

УДК 661.845, 669.725.3

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОГО КОНЦЕНТРАТА
И ГИДРОКСИДА БЕРИЛЛИЯ ИЗ ФЕНАКИТО-БЕРТРАНДИТОВОГО
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

В. Е. Матясова¹, Ю. М. Трубаков¹, А. В. Лаврентьев¹, А. В. Курков²

¹*Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии,
E-mail: info@vniiht.ru, Каширское шоссе, 33, 115409, г. Москва, Россия*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского,
E-mail: kurkov@vims-geo.ru, Старомонетный пер., 31, 119017, г. Москва, Россия*

Представлены результаты исследований и испытаний по получению бериллиевых концентратов высшего и технического сортов и товарного флюоритового концентрата из руды и техногенного сырья Ермаковского месторождения, содержащих трудноразделяемый жирнокислотной флотацией минеральный комплекс и отличающихся повышенным содержанием флюорита. Получение товарных флотационных концентратов основано на связывании кальция во флотационной пульпе с использованием соды, едкого натрия и триполифосфата натрия. Разработана автоклавно-мембранная технология получения из бериллиевых концентратов товарного гидроксида бериллия. Технология включает ряд последовательных операций: автоклавное вскрытие, разделение технологической суспензии после автоклавного вскрытия, очистку растворов от примесей, мембранный электродиализ щелочных растворов, гидролиз бериллата натрия с выделением гидроксида бериллия. Приведены результаты переработки полученных опытных партий бериллиевых концентратов по автоклавно-мембранной технологии.

Фенакит, берtrandит, флюорит, флотация, бериллиевый концентрат, автоклав, электролизер, флюоритовый концентрат, катионообменная мембрана, гидролиз, гидроксид бериллия

DOI: 10.15372/FTPRPI20180514

В последние десятилетия Россия утратила сырьевую и производственную независимость в получении соединений стратегического металла бериллия. Получение бериллиевых концентратов из рудного сырья прекращено с 1986 г., производственные мощности по их переработке остались за рубежом. В то же время потребность в минеральном сырье и редких металлах в мире растет. Это необходимо для высокотехнологического развития производств и перехода на цифровую экономику. В частности, уникальные свойства бериллия и материалов на его основе находят применение в атомной, аэрокосмической, электронной и других областях современной техники.

Для изготовления одного современного электронного чипа необходимо задействовать половину элементов периодической системы. Многие страны выделяют критические элементы для освоения возобновляемых видов энергии, создания наукоемких отраслей промышленности

и военной техники. К таким металлам относятся литий, бериллий, редкоземельные элементы и др. [1]. Для получения бериллия необходимо производство двух базовых продуктов — бериллиевого концентрата и гидроксида бериллия, из которых можно получить весь спектр бериллиевой продукции — лигатуры, сплавы, композиционные материалы, изделия из металлического бериллия (рис. 1). Номенклатура изделий насчитывает более 600 видов.

