извлечению  $\text{P}_2\text{O}_5$   $\varepsilon$ . Беспенная флотация в трубке Халимонда осуществлялась на мономинеральных фракциях апатита и кальцита, выделенных из руды Ковдорского месторождения и измельченных до крупности  $-0.16+0.10$  мм (pH флотации 10.1–10.3). Время агитации минерала с регулятором (0.1 % раствор NaOH) — 1 мин, с собирателем — 2 мин. Время флотации 3 мин, скорость подачи воздуха 5.3 мл/мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При флотации сырья с большим содержанием частиц тонких классов принято проводить предварительное обесшламливание [18]. Ввиду этого рассмотрена флотация апатита из исследуемого сырья при разном количестве сбрасываемых шламов. На рис. 1 приведены результаты, полученные на смешанной флотоваде после трех перечисток пенного продукта основной флотации. Содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  в шламах составило  $\sim 9.15$  %, расход ЖКТМ — 120 г/т, Неонола 9-6 — 100 г/т, жидкого стекла — 300 г/т, соды — 500 г/т.

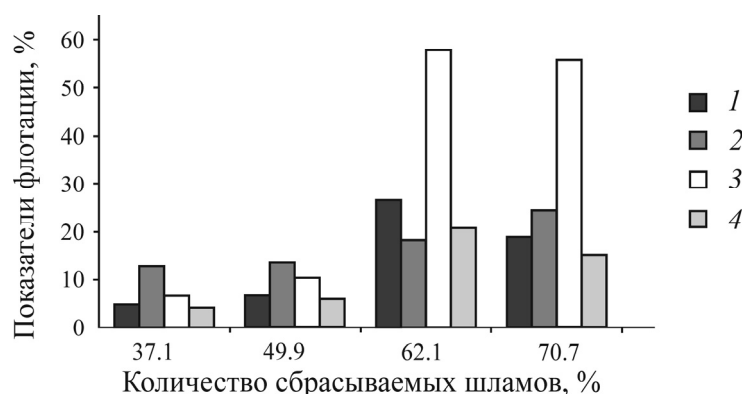


Рис. 1. Показатели флотации апатита собирателем ЖКТМ на смешанной воде при разном количестве сбрасываемых шламов на оборотной воде: 1 — выход; 2 — содержание  $P_2O_5$ ; 3 — извлечение  $P_2O_5$  от питания; 4 — извлечение  $P_2O_5$  от руды. Расход реагентов, г/т: сода — 500;  $J_{ст}$  — 250; Неонол 9-6 — 100; ЖКТМ — 120; pH 9.2

Как видно из полученных результатов, селективного разделения апатита и сопутствующих минералов при использовании ЖКТМ не происходит. Отмечена активная флотация апатит-силикат-карбонатного минерального комплекса, трехкратная перечистка которого не позволяет получить пенный продукт с содержанием  $P_2O_5$  более 24 %. Увеличение сбрасываемых шламов при одинаковом расходе реагентов позволяет несколько повысить качество пенного продукта, при этом возрастают потери  $P_2O_5$  (рис. 1). Увеличение расхода собирателя с целью повысить выход концентрата не дает ожидаемого результата.

При вовлечении большего количества шламов во флотацию объем пены в основной операции увеличивается, пена становится более устойчивой к разрушению. При расходе ЖКТМ 400 г/т и количестве сбрасываемых шламов менее 70 % пена практически не разрушается, перечистку вести невозможно. Увеличение расхода соды до 2000 г/т не приводит к улучшению показателей.

Вследствие невысокой селективности жирных кислот в качестве альтернативного рассмотрен реагентный режим на основе реагента из класса N-ацилированных производных саркозина — Berol-2015 (Nouryon). Известна практика использования N-ацилированных производных аминокислот для разделения апатит-карбонатного комплекса [19]. Реагент Berol-2015 представляет собой эффективный собиратель при разделении тонких частиц [8, 20, 21].

