

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ И ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ ПЛАВУЧИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ПАВЛОВСКОЕ»

Корогодин А.С., Иванов С.Л., Князькина В.И., Газизуллина А.Р.
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: Арктика, месторождение «Павловское», свинцово-цинковые руды, плавучий горно-обогатительный комплекс, динамическое горное оборудование, наилучшие доступные технологии НДТ, изнашивание цапф, барабанные мельницы.

Аннотация. Проведен анализ целесообразности применения плавучих предприятий по добыче и переработке полезных ископаемых. Рассмотрены перспективные направления в области горнодобывающей отрасли при освоении Арктической зоны. Выделено серебросодержащее свинцово-цинковое месторождение «Павловское» на Новой Земле в качестве перспективного проекта для освоения при помощи плавучего горно-обогатительного комплекса. Описана структура предприятия по добыче руд месторождения «Павловское», геотехнология добычи рудного сырья и его обогащения на плавучем комплексе. Представлены подходы по реализации адаптивной технологии проведения ремонтных работ динамического горного оборудования дезинтеграции, как элемента системы комплекса горно-обогатительного оборудования на принципах наилучших доступных технологий (НДТ) при освоении месторождений в природно-климатических условиях Арктики.

GEOTECHNOLOGY AND MINING AND PROCESSING FLOATING COMPLEX FOR THE DEVELOPMENT OF THE «PAVLOVSKOYE» DEPOSIT

Korogodin A.S., Ivanov S.L., Knyazkina V.I., Gazizullina A.R.
Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: Arctic, «Pavlovskoye» deposit, lead-zinc ores, floating mining and processing complex, dynamic mining equipment, best available technologies BAT, trunnion wear, drum mills.

Abstract. The feasibility of using floating enterprises for mining and processing of minerals is analyzed. Considered promising directions in the field of mining in the development of the Arctic zone. The silver-containing lead-zinc deposit «Pavlovskoye» on Novaya Zemlya was singled out as a promising project for development by means of a floating mining and processing complex. The structure of the «Pavlovskoye» deposit ore mining enterprise, the geotechnology of ore raw material extraction and its enrichment at the floating mining complex is described. Approaches to the implementation of adaptive technology for repair work of dynamic mining disintegration equipment as an element of the mining and processing equipment complex on the principles of the best available technologies (BAT) in the development of deposits in the natural and climatic conditions of the Arctic are presented.

Введение

В последнее десятилетие в связи с радикальными изменениями в политической сфере и ужесточении климатического регулирования в купе с истощением доступных запасов сырья становится привлекательной концепция разработки и применения гибких плавучих предприятий или комплексов с целью ухода от инвестирования в стационарные недвижимые наземные предприятия, которые становятся зачастую все более нерентабельными [1].

Плавучие предприятия или комплексы в своей основе представляют собой судно, на котором конструктивно закладывается некий производственный процесс добычи или переработки природного сырья, в отличие от судов, используемых исключительно для перевозки товаров. Производственный процесс на плавучем комплексе представляет из себя непрерывный поток, отдельные операции которого чередуются в строго определенной последовательности.

Плавучие комплексы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению со стационарными предприятиями. В первую очередь это компактность конструкции, связанная с внедрением на плавучий комплекс технологий с наземных заводов и производств путем упрощения конструктивных решений. Во-вторых, это малые сроки продолжительности

строения плавучих комплексов на водной поверхности, которая позволяет за считанные месяцы, а не за годы возводить промышленные объекты, выступая тем самым идеальной строительной площадкой. Также разработка и применение плавучих комплексов является конкурентоспособной в сравнении с возросшей стоимостью сырья, произведенного стационарными заводами в купе с затратами на их непосредственное возведение и оборудование. Однако, ключевым фактором их преимущества является мобильность.

На сегодняшний момент горная промышленность все чаще сталкивается с возникшей проблемой ухудшения рудного сырья. В основном это связано с пониженным содержанием концентрации полезных компонентов в исходном рудном сырье и повышенным содержанием неблагоприятных сопутствующих компонентов [2], что приводит к нестабильности технологического процесса добычи и обогащения и как итог, происходят непредвиденные потери и снижении прибыли.

Поэтому в связи с возникшим несоответствием состояния минерально-сырьевой базы стратегии развития Российской Федерации, из-за постоянно возрастающего числа отработанных месторождений легкообогатимых богатых руд цветных металлов, в особенности касаясь свинцово-цинковых месторождений, мобильность горно-обогатительных предприятий играет ключевую роль в экономической составляющей инвестиционного механизма.

Таким образом, после исчерпания запасов перспективных сложно доступных месторождений рудопоявления, таких, например, как свинцово-цинковые месторождения Арктической зоны [3], имеется возможность применения плавучего комплекса на других аналогичных месторождениях, при этом на новом месте требуется только беспрепятственный подход к берегу и причал, что в свою очередь позволяет минимизировать риски разработки проектов и сократить затраты и время для подготовки разработки месторождений. Также позволяя разрабатывать месторождения, не предусматривающие применение традиционных методов из-за их нерентабельности, и тем самым делая данные проекты разработок экономически целесообразными.