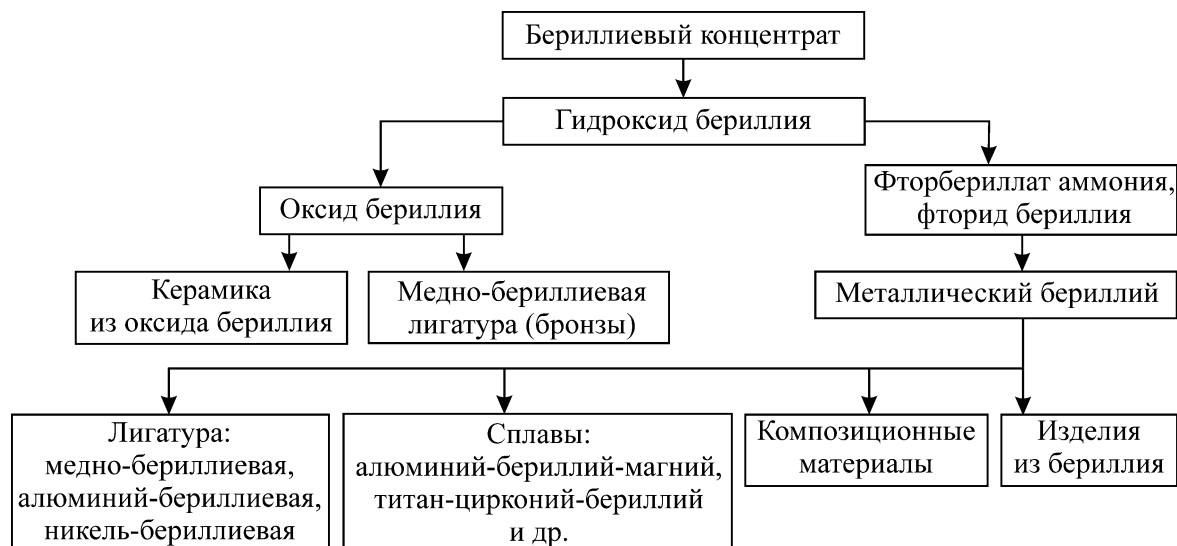


Рис. 1. Принципиальная схема получения базовой бериллиевой продукции

Производство бериллиевой продукции из рудного сырья осуществляется в США, Китае и Казахстане. Эти страны поставляют основной объем данной продукции остальному миру. Наибольшая доля бериллиевой продукции производится из руд месторождения Spor Mountain в штате Юта (предприятие Brush Wellman Mine). Ульбинский металлургический завод (Казахстан) испытывает большие трудности в обеспечении минеральным сырьем.

Наиболее перспективно для разработки Ермаковское месторождение, которое относится к одному из крупнейших в мире, состоит из руд фенакит-бертрандитового типа, отличающихся высоким содержанием бериллия. Оно может обрабатываться открытым способом с низкими затратами на добычу руды [2]. Одной из важных задач для освоения Ермаковского месторождения является создание технологической базы отечественного производства бериллиевых концентратов. Поставленная задача может быть решена на Забайкальском горно-обогатительном комбинате, где сохранилась инфраструктура предприятия по обогащению руд.

В рамках целевой программы ФЦП Минобрнауки РФ “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 гг.” Ведущим научно-исследовательским институтом (ВНИИ) химической технологии и Всероссийским научно-исследовательским институтом минерального сырья (ВИМС) выполнен комплекс исследований по получению бериллиевых концентратов из рудного и техногенного сырья Ермаковского месторождения и дальнейшему получению из них гидроксида бериллия по новой автоклавно-мембранной технологии.

Исследования проведены на пробах рудного сырья, отобранного из пятой залежи и техногенного сырья из отвалов месторождения. Исследованные пробы существенно различаются по содержанию оксида бериллия, флюорита, карбонатов и силикатов (табл. 1). Среднее содержание основных ценных компонентов на месторождении составляет BeO 1.19 и CaF₂ 24.6 %.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика проб рудного и техногенного сырья Ермаковского месторождения

| Химический компонент | Содержание, масс. % | | Минерал | Содержание, масс. % | |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|---|---------------------|-------------------|
| | Рудное сырье | Техногенное сырье | | Рудное сырье | Техногенное сырье |
| BeO | 1.55 | 0.62 | Минералы Be (фенакит, берtrandит) | 3.7 (1 : 1) | 1.4 (1 : 1) |
| SiO ₂ | 18.91 | 26.25 | Флюорит | 45.5 | 34.5 |
| TiO ₂ | 0.18 | 0.21 | Альбит | 7.5 | 7.1 |
| Al ₂ O ₃ | 5.67 | 6.22 | Микроклин | 11.9 | 4.8 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.13 | 4.16 | Кварц | 6.0 | 13.8 |
| FeO | <0.02 | <0.02 | Карбонаты (кальцит, доломит) | 7.0 | 20.1 |
| MnO | 0.72 | 2.44 | Слюды (флогопит, мусковит, биотит) | 3.2 | 3.9 |
| MgO | 1.46 | 0.98 | Амфиболы, пироксены | 4.0 | 2.6 |
| CaO | 39.34 | 30.24 | Везувиан | 1.1 | 1.2 |
| K ₂ O | 2.67 | 1.03 | Оксиды и гидроксиды железа (гематит, гетит, гидрогетит, лепидокрокит) | 3.5 | 3.6 |
| Na ₂ O | 0.80 | 0.78 | Хлорит | 4.3 | 4.5 |
| P ₂ O ₅ | 0.44 | 0.20 | Сульфиды (пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, молибденит) | 0.5 | 0.4 |
| S _{общ} | 0.50 | 0.70 | Оксиды и гидроксиды Mn (пирролюзит, псиломелан, криптомелан, бернессит) | 1.0 | 1.2 |
| CaF ₂ | 45.50 | 34.50 | Прочие (апатит, ярозит, сфен, рутил, циркон и др.) | ~0.8 | ~0.9 |
| H ₂ O | 0.03 | 0.22 | | | |
| CaCO ₃ | 6.85 | 13.47 | | | |