Предварительные флотационные испытания показали более высокую селективность этого реагента по сравнению с ЖКТМ. Из табл. 2 видно, что уже в основной флотации получается пенный продукт с содержанием 18–21 %  $P_2O_5$ . Содержание  $P_2O_5$  в пенном продукте третьей перечистки составляет 29.3–33.6 % по сравнению с 24.4 %  $P_2O_5$  при использовании ЖКТМ. Однако расходы Berol-2015 значительно превышают расходы жирнокислотного собирателя. Следует отметить, что реагентная смесь совместно с собирателем Berol-2015 включала также регулятор Неонол 9-6. Несмотря на то, что в состав реагента Berol-2015 входит некоторое количество неионогенного компонента, при использовании для флотации собирателя без регулятора получены более низкие показатели как по качеству, так и по извлечению апатитового концентрата, по сравнению с вариантом совместного использования собирателя и реагента Неонол 9-6.

ТАБЛИЦА 2. Результаты флотации тонких хвостов на оборотной воде с помощью реагента Berol-2015

| Выход<br>шламов,<br>% | Расход реагентов, г/т           |                 |            |             | Пенный ОФ, %     |                   |         | Пенный ПФ-3, %   |                   |         |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------|------------|-------------|------------------|-------------------|---------|------------------|-------------------|---------|
|                       | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Ж <sub>ст</sub> | Неонол 9-6 | Berol-2015  | $\beta_{P_2O_5}$ | $\varepsilon$ , % |         | $\beta_{P_2O_5}$ | $\varepsilon$ , % |         |
|                       |                                 |                 |            |             |                  | от питания        | от руды |                  | от питания        | от руды |
| 39.1                  | 300                             | 500             | 300        | <b>2000</b> | 17.95            | 76.90             | 46.20   | <b>29.35</b>     | 41.80             | 25.10   |
| 37.9                  | 300                             | 1000            | 200        | <b>2000</b> | 19.83            | 74.00             | 45.40   | <b>31.15</b>     | 45.80             | 28.10   |
| 32.4                  | 1000                            | 1000            | 300        | <b>1750</b> | 21.55            | 72.60             | 48.50   | <b>33.60</b>     | 48.10             | 32.20   |
| 30.2                  | 1000                            | 1000            | 300        | <b>2000</b> | 20.93            | 74.60             | 51.60   | <b>32.42</b>     | 47.80             | 33.10   |

Согласно [17], увеличение расхода депрессора жидкого стекла до 3000 г/т или использование кукурузного крахмала в количестве 1000 г/т в сочетании с жирными кислотами, оксиэтилированным цетиловым спиртом и Монтанолом в качестве вспенивателя не позволяет получить высокие показатели апатитовой флотации (содержание  $P_2O_5$  в концентрате составило всего 23.0 %). Предварительной оттиркой пробы и удалением 22.0 % шламов получен концентрат с содержанием 28.4 %  $P_2O_5$  при извлечении 44.1 %. Использование колонной флотомашины и удаление 25.0 % шламов дало возможность повысить качество концентрата до 31.2 % при извлечении 45.5 %  $P_2O_5$  от операции [17].

Оценка влияния расхода депрессора показала, что оптимальный расход жидкого стекла составляет 1000 г/т. Повышение расхода депрессора до 1500 кг/т не приводит к значимому улучшению показателей.

Показатели флотации исследуемого техногенного сырья коррелируют с результатами беспенной флотации мономинеральных фракций. Из рис. 2 видно, что олеат натрия активно флотирует кальцит, выход в пенный продукт которого при равном расходе собирателя выше, чем апатита. При этом реагент Berol-2015, в молекуле которого имеются две функциональные группировки, проявляет более высокую избирательность взаимодействия с апатитом.