Имеющийся опыт блочного строительства плавучих комплексов показывает, что трудозатраты в сравнении со стационарными предприятиями снижаются практически в два раза. Помимо этого, в несколько раз сокращается и сама стоимость объекта, а необходимая для его постройки площадь сокращается уже в несколько десятков раз [1]. Это связано с конструктивным решением многоэтажности плавучего комплекса, где все оборудование располагается не на одной единой площади, а на различных технических палубах и затем объединяется при производстве в единый непрерывный технологический процесс.

Создавать различные плавучие объекты готовы предприятия из абсолютно разных сфер производства начиная от энергетики и заканчивая нефтедобычей. Среди них плавучие электростанции, нефтехимические заводы, заводы по переработке нефти и нефтяного газа, заводы по опреснению морской воды, заводы по производству сжиженного газа, заводы для производства полиэтилена, бумагоделательные комбинаты, заводы для производства прутковой стали и по производству шпона, плавучие электростанции, атомные электростанции, ветровые и приливно-энергетические установки и другие.

Всевозможные плавучие предприятия предлагают компании Швеции, Финляндии, Норвегии, Германии, Италии, Франции, США и России. Данная модель лучше всего подходит для разработки небольших, удаленных месторождений.

Современный мировой рынок полезных ископаемых стремительно меняется. В особенности наблюдается динамично развивающаяся торговля твердыми полезными ископаемыми, к которым относятся, в частности, руды чёрных, цветных и благородных металлов. Поэтому горно-обогатительная отрасль по-прежнему является одной из важнейших экономических составляющих развития Российской Федерации на мировом рынке. Однако, в настоящее время в связи с ростом неопределенности, вызванной прежде всего ценовой волатильностью и увеличением доли отработанных месторождений легкообогатимых богатых руд цветных металлов, концепция плавучего предприятия или комплекса по добыче и обогащению рудного сырья становится востребованной.

Но, несмотря на ряд вышеперечисленных несомненных преимуществ применения плавучего комплекса, по-прежнему остаются значительные технические, операционные, правовые и коммерческие риски, которые на данный момент снижают инвестиционную привлекательность подобных проектов. Для минимизации подобных рисков необходимо оптимальное структурирование проекта путем осуществления многостороннего сотрудничества как инвесторов с экспортерами и импортерами, так и сервисных компаний с участием государственных органов власти в купе с кооперацией со стороны международных компаний.

Перспективные месторождения цветных металлов Арктики

Примером подобного перспективного проекта в сфере горнопромышленного производства на период с 2022 года выступает серебросодержащее свинцово-цинковое месторождение «Павловское» [4]. Месторождение находится на северо-западе России в составе Архангельской области на острове Южный, входящем в архипелаг Новая Земля в Севером Ледовитом океане, в 15-18 км от побережья Баренцева моря. Минерализация свинцово-цинкового сырья была выявлена в 1991 году геологами в бассейне Губы Безымянной во время проведения Полярной морской государственной геологической поисково-съёмочной партии. В последствии чего в 1993-1994 годах на территории участка производилось минералогическое исследование и геологическое картирование, с дальнейшим проведением в период с 2000 по 2002 год поисково-оценочных геологоразведочных работ, в ходе которых и было открыто серебросодержащее свинцово-цинковое месторождение «Павловское», простирающиеся более чем на 12 км² вблизи Губы Безымянной и подтвержденное Свидетельством об открытии месторождения полезных ископаемых № АРХ 02 МЕТ 1005 от 22 мая 2002 года.

К настоящему времени данное месторождение является единственным расположенным на Новой Земле с утвержденным балансовым запасом, который многократно оценивался в разные временные периоды, начиная с 2000-го года и заканчивая 2017 годом. В итоге, запас руд месторождения «Павловское» после окончательной оценки был поставлен на государственный баланс. Геологическое строение месторождения относят к стратиформному геологическому типу в карбонатных толщах.

В своей основе месторождение «Павловское» представляет из себя три рудоносных блока: Центральный блок, Западный и Восточный блоки. Преимущественно разведаны залежи Центрального и Восточного блоков.

Сплошные рудные тела преимущественно выходят на поверхность Восточной залежи в борту Губы безымянной. Восточная залежь заключена в антиклинальной складке, она слагает единое рудное тело шириной около 120-250 м, а в некоторых местах и более чем на 800 м с глубиной более 250 м и протяженностью более чем 900-1000 м с мощностью 50-100 м и приурочена к зонам катаклаза с локализацией в низших слоях рудовмещающей толщи. Центральный блок в свою очередь характерен субпластовыми сплошными телами рудопоявления, представляя собой ряд линз, пологопадающих на восток, северо-восток. Рудная минерализация Центральной залежи простирается более чем на 550-600 м преимущественно по оси складки к северу с мощностью от 3-5 до 15-25 м, аналогично приуроченными к зонам катаклаза с локализацией в низах рудовмещающей толщи. В месте пересечения залежь имеет размер около 350 м, а ее глубина не оконтурена по глубине.

Оценка полезных ресурсов была проведена путем применения программного обеспечения Datamine. По разработанной блочной модели с помощью метода ординарного кригинга произведена оценка качественного содержания полезных минеральных ресурсов. Таким образом, в ходе проведенного анализа статической обработки кернового и площадного опробования рудного сырья было выявлено содержание трех элементарных ассоциаций: рудной (Pb, Zn, Ag, Cd, As, Sb, Ge, Fe и др.); карбонатной (Ca, Mg, Mn) и глинистой (Al, Ba, Ga, Cr, Co, Cu, Ni, Sc, V, Ti, Zr и др.), появление которой связано с примесью в известняках глинистого материала.