Пробы сходны по минеральному составу, различия лишь в количественном отношении того или иного минерала. Основной промышленный компонент руд — бериллий — заключен в двух бериллиевых минералах с высоким содержанием (42–45 % BeO) — берtrandите и фенаките, находящихся в пробах практически в равных количествах. Второй по значимости компонент флюорит присутствует в нескольких разновидностях (вкрапленные включения, колломорфные каймы, массивный жильный, сплошные метасоматические агрегаты и др.), отличающиеся морфологией выделения, размером обособления и содержанием элементов-примесей, что влияет на флотационные свойства флюорита и качество флюоритового концентрата.

Проба техногенного сырья имеет сложный вещественный состав и сформирована четырьмя разновидностями рудных метасоматитов, в различной степени подвергшимися окислению и выветриванию. В руде широко развиты структуры коррозии одних минералов другими. Бериллиевые минералы образуют сложные сростания с рудообразующими минералами: пойкилитовые (включения флюорита в зернах берtrandита и фенакита), коррозионные (берtrandит и фенакит корродируются флюоритом, кварцем и карбонатом, а также корродируют калиевый полевошпат). Такие сростания являются труднораскрываемыми.

Из особенностей минерального состава исследуемых проб, определяющих эффективность их обогащения флотационным методом, отметим следующее:

— наиболее полное обособление бериллиевых минералов происходит в классе крупности 0.071 мм;

— крупнокристаллический жильный флюорит (8 % от общего содержания) обособляется при крупности – 1 мм, метасоматический флюорит наибольшего раскрытия достигает при крупности 0.1 мм, что с учетом раскрытия бериллиевых минералов обуславливает необходимость тонкого помола;

— большое количество зерен флюорита, а также минералы, слагающие руду, пропитаны и покрыты тонкой пленкой оксидов железа и корками железомарганцевых соединений;

— пробы содержат высокое количество карбонатов, характеризующихся близкими флотационными свойствами [3] при использовании жирнокислотного собирателя [4] с бериллиевыми минералами и флюоритом.

Соотношение в руде количества бериллиевых минералов и флюорита, бериллиевых минералов и карбонатов, флюорита и карбонатов определяет построение схемы флотационного обогащения и эффективность селективного выделения товарной продукции из этих руд. Кроме того, руды содержат сульфиды, что при жестком ограничении содержания серы во флюоритовом концентрате предполагает, несмотря на низкое исходное содержание сульфидов, необходимость дополнительного передела в технологической схеме — сульфидной флотации.

Характерной особенностью исследованных проб является высокое содержание флотоактивного минерала флюорита (табл. 1). Это предопределяет необходимость его предварительного извлечения при получении кондиционных бериллиевых концентратов. С учетом отмеченных особенностей разработана технология, включающая три цикла флотации: сульфидный, флюоритовый и бериллиевый (рис. 2). Схема предусматривает использование технической воды с общей жесткостью не более 1.5 мг-экв./л.