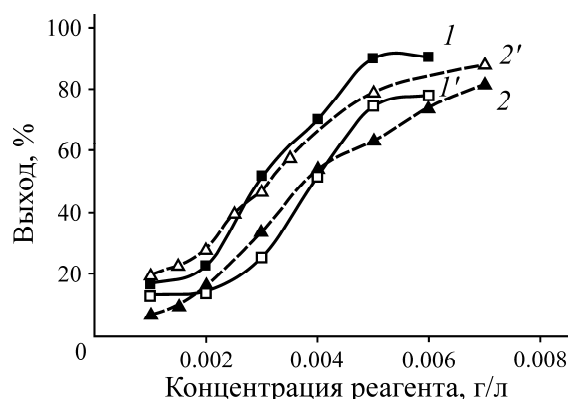


Рис. 2. Результаты беспенной флотации мономинеральных фракций апатита (1, 2) и кальцита (1', 2') реагентами Berol-2015 (1, 1') и OINa (2, 2')

Оценка влияния pH на эффективность флотации тонких хвостов реагентом Berol-2015 показала, что при pH 10.5 достигается более высокое извлечение  $P_2O_5$  (рис. 3). При фиксированном расходе соды заданное значение pH создавали добавлением раствора NaOH.

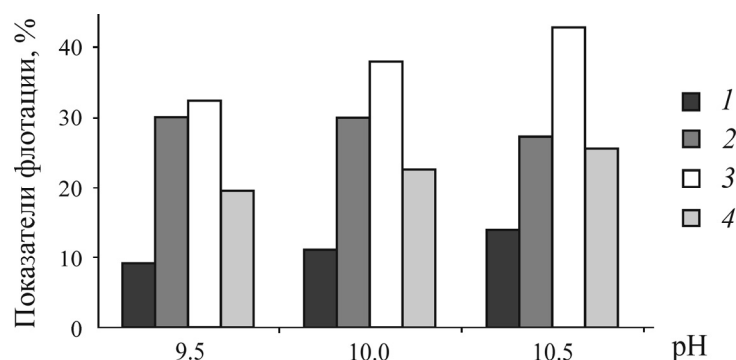


Рис. 3. Результаты флотации апатита реагентом Berol-2015 (2500 г/т) в зависимости от pH: 1 — выход; 2 — содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 3 — извлечение P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от питания; 4 — извлечение P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от руды. Расход, г/т: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> — 300, Ж<sub>ст</sub> — 500, Неонол 9-6 — 200; выход шламов ~ 40 %

Отличительная характеристика реагента Berol-2015 — способность селективно флотировать тонкие частицы, что проявляется в операции основной флотации. В случае с ЖКТМ пена плохо поддается разрушению, а при использовании Berol-2015 пенный слой удается разрушить, в результате чего более эффективно идут перечистные операции. Применение этого собирателя позволяет получать более высокие по сравнению с ЖКТМ показатели и без проведения обесшламливания (табл. 3). Лучшие показатели по содержанию P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (33.6–35.6 % в концентрате третьей перечистки) получены при расходе собирателя 1750 г/т. Увеличение расхода до 2500 г/т привело к небольшому снижению качества концентрата при повышении извлечения.

ТАБЛИЦА 3. Результаты флотации апатита с использованием реагента Berol-2015 (pH 10.5)