Из установленных минеральных ресурсов, основной промышленный интерес составляют цинк и свинец. Их распределение по рудным телам является условно равномерным в процентном соотношении. Также в рудах месторождения содержится значительное число примесей, из которых наибольшую ценность в качестве попутных компонентов имеет серебро.

Керновое бурение проводилось в период с 2013 по 2020 год с помощью алмазных коронок и двойных колонковых труб с диаметром бурения 76 мм. После чего полученный керн распиливался на половины и четвертины на керновом станке и отправлялся на анализ. Весь керн был задокументирован и отбирался с интервалом в 1 м, с корректировкой на геологических границах. Осмотр фотографий керна показал его положительное извлечение с показателем 95%-100%.

Подготовка проб осуществлялась в разведочном лагере непосредственно на месторождении «Павловское» по методу квартования [5], в ходе которого 350 г помещалось на хранение в качестве дубликата с частотой 1 к 50, а другая часть проб после сушки дробилась на участке в дробилке Rocklabs Boyd до 1 мм для точности деления, упаковывалась в полиэтиленовую тару и отправлялась в лаборатории, где проходила окончательное истирание на дисковом истирателе до 0,072 мм и анализировались. Также в каждые 25 проб из партии последовательно помещались бетонные брикеты для мониторинга возможного заражения. Заражения проб обнаружено не было, а результаты по полевым дубликатам были удовлетворительными. В разные временные периоды технологическим апробированием и анализированием занимались различные лаборатории, к которым относятся: лаборатория «Севзапгеология» и Партия ядерно-физических методов исследования (ПЯФМИ) Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ), лаборатория «Сосновгеологии», «Иркутскгеофизики», Центральная лаборатория ФГУПП «Урангеологоразведка» Северо-Западного филиала «Невскгеологии», лаборатория ООО «Стюарт Геокемикл ЭНД Эссей» в Москве и т.д.

Анализ основных полезных минеральных ресурсов проводили разными методами. Например, в лаборатории «Севзапгеология» анализ цинка и свинца осуществлялся методом атомно-абсорбционной спектрометрии НСАМ 155-ХС. Пределы обнаружения составляют от 0,02% до 20% для Pb и от 0,005% до 20% для Zn. Серебро определяли по методу ААС НСАМ 130-С с нижним пределом обнаружения 0,005 г/т Ag и верхним - 2000 г/т Ag. В лаборатории ПЯФМИ ПМГРЭ свинец и цинк анализировались методом рентгеновской флуоресценции (РФА) в соответствии с промышленным стандартом № 311-ЯФ. Пределы обнаружения метода – от 0,01% до 5% для Pb и от 0,02% до 5% для Zn. В Центральной лаборатории ФГУПП «Урангеологоразведка» с помощью рентгеноспектрального метода НСАМ-80 РС, а в сертифицированной лаборатории ООО «Стюарт Геокемикл ЭНД Эссей», соответствующей требованиям международного стандарта ISO/IEC 17025:2005, производилось четырехкислотное разложение для минеральных ресурсов свинца, цинка и серебра, состоящий из 15-ти элементного комплекса с пределами обнаружения для свинца от 0,001% до 20%, для цинка от 0,001% до 30% и для серебра от 1 г/т до 1500 г/т. При этом взятие кернов при бурении в 2020 году являлось сгущающим относительно ранее пробуренных скважин.

Таким образом, рудный потенциал месторождения «Павловское» представляют из себя природный концентрат с примерным содержанием цинка до 35% и свинца до 20% соответственно, а проведенные несколько лет назад полупромышленные испытания окончательно подтвердили высокое качество товарной продукции. Таким образом, на период 2017 года по общедоступным источникам итоговое количество рудного потенциала недр составляет в общем, около 47 млн. тонн, а прогнозные ресурсы свинца и цинка суммарно оцениваются в 19 млн. тон. Что делает серебросодержащие свинцово-цинковое месторождение «Павловское» одним из пяти крупнейших подобных минерально-сырьевых баз в мировой экономике [2].

Применение плавучего горно-обогатительного комплекса

Географическое расположение месторождения «Павловское» относительно крупнейших предприятий по переработки горных концентратов представляет весомое стратегическое преимущество по отношению к подобным месторождениям [2, 6]. А имеющаяся договоренность с подобными потенциальными потребителями сырья, покрывающими сбыт планируемой продукции месторождения, подтверждает рыночные перспективы проекта, делая его высокорентабельным.

Однако в то же время географическое месторасположение данного месторождения накладывает и определенную степень повышенной сложности по его разработке [7], практически исключая возможность проведения добычи и обогащения традиционными методами с помощью применения стационарных горно-обогатительных комбинатов. Помимо этого, в ходе строительства и дальнейшей эксплуатации месторождения имеет место возникновение повышенной негативной нагрузки на природно-климатическую составляющую побережья Безымянной губы, в ходе которого могут быть разрушены местообитания многих птиц, включая ряд и редких видов. Территория месторождения является и местом обитания, занесенного в красную книгу Российской Федерации, белого медведя.