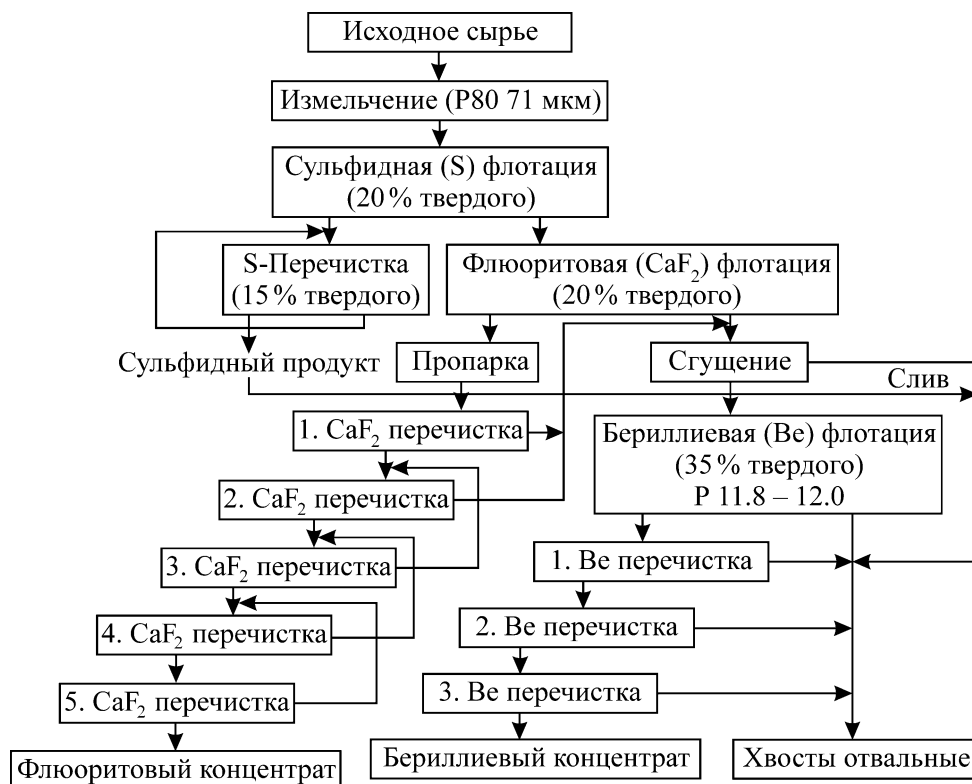


Рис. 2. Схема получения бериллиевых и флюоритовых концентратов

Основой флотационного разделения минералов бериллия, флюорита, кальцита и доломита является система связывания кальция во флотационной пульпе: сода, едкий натр, триполифосфат натрия [5].

Перечислим реагенты, используемые в процессе получения концентратов:

- операция измельчения: сода кальцинированная, медный купорос;
- сульфидная флотация: бутиловый ксантогенат, флотореагент Оксаль (Т-66);
- флюоритовая флотация: стекло натриевое жидкое, кислоты жирные талловые (ЖКТМ);
- пропарка грубого флюоритового концентрата: без реагентов при температуре 70°С в течение 25 мин;
- 1-я перечистка флюоритового концентрата: без реагентов;
- 2–5-я перечистки флюоритового концентрата: стекло натриевое жидкое;
- операция сгущения хвостов флюоритовой флотации и промпродуктов 1-й и 2-й флюоритовой флотации: Praestol 2530;
- бериллиевая флотация: натр едкий очищенный (NaOH), триполифосфат натрия технический (ТПФ), ЖКТМ;
- 1–3-я перечистки бериллиевого концентрата: NaOH, ТПФ.

Представленная базовая схема обогащения позволяет получить наряду с товарным флюоритовым концентратом бериллиевый концентрат технического сорта из техногенного сырья и высшего сорта — из рудного сырья Ермаковского месторождения. При этом технологические схемы и реагентные режимы принципиально не различаются, имеются лишь различия в числе перечистных операций во флюоритовом цикле, разводке промпродуктов и расходах реагентов.

Результаты укрупненных испытаний по переработке проб рудного и техногенного сырья представлены в табл. 2.

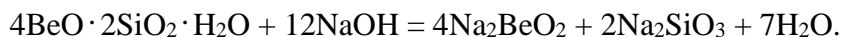
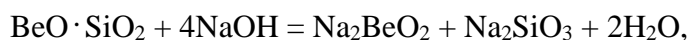
ТАБЛИЦА 2. Суммарные показатели обогащения рудного и техногенного сырья Ермаковского месторождения, %