| Выход<br>шламов, % | Расход реагентов, г/т           |                 |            |            | Пенный ПФ-3, %                |                        |         |
|--------------------|---------------------------------|-----------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------|---------|
|                    | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Ж <sub>ст</sub> | Неонол 9-6 | Berol-2015 | $\beta$                       | $\varepsilon_{P_2O_5}$ |         |
|                    |                                 |                 |            |            | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | от питания             | от руды |
| —                  | 1000                            | 1000            | 200        | 1750       | 33.83                         | 30.20                  | 30.20   |
| 19.3               |                                 |                 |            |            | 35.60                         | 31.10                  | 25.00   |
| 33.8               |                                 |                 |            |            | 32.46                         | 41.40                  | 27.10   |
| —                  | 1000                            | 1000            | 300        | 2000       | 33.01                         | 27.30                  | 27.30   |
| 19.2               |                                 |                 |            |            | 32.89                         | 39.80                  | 32.00   |
| 30.2               |                                 |                 |            |            | 32.42                         | 47.80                  | 33.10   |
| 36.7               |                                 |                 |            |            | 31.71                         | 46.20                  | 28.90   |
| 49.4               |                                 |                 |            |            | 29.48                         | 49.40                  | 24.50   |
| —                  | 300                             | 1000            | 200        | 2500       | 30.28                         | 33.10                  | 33.10   |
| 20.3               |                                 |                 |            |            | 29.35                         | 46.40                  | 36.80   |
| 30.8               |                                 |                 |            |            | 29.42                         | 52.70                  | 36.10   |
| 37.3               |                                 |                 |            |            | 27.76                         | 52.70                  | 32.60   |
| 42.1               |                                 |                 |            |            | 26.50                         | 53.80                  | 30.70   |
| 48.3               |                                 |                 |            |            | 27.73                         | 50.80                  | 25.80   |

Сода используется при флотации карбонатных руд как реагент, способствующий диспергации тонких частиц [18, 22], причем в некоторых случаях расходы этого реагента достигают 3000 г/т. Однако на исследуемой пробе руды повышение расхода соды выше 1000 г/т нецелесообразно. При использовании реагента Berol-2015 наблюдается снижение выхода концентрата, в то время как качество концентрата повышается всего на 1 % (с 33.8 до 34.8 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). При флотации с применением ЖКТМ увеличение расхода соды привело к образованию устойчивой неразрушаемой пены, что не позволило провести перечистные операции (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Результаты флотации апатита в зависимости от расхода  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (расход  $\text{Ж}_{\text{ст}}$  1000 г/т, Неонол 9-6 200 г/т)

| Выход<br>шламов,<br>% | $\text{pH}_{\text{оф}}$ | Расход реагентов, г/т    |                    | Пенный ОФ, %            |                                |                                                  | Пенный ПФ-3, %      |                                |                                              |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|
|                       |                         | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | Собиранель         | $\gamma$<br>от операции | $\beta_{\text{P}_2\text{O}_5}$ | $\epsilon_{\text{P}_2\text{O}_5}$<br>от операции | $\gamma$ от<br>руды | $\beta_{\text{P}_2\text{O}_5}$ | $\epsilon_{\text{P}_2\text{O}_5}$<br>от руды |
| —                     | 10.5                    | 1000                     | 1750<br>Berol-2015 | 29.70                   | 18.59                          | —                                                | 8.00                | 33.83                          | 30.20                                        |
| —                     |                         | 3000                     |                    | 31.20                   | 18.57                          | —                                                | 8.40                | 33.50                          | 31.40                                        |
| —                     |                         | 7000                     |                    | 26.10                   | 18.33                          | —                                                | 5.90                | 34.87                          | 23.00                                        |
| 40.8                  | 9.4                     | 3000                     | 100                | 27.40                   | 11.85                          | 36.80                                            | 6.90                | 18.57                          | 8.50                                         |
| 38.8                  | 10.0                    | 7000                     | ЖКТМ               | 29.50                   | 11.12                          | 37.10                                            | —                   | —                              | —                                            |

Относительно высокое извлечение  $\text{P}_2\text{O}_5$  в концентрат третьей перечистки при использовании Berol-2015 в оптимальном соотношении с реагентами-регуляторами позволило провести опыты с 4–6 перечистками пенного продукта основной флотации. В результате получены концентраты с содержанием 35.0–37.7 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  при извлечении от руды 20.4–29.7 % в зависимости от реагентного режима (табл. 5). Содержание лимитирующей примеси  $\text{MgO}$  в этих концентратах составило 1.5–2.5 %. В таблице также приведены расчетные значения извлечения  $\text{P}_2\text{O}_5$  в концентрат с содержанием 36.5 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