В целом, рассматриваемый район является достаточно сложным для строительства горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Здесь имеет место, как и суровые арктические условия, характеризующиеся сильными ветрами, метелями и отрицательными температурами, достигающими значений минус 40°C, так и неблагоприятные инженерно-геологические условия для строительства стационарных горных предприятий в купе с высокочувствительными к техногенным нагрузкам ландшафтами и осложняемы процессом добычи многолетнемерзлых пород [8].

Помимо этого вести строительство предполагается в неосвоенной и незаселенной части острова, где в целом отсутствуют объекты логистической инфраструктуры. А имеющаяся на данный момент транспортная инфраструктура в районе планируемого обустройства месторождения представлена исключительно морским транспортом [6]. При этом береговая инфраструктура на подходах и непосредственно на Губе Безымянная отсутствует. Наличие каких-либо железных или автомобильных дорог также не предусмотрено.

Поэтому, в связи с удаленностью расположения месторождения для его обустройства для проведения добычи рудного сырья грузы и прочие необходимые составляющие можно будет доставлять только с помощью морского транспорта, что в свою очередь требует постройки порта вблизи карьера. Место строительства порта также заложено и на удалении около 500 миль от Мурманска и 590 миль от Архангельска. Таким образом, в процессе эксплуатации данного месторождения планируется создание транспортного узла на базе портового комплекса, включенного в состав портов Северного морского пути, что в свою очередь послужит в целом увеличению транспортной доступности архипелага Новая Земля.

Вследствие чего Россия построит первый плавучий горно-обогатительный комплекс для разработки месторождения «Павловское», а также по окончании планируется и применение плавучего комплекса на ряде других подобных перспективных месторождений рудопроявления цветных металлов, таких как: магний, свинец, цинк, серебро, олово и пр., которыми располагает зона Арктики.

Проект разработки специализированного плавучего горно-обогатительного комплекса и модель разработки с помощью его применения был предложен «Росатомом», как перспективный вариант, предусматривающий уход от классического метода добычи при освоении свинцово-цинковых месторождений.

Построенный таким образом модульный плавучий горно-обогатительный комплекс способен оставаться в рабочем положении круглый год [1], нивелируя влияние суровых погодных условий Арктики и выдерживая даже пятую категорию ураганных ветров по Саффиру-Симпсону, снижая негативную техногенную нагрузку на природную среду

побережья Безымянной Губы и облегчая в дальнейшем рекультивацию месторождения «Павловское» по окончании разработки.

Освоение месторождения «Павловское» также будет способствовать успешной реализации приоритетных направлений по добыче полезных ископаемых и развитию российской Арктики в целом. В связи с чем данный проект вошел в государственную программу «Социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации», утвержденной постановлением Правительства. На проект выделена государственная субсидия в размере семи миллиардов рублей. Общий объем финансов для реализации предложенной модели разработки месторождения «Павловское», вызывающий интерес потенциальных инвесторов, партнеров и финансовых учреждений, составляет почти 80 миллиардов рублей [4].

Основные предусмотренные проектом объекты, входящие в состав месторождения и необходимые для его освоения и законченного производственного цикла, включая социальную инфраструктуру, следующие:

- карьеры Восточный, Центральный и Западный;
- морской порт;
- вахтовый поселок на 400 человек;
- площадка энергокомплекса со складом дизельного топлива;
- плавучий горно-обогатительный комплекс;
- объединенный отвал пустой породы и сухих хвостов обогатительного комплекса;
- автогаражное хозяйство;
- площадка склада взрывчатых материалов;
- площадка водозабора хозяйственно-питьевого водоснабжения;
- площадка очистных сооружений бытового стока;
- эстакады инженерных сетей.

Оператором, отвечающим за строительство плавучего комплекса горного оборудования и разработку месторождения «Павловское», выступила АО «Первая горнорудная компания» (АО «ПГРК»), входящая в холдинг АО «Атомредметзолото» Госкорпорации «Росатом». К сегодняшнему времени АО «ПГРК» владеет двумя лицензиями, связанными с месторождением «Павловское», а именно лицензиями АРХ 01565 ТЭ и АРХ 01564 БП. Первая, действующая лицензия АРХ 01564 БП, зарегистрированная 29 августа 2016 года выдана только на разведку месторождения. Ее площадь составляет 1150 км² с глубиной лицензионного участка ограниченной глубиной геологоразведочных работ. Срок действия лицензии истекает 31 декабря 2026 года, как указано в поправках к лицензии. Данная лицензия зарегистрирована в Федеральном агентстве по недропользованию. Вторая лицензия № АРХ 01565 ТЭ и внесенные к ней дополнения зарегистрирована от 20 ноября 2019 года с окончанием срока действия до 01 мая 2034 года носит целевое назначение в виде разведки и добычи полезных ископаемых на участке недр месторождения «Павловское». При этом срок утверждения технического проекта разработки месторождения был перенесен на два года до 01 октября 2021 года. Ввод в эксплуатацию рудника также был перенесен на два года до 01 декабря 2024 года с увеличением площади участка недр до 1450 км² с ограничением по глубине согласно границе подсчета запасов.