| Продукт обогащения | Выход | BeO | | CaF ₂ | |
|------------------------|-------|------------|------------|------------------|------------|
| | | Содержание | Извлечение | Содержание | Извлечение |
| Рудное сырье | | | | | |
| Бериллиевый концентрат | 11.0 | 11.66 | 85.5 | 17.4 | 4.0 |
| Флюоритовый концентрат | 41.2 | 0.17 | 4.7 | 93.8 | 81.0 |
| Сульфидный продукт | 1.4 | 0.54 | 0.5 | 18.4 | 0.5 |
| Общие хвосты | 46.4 | 0.30 | 9.3 | 14.9 | 14.5 |
| Итого | 100.0 | 1.50 | 100.0 | 47.7 | 100.0 |
| Техногенное сырье | | | | | |
| Бериллиевый концентрат | 8.5 | 5.51 | 75.5 | 20.00 | 4.9 |
| Флюоритовый концентрат | 26.0 | 0.02 | 1.1 | 94.21 | 71.0 |
| Сульфидный продукт | 1.3 | 0.57 | 1.2 | 29.19 | 1.1 |
| Общие хвосты | 64.2 | 0.21 | 22.2 | 12.35 | 23.0 |
| Итого | 100.0 | 0.62 | 100.0 | 34.50 | 100.0 |

По разработанной схеме обогащения получены товарные продукты: флюоритовые концентраты ФФ-92 по ГОСТу 29219-91, бериллиевые концентраты высшего и технического сортов, отвечающие требованиям ТУ 07.29.19.292-012-07625358-2017.

В результате испытаний на экспериментальной установке наработаны опытные партии концентрата бериллия высшего сорта с содержанием 11.66 % BeO при извлечении 85.5 % и технического сорта, содержащего 5.5 % BeO при извлечении 75.5 %. Полученные концентраты переработаны по автоклавно-мембранной технологии с получением гидроксида бериллия. Технология включает ряд последовательных операций (автоклавное вскрытие; разделение технологической суспензии после автоклавного вскрытия; очистка растворов от примесей; мембранный электродиализ щелочных растворов; гидролиз бериллата натрия с выделением гидроксида бериллия).

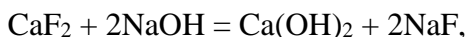
Вскрытие концентратов проводили в реакторе-автоклаве объемом 5 дм³ при соблюдении следующих параметров: концентрация раствора NaOH 450 г/дм³, каустический модуль 12, мольное отношение CaO : SiO₂ = 1.2, соотношение Т : Ж = 1.0 : 7.5, продолжительность — 4 ч. Скорость нагрева 10–12°/ч. При этом взаимодействие минералов фенакита и берtrandита со щелочью с образованием бериллата натрия происходит по реакциям:



Для связывания кремния, содержащегося в концентрате, и последующего удаления его с отвальным кеком в исходную пульпу перед автоклавным вскрытием добавляли оксид кальция [6]. При этом образуется натриево-кальциевый силикат, который выпадает в осадок:



В процессе автоклавного вскрытия фтор, содержащийся в исходном концентрате, осаждается в виде натриевого криолита, который выводится из системы:



По окончании вскрытия автоклав разгружали, пульпу охлаждали и направляли на разделение фаз: кек поступал на отмывку от водорастворимого бериллия с последующей утилизацией, а раствор — на очистку от примесей.

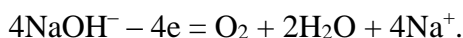
Операция очистки щелочного раствора от примесей железа и марганца окислением кислородом представлена следующими реакциями:



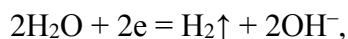
Скорость окисления кислородом зависит от парциального давления. Теоретические и практические исследования данного процесса очистки свидетельствуют о возможности использования для этих целей кислорода, выделяющегося в процессе разложения щелочи в анодной камере электролизера. В данном случае кислород — доступный, экономически и экологически приемлемый окислитель [7].

Для регулирования концентрации щелочи при получении гидроксида бериллия предложено применять технологию мембранного электродиализа как технологию нового поколения. Значение этой технологии в последнее время возросло из-за ее высокого экологического потенциала. Быстрый рост востребованности мембранных процессов в промышленности объясняется тем, что традиционно используемые в промышленной практике технологии достигли своего предела с точки зрения их дальнейшей оптимизации и адаптации к возросшим требованиям производства и экологии. Основные достоинства мембранного метода — экологическая чистота, экономия энергозатрат, малые производственные площади [8].