ТАБЛИЦА 5. Результаты флотации апатита с 4–6 перечистками с помощью Berol-2015 ( $\text{pH}_{\text{оф}}$  10.5)

| Выход<br>шламов,<br>% | Расход реагентов, г/т    |                        |            |            | Пенный ПФ, % |          |                        |              |                                              |                                                                     |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|------------|------------|--------------|----------|------------------------|--------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|                       | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | $\text{Ж}_{\text{ст}}$ | Неонол 9-6 | Berol-2015 | Перечистка   | $\gamma$ | $\beta$                |              | $\epsilon_{\text{P}_2\text{O}_5}$<br>от руды | $\epsilon_{\text{P}_2\text{O}_5}$ от руды<br>в 36.5 %<br>концентрат |
|                       |                          |                        |            |            |              |          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MgO}$ |                                              |                                                                     |
| —                     | 1000                     | 1000                   | 200        | 1750       | 5            | 5.2      | 37.70                  | 1.5          | 21.9                                         | 25.2                                                                |
| —                     | 1000                     | 1000                   | 300        | 2500       | 6            | 7.2      | 36.93                  | 2.1          | 29.7                                         | 30.8                                                                |
| —                     | 3000                     | 1000                   | 200        | 1750       | 5            | 6.2      | 36.94                  | 1.8          | 25.6                                         | 27.0                                                                |
| —                     | 7000                     | 1000                   | 200        | 1750       | 4            | 4.9      | 37.38                  | 1.6          | 20.4                                         | 23.0                                                                |

Моделирование использования лучшего реагентного режима в замкнутом цикле показало, что при использовании реагента Berol-2015 выход концентрата с содержанием 36.9 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  может составить около 9.0 % от исходных хвостов при извлечении на уровне 38.0 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

## ВЫВОДЫ

Исследована обогатимость тонкозернистых лежалых хвостов переработки магнетит-апатитовой руды Ковдорского месторождения. Показана высокая эффективность и селективность действия собирателя из класса ацилированных аминокислот Berol-2015. Использование реагента Berol-2015 в сочетании с регулятором Неонол 9-6 в оптимальном соотношении позволило получить апатитовый концентрат с содержанием 35.0–37.7 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  при извлечении руды от 20.4 до 29.7 %. Лимитирующая примесь  $\text{MgO}$  в концентратах составила 1.5–2.5 %.