В 2021 году началось планирование непосредственно конструкции плавучего комплекса, которая будет перерабатывать 50 тыс. т свинцового и 220 тыс. т цинкового концентрата в год. Начало строительства последнего намечено на 2022 год. Генеральный проектировщик выступила АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» (АО «ВНИПИпромтехнологии») Госкорпорации «Росатом».

Также был привлечен ряд зарубежных компаний, основными из которых являются финские компании «Aker Arctic Technology Oy» и «Outotec» для проектирования предприятия по обогащению месторождения «Павловское». Ключевым положением документов о сотрудничестве было соглашение на поиск перспективных решений по созданию

обогащательной фабрики, в конечном итоге принявшей концепцию плавучего горно-обогащательного комплекса, а также поставки, монтажа и контроля ввода в эксплуатацию горно-обогащательного оборудования. Что касается «Outotec», то данная компания широко известна своей разработкой передовых технологий и услуг для устойчивого недропользования. По мимо этого было заключено соглашение с еще одной финской компанией, которая будет заниматься оснащением плавучего комплекса всем необходимым набором горно-обогащательного оборудования. Разработкой и изготовлением электростанции снабжающей электроэнергией все оборудование плавучего комплекса займется компания «Wärtsilä». Однако, учитывая сложности взаимодействия с западными компаниями, вопросами проектирования и создания уникального плавучего горного комбината будут заниматься отечественные компании.

Таким образом, будет осуществлен уход от традиционных технологий освоения свинцово-цинковых месторождений, при котором теперь на суше располагается только карьеры с минимально необходимым оборудованием для вскрышных и добычных работ с дробилками крупного дробления вместе со складом концентрата и хвостохранилищем, а все основное оборудование дезинтеграции и первичного обогащения размещается на специализированном многопалубном плавучем горно-обогащательном комплексе, приведенном в непосредственной близости от карьеров и включенным в их технологическую схему горного оборудования, путем применения инновационной геотехнологии, реализуемой в рамках применения наилучших доступных технологий (НДТ) при освоении месторождений в природно-климатических условиях Арктики.

Плавучий горно-обогащательный комплекс будет включать в себя несколько основных функциональных участков, расположенных на соответствующих палубах. Состав оборудования и технических средств плавучего комплекса включает в себя:

- палубное оборудование, леерное ограждение, кранцевую защита, кнехты для швартовки и буксировки, мачты с сигнальными огнями и светильниками палубного освещения, трап;
- палубы с расположенным в технологической последовательности горно-обогащательным оборудованием;
- административно-бытовые помещения;
- палубы для обеспечения хранения во внутренних помещениях плавучего комплекса вспомогательной, ремонтной техники и прочего имущества, включая палубные люки с трапами, съемное грузоподъемное оборудование, системы освещения и вентиляции внутренних помещений.
- электростанция, непосредственно питающая плавучий комплекс;
- различные лабораторные площадки;
- дополнительно установленные съемные контейнеризированные комплексы различного назначения и прочие вспомогательные объекты.

Геотехнология при освоении месторождения «Павловское»

Загрузка и непосредственно монтаж горного оборудования на борт плавучего горного комплекса предполагается при его постройке. Таким образом, горно-обогащательное оборудование плавучего комплекса будет работать в единой технологической цепи с горным оборудованием карьера, а сам плавучий комплекс эффективно размещается у залежь рудного сырья месторождения «Павловское» с осуществлением переработки минеральных ресурсов и получения конечного концентрата в море, а не на суше, что позволит существенно снизить неблагоприятное влияние на экосистему, а также минимизировать риски и затраты, как временные, так и финансовые.

Срок отработки месторождения «Павловское» планируется осуществлять в течении 12-14 лет. Сложность геологического строения залежь относится ко 2-ой группе. Так как ресурсы расположены преимущественно близко к поверхности, то следовательно явный потенциал составляет открытый способ разработки всех трех карьеров месторождения.

Глубина бурения составляет 200-400 метров. Подготовка породы к выемке будет осуществляться буровзрывным способом. Поскольку породы рудного сырья имеют значительную крепость для бурения взрывных скважин на карьерах целесообразно применять буровые станки типа СБШ-250МН-32, которые хорошо зарекомендовали себя в данных горно-геологических условиях. При разработке месторождения планируется применение экскаваторнотранспортного комплекса оборудования.

Схема отработки заключается в доставке добытой руды из карьера автосамосвалами на плавучий горно-обоганительный комплекс. Предполагается обеспечение наименьшего расстояния транспортирования полезного ископаемого и вскрышных пород в период эксплуатации месторождения. При этом было сделано допущение о том, что вывоз пород вскрыши и сухих хвостов предполагаемого карьера и отходы плавучего горно-обоганительного комплекса могут складироваться во внешний объединенный отвал на суше на территории месторождения. В целом, проектом предусматривается три вида отвалов: отвал скальной вскрыши, отвал рыхлой вскрыши и спецотвал забалансовых, окисленных и смешанных руд. Способ механизации отвальных работ – бульдозерный. Системы вскрывающих выработок могут иметь разнообразные формы трасс, определяемые конфигурацией, размерами залежи и видом применяемого транспорта. Большие объемы вскрыши, а также большая производительность карьера требует применения механизации. Предполагается, что карьер будет разрабатываться с использованием стандартного метода с самосвалами и экскаваторами с прямой или обратной лопатой при высоте уступа 5 м и до 10 метров. На погрузке горной массы будут работать, исходя из поддержания необходимой производительности, экскаваторы типа ЭКГ. Основными карьерными грузами являются вскрышные породы и полезные ископаемые. На данном предприятии ведение горных работ характеризуется высокой сложностью, которая обуславливается большими объемами буровзрывных работ. На карьере транспортирование вскрышных пород и руды осуществляется автосамосвалами БелАЗ-75131 грузоподъемностью 130 т и БелАЗ-7555 грузоподъемностью 55 т.