Принцип действия мембранного электролизера как регулятора концентрации щелочи состоит в следующем [9]. При электрохимической поляризации постоянным током в камере разложения на аноде происходит выделение кислорода по реакции



Ионы натрия проходят через селективную катионообменную мембрану в катодную камеру, где при поляризации за счет разложения воды образуется водород и гидроксил-ионы. В соответствии с сохранением заряда данная электрохимическая реакция имеет вид



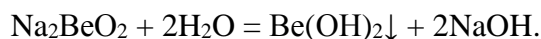
при этом катионы натрия соединяются с гидроксил-ионами с образованием NaOH:



Следовательно, при наложении постоянного тока в анодной камере разложения происходит уменьшение концентрации щелочи, в катодной камере — увеличение концентрации NaOH в эквивалентных количествах.

Требования, предъявляемые к мембранам, — химическая стойкость и осмотическая стабильность, механическая прочность, низкий коэффициент переноса воды, высокая селективность, низкое электрическое сопротивление [10]. Испытывались мембраны МК-40, МФ-4ск и Асиплекс F-6801. Последняя мембрана может работать на высоких плотностях тока и отвечает всем предъявляемым требованиям. Ресурс мембраны 5 лет [11].

Испытания технологии мембранного электродиализа щелочных растворов проводили в электролизере объемом 4 дм³. В качестве источника постоянного тока использовали импульсный источник Gw Instek PSH-2018 (максимальное напряжение 20 В, сила тока 18 А). Предложенная технология предусматривает электрохимическую нейтрализацию щелочи в анодной камере электролизера с 350 г/дм³ до концентрации, необходимой для гидролиза бериллата натрия (28–30 г/дм³ NaOH), по реакции



Гидроксид бериллия, выпавший в осадок, отфильтровывали и отмывали водой от избытка ионов натрия [12].

В катодную камеру электролизера поступал маточный раствор после гидролиза бериллата натрия и выделения из него гидроксида бериллия. Содержание щелочи в нем составляло 30 г/дм³. В катодной камере в процессе регенерации щелочи происходит выделение водорода в количестве 23.07 м³ в расчете на 1 кг бериллия в гидроксиде. Водород — экологически чистый теплоноситель. Теплота его сгорания в 3 раза выше, чем у метана, поэтому в технологии водород используют, направляя его в парогенератор, где получают пар с низкой себестоимостью для технологических нужд. Из камеры концентрирования раствор с концентрацией щелочи 340 г/дм³ поступал на операцию упаривания раствора, поскольку для автоклавного вскрытия концентрата необходима концентрация щелочи 450 г/дм³. Полученный после выпаривания раствор направлялся на приготовление исходной пульпы концентрата и далее на операцию автоклавного вскрытия.

Технологическая схема переработки концентратов по автоклавно-мембранной технологии приведена на рис. 3, а сравнительные результаты переработки концентратов высшего и технического сортов — в табл. 3.