Авторы благодарят в.н.с. Горного института КНЦ РАН, к.т.н. В. В. Марчевскую за проведение минералогического анализа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья // Горн. журн. — 2008. — № 6. — С. 71–74.
2. Ежов А. И. Оценка техногенного сырья в Российской Федерации (твердые полезные ископаемые) // Горные науки и технологии. — 2016. — № 4. — С. 62–72.
3. Melnikov N., Gromov E., Skorokhodov V., Mesyats S., and Mitrofanova G. Ecological strategy of mining development: modern approach to Arctic mineral resource exploitation, 16<sup>th</sup> Int. Multidisciplinary Sci. Geoconf. “SGEM 2016” (Bulgaria, Albena), 30 June – 6 July 2016, Book 1: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, 2016, Vol. 2. — P. 357–364.
4. Nevskaya M. A., Seleznev S. G., Masloboev V. A., Klyuchnikova E. M., and Makarov D. V. Environmental and business challenges presented by mining and mineral processing waste in the Russian Federation, Minerals, 2019, Vol. 9. — 445.
5. Сизяков В. М., Назаров Ю. П., Бричкин В. Н., Сизякова Е. В. Обогащение лежалых хвостов флотации апатит-нефелиновых руд // Обогащение руд. — 2016. — № 2. — С. 33–39.
6. Белобородов В. И., Захарова И. Б., Андронов Г. П., Филимонова Н. М., Бармин И. С. Опыт обогащения техногенного фосфорсодержащего сырья в ОАО “Ковдорский ГОК” // Горн. журн. — 2010. — № 9. — С. 96–97.
7. Кузькин А. С., Пуговкина В. И. О механическом переходе минералов различной крупности в пенный продукт флотации // Флотация тонковкрапленных руд. — Л.: Наука, 1985. — С. 103–110.
8. Бармин И. С., Морозов В. В., Поливанская В. В. Анализ и совершенствование технологии обогащения лежалых хвостов Ковдорского ГОКа // Горн. журн. — 2020. — № 5. — С. 56–65.
9. Hoang D. H., Hassanzadeh A., Peuker U. A., and Rudolph M. Impact of flotation hydrodynamics on the optimization of fine-grained carbonaceous sedimentary apatite ore beneficiation, Powder Technol., 2019, Vol. 345. — P. 223–233.
10. Морозов В. В., Поливанская В. В. Повышение эффективности флотации апатит-штаффелитовых руд с применением режима двухстадиального сгущения шламов // Руды и металлы. — 2021. — № 4. — С. 121–131.
11. 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 // Горн. журн. — 2019. — № 1. — С. 56–60.
12. Ruan Y., He D., and Chi R. Review on beneficiation techniques and reagents used for phosphatic ores, Minerals, 2019, Vol. 9. — P. 1–18.
13. Иванова В. А., Митрофанова Г. В., Перункова Т. Н. Повышение эффективности действия низкооксигенированных алкилфенолов как регуляторов селективной флотации несulfидных руд // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 136–142.
14. Лавриненко А. А., Шрадер Э. А., Харчиков А. Н., Кунилова И. В. Флотируемость апатита из бадделеит-apatит-магнетитовой руды // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 157–165.
15. Teague A. J. and Lollback M. C. The beneficiation of ultrafine phosphate, Miner. Eng., 2012, Vol. 27–28. — P. 52–59.
16. Ivanova V. A., Mitrofanova G. V., Perunkova T. N., and Dorozhanova N. O. Oxyethylated compounds as regulators of selective flotation of apatite-containing ore, XXIX Int. Mineral Proc. Congress: Innovative technologies are key to successful mineral processing, 17–21 September 2018, Moscow. — P. 138–139.
17. Severov V. V., Filippova I. V., and Filippov L. O. Use of fatty acids with an ethoxylated alcohol for apatite flotation from old fine-grained tailings, Miner. Eng., 2022, Vol. 188. — 10783215.

18. **Xin Liu, Yimin Zhang, Tao Liu, Zhenlei Cai, and Kun Sun.** Characterization and separation studies of a fine sedimentary phosphate ore slime, *Minerals*, 2017, Vol. 7. — 94.
19. **Abdel-Halim M. M., Abdel Khalek M. A., Zheng R., and Gao Zh.** Sodium N-Lauroylsarcosinate (SNLS) as a selective collector for calcareous phosphate beneficiation, *Minerals*, 2022, Vol. 12, No. 7. — 829.
20. **Patra A., Taner H., Bordes R. et al.** Selective flotation of calcium minerals using double-headed collectors, *J. Dispersion Sci. Technol.*, 2019, Vol. 40, No. 8. — P. 1205 – 1216.
21. **Hoang D. H., Kupka N., Peuker U. A., and Rudolph M.** Flotation study of fine grained carbonaceous sedimentary apatite ore — Challenges in process mineralogy and impact of hydrodynamics, *Miner. Eng.*, 2018, Vol. 121. — P. 196 – 204.
22. **Foucaud Y., Filippova I. V., and Filippov L. O.** Investigation of the depressants involved in the selective flotation of scheelite from apatite, fluorite, and calcium silicates: Focus on the sodium silicate/sodium carbonate system, *Powder Technol.*, 2019, Vol. 352. — P. 501 – 512.

*Поступила в редакцию 01/VI 2023*

*После доработки 10/IX 2023*

*Принята к публикации 15/IX 2023*