Для механизации работ по отвалообразованию на месторождении ряд бульдозеров следующих типов: бульдозеры ДЭТ-250М2, ДЭТ-320 и тракторы Т-35.01, Т-40.01, бульдозеры Komatsu D155, D275, D375, WD600. Для производства вспомогательных работ на карьерах Восточный, Центральный и Западный, включающих в себя обустройство и ремонт автомобильных дорог, подчистку рудного тела и забоев экскаваторов, передвижки опор ЛЭП, перемещения негабаритов, подготовку поверхности буровых блоков, строительство зумпфов для водоотлива могут быть использованы бульдозеры типа ДЗ-171.

Переработка доставляемого рудного сырья с месторождения будет производиться на плавучем горно-обогательном комплексе по селективной схеме флотационного обогащения с получением в качестве конечных продуктов свинцового, цинкового и серебряного концентратов (см. рис. 1). При этом непосредственно цинк и свинец встречаются в основном в виде очень мелкозернистых агрегатов сфалерита и галенита, которые поддаются флотации, но могут потребовать очень тонкого измельчения, чтобы отделить их от сопутствующего пирита.

Таким образом, в состав палубы с горно-обоганительного оборудования в основном входят бункеры исходной руды, шаровые мельницы, грохоты, двуспиральные классификаторы, механические флотационные машины межцикловой и основной флотации, сгустители, дисковые вакуум-фильтры, ленточные конвейеры и питатели.

Размер максимальных кусков руды, поступающих с месторождения на плавучий комплекс, достигает 600-800 мм, тогда как необходимая крупность материала, поступающего на обогащение, должна быть обычно около 10 мм, а при флотационном обогащении не более 0,1 мм.

Технология переработки руды на плавучем комплексе следующая: исходная руда проходит сначала трехстадиальное дробление при помощи щековых, конусных дробилок и барабанных мельниц до крупности -50+14 мм, после чего подается на грохот для выделения

класса крупностью -14 мм, который поступает на обезвоживание на спиральный классификатор, затем в бункер главного корпуса, расположенного на верхней палубе. Надрешетный продукт попадает в конусные тяжелосредние сепараторы, где суспензия поддерживается на уровне от 2,68 до 2,88 г/см³.



Рис. 1. Укрупненная технологическая схема переработки серебросодержащих свинцово-цинковых руд месторождения «Павловское»

Полученная легкая фракция, выход которой составляет 25-40% после отмывки утяжелителя, используется в последствии на строительство и обустройство карьерных дорог месторождения, либо складировается. Потери свинца, цинка и серебра после отмывки невелики и составляют от 3,6 до 4,4%. Тяжёлая фракция после отмывки в свою очередь проходит повторное додробливание до 16 мм и в последствии поступает на измелчение в главный корпус.

Суспензия, отмытая на грохоте, проходит процесс регенерирования в магнитных полях сепаратора при напряжении 100 кА/м. Далее класс крупности -16+0 мм из отсека поступает в сгуститель, слив которого возвращается обратно на грохочение. Пески гидроциклона и сгустителей поступают на шламовую флотацию, а измелчённая тяжёлая фракция – сначала на коллективную, а затем на селективную свинцово-цинковую флотацию. Питание во флотационную машину подается через распределительную коробку, которая разделяет пески гидроциклона, куда направляется половина или две трети потока сгущенного продукта гидроциклона. Остальная часть потока возвращается в питание мельницы, куда в свою очередь добавляется вода для разбавления с целью снижения плотности пульпы примерно до 65%.

Коллективные концентраты объединяются для осуществления их совместного обогащения. После полученного измелченного рудного сырья до 35-45% класса -0,074 мм с применением соды 45-75 г/т и сернистого натрия 58-63 г/т поступает на межцикловую флотацию при которой подается соединение медного купороса в количестве от 70 до 95 г/т вместе с бутиловым ксантогенатом, содержание которого составляет от 15 до 22 г/т соответственно. Хвосты межцикловой флотации доизмельчаются до 77-85% класса -0,074 мм и направляются на основную коллективную флотацию с подачей медного купороса 35-54 г/т и ксантогената 11-16 г/т. Контрольную коллективную флотацию осуществляется в среде сернистого натрия от 35 до 41 г/т и ксантогената около 6 г/т. После двух перечисток

коллективный концентрат направляется на десорбцию с сернистым натрием, отмывку и доизмельчение. После десорбции коллективный концентрат поступает в мельницы доизмельчения до 83-85% класса -0,044 мм, куда попутно добавляется цианистый натрий и цинковый купорос. После активации медным купоросом и подачи ксантогената из хвостов контрольной флотации получают коллективный цинково-пиритный концентрат, направляемый на цинковую флотацию, где в последствии после двух перерешеток при pH 11,5. Затем гидрофобные минеральные частицы флотационной крупности контактируют с пузырьками воздуха в механизме, поднимаются на поверхность пенного слоя и извлекаются в получаемый цинковый концентрат, содержащий 54-55% цинка при извлечении 75%. Свинцовые концентраты, полученные после первой и второй перерешеток и контрольных флотаций основной содержат 49-52% свинца соответственно при извлечении 83%.