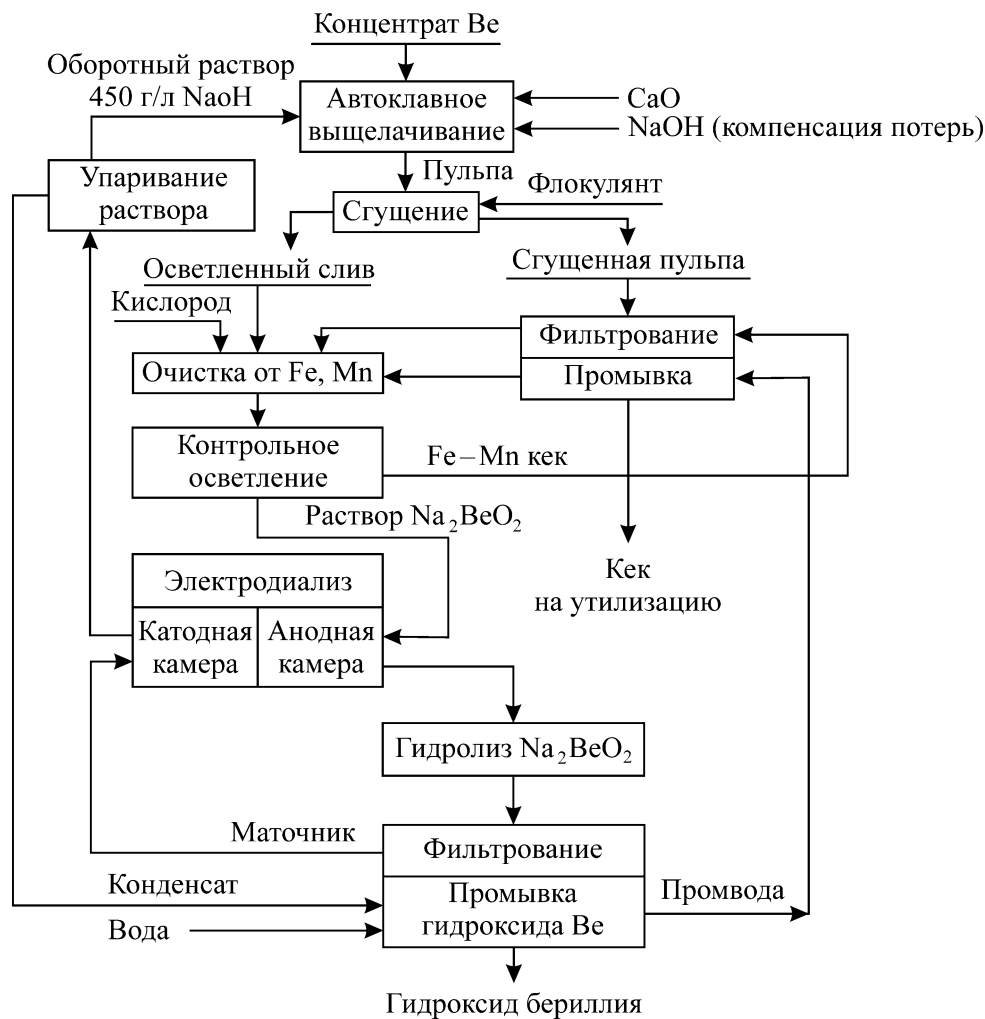


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема переработки концентратов по автоклавно-мембранной технологии

ТАБЛИЦА 3. Результат переработки концентратов

| Основной технологический показатель | Концентрат | |
|--|-------------|------------------|
| | Высший сорт | Технический сорт |
| Содержание бериллия в концентрате, % | 4.2 | 1.9 |
| Масса концентрата, кг/кг Ве в гидроксиде | 25.1 | 66.4 |
| Расход каустика NaOH, кг/кг Ве в гидроксиде | 4.2 | 6.8 |
| Расход CaO (67 %), кг/кг Ве в гидроксиде | 6.4 | 13.1 |
| Производительность фильтрования пульпы кека, кг/(м ² ·цикл) | 20.1 | 24.0 |
| Влажность кека, % | 20.4 | 31.8 |
| Выход кека, % к концентрату | 113.0 | 119.0 |
| Остаточное содержание бериллия в кеке, % | 0.14 | 0.18 |
| Извлечение бериллия в раствор по кеку, % | 96.2 | 88.6 |
| Степень гидролиза бериллата натрия, % | 98.5 | 90.4 |
| Извлечение бериллия в гидроксид бериллия из концентрата, % | 95.0 | 80.1 |

Как следует из сравнения данных (табл. 3), показатели переработки концентрата технического сорта значительно ниже, чем при переработке концентрата высшего сорта, что может сказаться на технико-экономических показателях технологии в целом при пуске бериллиевого

производства. Можно рекомендовать переработку концентрата технического сорта методом подшихтовки к более богатому концентрату высшего сорта из расчета соблюдения требуемых экономических и экологических показателей.

Полученный в процессе укрупненных испытаний целевой продукт (гидроксид бериллия) отвечал требованиям ТУ 1717-001-07625358-17 (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Состав технического гидроксида бериллия, полученного по автоклавно-мембранной технологии

| Содержание элементов | Содержание Be, масс. % | Содержание примесей, % к бериллию | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Mg | Al | Si | Ca | Cr | Mn | Fe | Ni |
| Требования ТУ | 20.3 | 0.153 | 0.250 | 0.305 | 0.507 | 0.084 | 0.018 | 0.384 | 0.042 |
| | 20.0 | — | ≤0.8 | ≤0.8 | ≤0.8 | ≤0.2 | ≤0.1 | ≤1.0 | — |

Предложенная технология получения гидроксида бериллия позволит решить важные экологические и экономические проблемы: перерабатывать концентраты любой минерализации, сократить номенклатуру применяемых реагентов, создать замкнутый по воде технологический цикл, утилизировать твердые бериллийсодержащие отходы, снизить энергозатраты и нагрузку на окружающую среду [13]. Перспективы внедрения безреагентного метода мембранного электролиза в гидрометаллургии бериллия для регулирования концентрации щелочи в процессе получения гидроксида бериллия связаны с экологической безопасностью и энергетической эффективностью токовых процессов.

ВЫВОДЫ

Разработаны технологии получения бериллийсодержащих концентратов высшего и технического сортов из рудного и техногенного сырья, а также товарного флюоритового концентрата. На всю продукцию подготовлены соответствующие технические условия. Определены исходные данные для создания опытного производства по переработке руды Ермаковского месторождения. Представлены программа и методики проведения опытно-промышленных испытаний технологического процесса получения бериллиевых концентратов.

Испытана на экспериментальной установке автоклавно-мембранная технология получения гидроксида бериллия. Выдано техническое задание на организацию опытно-промышленной установки переработки концентратов с получением гидроксида бериллия и подготовлена программа-методика проведения испытаний.

Внедрение технологии получения бериллиевых концентратов и переработки их с получением гидроксида бериллия позволит организовать современное экономически более эффективное, экологически безопасное, автоматизированное производство гидроксида бериллия и решить проблему импортозамещения стратегически важного металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Foley N. K., Jaskula B. W., Piatak N. M., and Ruth F. Schulte.** Beryllium chapter E of critical mineral resources of the United States, Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, ed. by Schulz K. J., DeYoung J. H., Jr., Robert R. Seal II, and Dwight C., Bradley Professional. — P. 1802-E.
2. **Куприянова И. И., Шпанов Е. П.** Бериллиевые месторождения России. — М.: Геос, 2011. — 353 с.
3. **Киенко Л. А., Саматова Л. А., Воронова О. В., Кондратьев С. А.** К проблеме снижения температуры флотации при обогащении карбонатно-флюоритовых руд // ФТПРПИ. — 2010. — № 3. — С. 97–104.

- 4. Чантурия В. А., Кондратьев С. А.** Закономерности флотации несulfидных минералов олеиновой кислотой // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 162–170.
- 5. Пикалов М. Ф., Курков А. В., Пастухова И. В.** Проблемы комплексной переработки берtrandит-фенакит-флюоритовых руд и способы их решения // Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья. Плаксинские чтения 2010. — М.: УРАН ИПКОН РАН, 2010. — С. 251–254.
- 6. А. с. 71683 СССР.** Вскрытие фенакит-берtrandитовых концентратов / М. А. Коленкова, Т. Д. Блистанова, 1972.
- 7. Клушин Д. Н., Резник И. Д., Соболев С. И.** Применение кислорода в цветной металлургии. — М.: Металлургия, 1973. — 240 с.
- 8. Николаевский В. Б., Коцарь М. Л., Матясова В. Е.** Мембранный электролиз в технологии получения гидроксида бериллия // Атомная энергия. — 2017. — Т. 122. — Вып. 2. — С. 83–87.
- 9. Мазанко А. Ф., Камарьян Г. М., Ромашин О. П.** Промышленный мембранный электролиз. — М.: Химия, 1982. — 240 с.
- 10. Ярославцев А. Б., Никоненко В. В.** Ионообменные мембранные материалы: свойства, модификация и практическое применение // Рос. нанотехнологии. — 2009. — Т. 4. — № 3–4. — С. 33–53.
- 11. Зимин В. М., Камарьян Г. М., Мазанко А. Ф.** Хлорные электролизеры. — М.: Химия, 1984. — 299 с.
- 12. Матясова В. Е., Николаевский В. Б., Алекберов З. М.** Гидролиз бериллата натрия в технологии получения гидроксида бериллия // Атомная энергия. — 2016. — Т. 121. — Вып. 3. — С. 149–151.
- 13. Пат. 2598444 РФ.** Способ получения гидроксида бериллия из бериллийсодержащих концентратов. Рег. № 2015116332, приоритет от 29.04.2015. Реестр изобретений ФИПС, бюлл. “Изобретения. Полезные модели” // Опубл. в БИ. — 2016. — № 27.

Поступила в редакцию 6/VII 2018