Выводы

Дорогостоящие объекты повышенной сложности и длительного срока эксплуатации, к которым, в частности, и относится плавучий комплекс, требуют постоянного технического обслуживания и ремонта на протяжении всего периода эксплуатации для сохранения производительности при высоком уровне готовности и минимизации рисков отказов системы элементами которой они являются [9]. И чтобы достичь поставленной цели по разработки месторождения «Павловское» путем применения плавучего комплекса горного оборудования, также необходимы НДТ для надежного функционирования последнего [4]. Важным элементом надежно-центрированного подхода в поддержании оборудования плавучего комплекса в работоспособном состоянии является мониторинг его технического состояния. А так как процесс обогащения руд сопровождается непрерывной работой оборудования, расположенного на многопалубном плавучем горно-обогательном комплексе, отвечающего за дробление, грохочение, измельчение, классификацию, флотационное обогащение, обезвоживание, сушку концентрата и т.д., объединенного в единую технологическую цепь то, следовательно, выход из строя какого-либо из ее элементов приводит к нарушению технологического процесса обогащения, простоя взаимосвязанного оборудования и как следствие, к критическим потерям в сырье [10]. Поэтому для безотказной и эффективной эксплуатации горного оборудования необходимо своевременно восстанавливать рабочие поверхности их ресурсопределяющих узлов и механизмов. Наиболее уязвимым в этом отношении является крупное динамическое оборудование дезинтеграции [11], испытывающее неравномерные осевые и радиальные нагрузки, в частности это касается барабанных мельницы различных стадий дробления и измельчения, основной из причин потери работоспособности которых является выход из строя подшипниковых гидростатических опор скольжения.

Частым явлением, сопровождаемым работу опорных подшипниковых узлов барабанных мельниц, является засорение системы смазки и неисправность уплотнительных средств ввиду долгосрочной работы мельницы, приводящие тем самым к перегреву узлов скольжения. Вследствие возникающих тепловых процессов вкупе с вибрацией и высокими удельными нагрузками происходит неравномерное изнашивание рабочих поверхностей цапф подшипниковых узлов и баббитовых вкладышей, приводящих к изменению равномерно-распределенной масляной подушки в узле трения. В связи с чем происходит разбалансировка узлов трения, сопровождающаяся возникновением местных повышенных радиальных и осевых нагрузок, что в лучшем случае приводит к интенсивному выкрашиванию пар трения, прямо пропорционально сказывающихся на работоспособности оборудования [12].

Заключение

На точке стояния плавучего комплекса, специализированных ремонтных объектов полного цикла не предполагается, а проведения полного демонтажа оборудования согласно классическим методам ремонта и транспортировкой их на ремонтно-промышленные площадки является невозможным. Поэтому для поддержания готовности оборудования на заданном уровне необходимо своевременно осуществлять технологическое обслуживание и

ремонт в уникальных условиях стесненного пространства, низкой маневренности материалов и специальных приспособлений для осуществления ремонтных воздействий [11]. Все это требует создания специализированных машин и устройств сборно-разборного блочно-модульного типа для осуществления комплекса ремонтно-восстановительных работ технологического горного оборудования плавучего комплекса без полного демонтажа оборудования непосредственно на месте его технологического стояния в процессе эксплуатации [13].

Список литературы

1. Гречко А.Г., Новиков А.И. Перспективы плавучих заводов по производству СПГ // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 5 (17). С. 60-65.
2. Bochneva A., Lalomov A., LeBarge W. Placer mineral deposits of Russian Arctic zone: Genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources // Ore Geology Reviews. 2021, vol. 138, pp. 15. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104349.
3. Асхабов А.М., Бурцев И.Н., Кузнецов С.К., Тимонина Н.Н. Арктический вектор геологических исследований: нефтегазовые и минерально-сырьевые ресурсы // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2014. № 9. С. 3-10.
4. Корогодина А.С., Иванов С.Л., Князькина В.И. Теротехнология динамического горного оборудования дезинтеграции при освоении месторождений в природно-климатических условиях Арктики // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2021. № 13. С. 42-47. doi.org/10.26160/2658-3305-2021-13-42-47.
5. Botura Neto B., Danderfer Filho A. Drill core structural analysis and extensional-contractional controls on the sulfide mineralization at the Ambrosia Sul zinc deposit, Vazante group, Western São Francisco craton, Brazil // Journal of Structural Geology. 2022, vol. 154, pp. 17. doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104474.
6. Panahi R., Adolf K.Y., Ng, Afenyo M.K., Lau Y.Y. Reflecting on forty years contextual evolution of arctic port research: The past and now // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2021, vol. 144, pp. 189-203. doi.org/10.1016/j.tra.2020.12.001.
7. Adumene S., Ikue-John H. Offshore systems' safety and operational challenges in harsh Arctic operations // Journal of Safety Science and Resilience. 2022, vol. 3, iss. 2, pp. 153-168. doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.02.001.
8. Bardyshev O.A., Repin S.V., Zazykin A., Evtukov S., Rajczyk J., Ruchkina I., Maksimova A., Korotkevich M. Study on the aspects of organizing the repair of construction machinery in the Arctic // Transportation Research Procedia. Elsevier B.V. 2021, vol. 57, pp. 49-55. doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.024.
9. Roy R., Stark R.G., Tracht K., Takata S., Mori M. Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2016, no. 2 (65), pp. 667-688. doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.006.
10. Neves M.D.M., Andrade A.H.P., Silva D.N. Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants // Engineering Failure Analysis. Elsevier B.V. 2016, vol. 61, pp. 28-36. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.037.
11. Корогодина А.С., Иванов С.Л. Восстановление цапф опорных подшипниковых узлов барабанных мельниц // Master's Journal. 2020. № 2. С. 49-55.
12. Blyankinshtein I., Kolesnikov I., Malchikov S. Improving availability of the mechanisms under harsh conditions of Arctic based on the monitoring their energy load // Transportation Research Procedia. Elsevier B.V. 2021, vol. 57, pp. 70-76. doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.027.
13. Корогодина А.С. Совершенствование технологического процесса ремонта цапф барабанной мельницы без демонтажа ее корпуса путем создания механизированного станочного комплекса // VIII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021». Сборник тезисов. Секция «Круглый стол молодых ученых». Санкт-Петербург: Изд-во Горного ун-та, 2021. С. 78-80.

References

1. Grechko A.G., Novikov A.I. Prospects for floating LNG plants // Transport on alternative fuel. 2010, no. 5 (17), pp. 60-65.
2. Bochneva A., Lalomov A., LeBarge W. Placer mineral deposits of Russian Arctic zone: Genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources // Ore Geology Reviews. 2021, vol. 138, pp. 15. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104349.
3. Askhabov A.M., Burtsev I.N., Kuznetsov S.K., Timonina N.N. Arctic vector of geological research: oil and gas and mineral resources // Bulletin of the Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2014, no. 9, pp. 3-10.
4. Korogodina A.S., Ivanov S.L., Knyazkina V.I. Terotechnology of dynamic mining disintegration equipment during the development of deposits in the natural and climatic conditions of the Arctic // Transport, mining and

- construction engineering: science and production. 2021, no. 13, pp. 42-47. doi.org/10.26160/2658-3305-2021-13-42-47.
5. Botura Neto B., Danderfer Filho A. Drill core structural analysis and extensional-contractional controls on the sulfide mineralization at the Ambrosia Sul zinc deposit, Vazante group, Western São Francisco craton, Brazil // Journal of Structural Geology. 2022, vol. 154, pp. 17. doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104474.
 6. Panahi R., Adolf K.Y.Ng, Afenyo M.K., Lau Y.Y. Reflecting on forty years contextual evolution of arctic port research: The past and now // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2021, vol. 144, pp. 189-203. doi.org/10.1016/j.tra.2020.12.001.
 7. Adumene S., Ikue-John H. Offshore systems' safety and operational challenges in harsh Arctic operations // Journal of Safety Science and Resilience. 2022, vol. 3, iss. 2, pp. 153-168. doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.02.001.
 8. Bardyshev O.A., Repin S.V., Zazykin A., Evtukov S., Rajczyk J., Ruchkina I., Maksimova A., Korotkevich M. Study on the aspects of organizing the repair of construction machinery in the Arctic // Transportation Research Procedia. Elsevier B.V. 2021, vol. 57, pp. 49-55. doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.024.
 9. Roy R., Stark R.G., Tracht K., Takata S., Mori M. Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2016, no. 2 (65), pp. 667-688. doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.006.
 10. Neves M.D.M., Andrade A.H.P., Silva D.N. Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants // Engineering Failure Analysis. Elsevier B.V. 2016, vol. 61, pp. 28-36. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.037.
 11. Korogodin A.S., Ivanov S.L. Restoration of trunnions of support bearing units of drum mills // Master's Journal. 2020, no. 2, pp. 49-55.
 12. Blyankinshtein I., Kolesnikov I., Malchikov S. Improving availability of the mechanisms under harsh conditions of Arctic based on the monitoring their energy load // Transportation Research Procedia. Elsevier B.V. 2021, vol. 57, pp. 70-76. doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.027.
 13. Korogodin A.S. Improving the technological process of repairing the trunnions of a drum mill without dismantling its body by creating a mechanized machine tool complex // VIII International Scientific and Practical Conference «Innovations and Prospects for the Development of Mining Engineering and Electromechanics: IPDME-2021». Collection of abstracts. Section «Round table of young scientists». SPb.: Publ. house of the Mining University, 2021. P. 78-80.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Корогодин Артур Сергеевич – аспирант	Korogodin Artur Sergeevich – postgraduate student
Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения	Ivanov Sergey Leonidovich – doctor of technical sciences, professor of mechanical engineering Department
Князькина Валерия Ивановна – инженер АХЧ	Knyazkina Valerya Ivanovna – engineer of the A&HU
Газизуллина Алина Рафиковна – магистрант	Gazizullina Alina Rafikovna – master's student
s215046@stud.spmi.ru	

Получена 30.05.2022