

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ КОМПЛЕКСА ПОДВОДНОГО СКИПОВОГО ПОДЪЕМА

Королев Р.И.¹, Юнгмейстер Д.А.², Ефимов Ф.А.², Федоров Е.В.²

¹ООО «ПроТехИнжиниринг»-«Санкт-Петербург», Санкт-Петербург;

²Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: глубоководная добыча, многоканатный подъем, машины со шкивами трения, КЁПЕ, кобальтоносные железомарганцевые корки, железомарганцевые конкреции, шахтный подъем

Аннотация. Проанализированы текущая ситуация в сфере подводной горной добычи полезных ископаемых. Отмечены перспективные полезные ископаемые и средства для их добычи со дна океанов. С целью скорейшего выхода для промышленной добычи подводных полезных ископаемых предлагается использовать канатный подъем, по аналогу с действующими рудниками. Представлены и описаны запатентованные технологии одноконцевого барабанного подъема с управляемым грузозахватным механизмом, а также технология многоканатного подъема с движением сосудов по направляющим канатам. Выделены достоинства и недостатки способов подъема в условиях подводной добычи с обоснованием целесообразности применения многоканатного подъема по принципу работы подъемной машины со шкивами трения. Приведен расчет основных параметров машин трения по скорректированной методике, основывающейся на известных подходах к расчету рудничных многоканатных подъемных машин. На основе расчета отмечено, какие основные технологические решения позволят производить работу комплекса с соблюдением действующих требований промышленной безопасности в условиях подводной добычи. Определено количество и диаметр подъемных канатов, диаметр шкива трения с проверкой удельного давления на его футеровку шкива трения, а также рассчитан коэффициент статических натяжений канатов, исключаяющий их проскальзывание. Для заданных и расчетных параметров посчитана техническая производительность подъема. В выводах отмечены основные риски, связанные с невозможностью реализации подводного многоканатного подъема.

JUSTIFICATION OF A RATIONAL LAYOUT SCHEME FOR AN UNDERWATER SKIP HOIST COMPLEX

Korolev R.I.¹, Yungmeister D.A.², Efimov F.A.², Fedorov E.V.²

¹ProTechInzhenering-Saint Petersburg LLC, Saint-Petersburg;

²Empress Catherine Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: deep-sea mining, multi-rope hoist, friction sheave machines, KOEPE, cobalt-rich ferromanganese crusts, ferromanganese nodules, mine hoist.

Abstract. The current situation in the field of underwater mining of minerals is analyzed. Promising minerals and means for their extraction from the ocean floor are noted. In order to quickly enter the industrial extraction of underwater minerals, it is proposed to use a rope hoist, similar to existing mines. Patented technologies of a single-end drum hoist with a controlled gripping mechanism, as well as a technology of a multi-rope hoist with the movement of vessels along guide ropes are presented and described. The advantages and disadvantages of lifting methods in underwater mining conditions are highlighted with a justification for the feasibility of using a multi-rope hoist based on the operating principle of a hoisting machine with friction pulleys. The calculation of the main parameters of friction machines is given using an adjusted methodology based on known approaches to the calculation of mine multi-rope hoisting machines. Based on the calculation, it is noted which main technological solutions will allow the complex to operate in compliance with the current industrial safety requirements in underwater mining conditions. The number and diameter of the lifting ropes, the diameter of the friction pulley with the specific pressure on its lining of the friction pulley were determined, and the coefficient of static tension of the ropes, eliminating their slippage, was calculated. The technical performance of the lifting was calculated for the specified and calculated parameters. The conclusions note the main risks associated with the impossibility of implementing an underwater multi-rope lifting.

Введение

Дно Мирового океана – источник больших запасов твердых полезных ископаемых (ТПИ), которые привлекают внимание многих стран. В настоящее время продолжают

работы по геологической доразведки открытых месторождений и ведутся разработки различных устройств для подводной добычи, транспорта и обогащения.

В Российской Федерации промышленная глубоководная добыча пока не производится из-за отсутствия полноценной и окончательной концепции отработки, а также отработанной схемы цикла добычи в искусственных условиях. Однако большой интерес к глубоководной добыче позволяет из года в год разрабатывать и проверять новые схемы и установки для рентабельной добычи глубоководных отложений.

Разработка нового оборудования для подводной добычи в первую очередь должна базироваться на уже существующих достижениях в области горного машиностроения и перенимать лучшие практики его использования.

В комплексах для добычи ТПИ, как правило, выделяют: надводное судно или платформа, подъемные (транспортирующие) устройства, придонные аппараты или подводные сборщики ТПИ.

Надводные устройства, базирующиеся на судах обеспечения, в настоящее время достаточно изучены, в то время как разработка транспортной системы и придонных устройств сбора представляет наибольший интерес для международных компаний, научных институтов и сообществ ученых.

На сегодняшний день агрегаты для сбора и перемещения по дну имеют достаточно проработанную форму и отдельно испытываются различными Мировыми консорциумами. Это могут быть как самоходные, так и буксируемые придонные аппараты с различными исполнительными органами для сбора и местной транспортировки полезного ископаемого, в то время как апробированной системы транспортировки собранного материала с глубин 3-5 км на судно обеспечения отсутствует.

Так как рентабельность глубоководной добычи напрямую зависит от производительности подъема большого количества полезного ископаемого, а трубопроводный транспорт сдерживается большим количеством требований и ограничений, связанных с неопределенной формой и размерами поднимаемого материала, то перспективным направлением является разработка полноценной технологии канатного подъема.

Учитывая глубину залегания месторождений, ограничений по количеству витков канатов на барабанах подъемной машины, концевой нагрузке на канат, а также ограничений по массе оборудования, размещаемого на судне, почти безальтернативным вариантом является применение многоканатных подъемных установок со шкивами трения типа КЁПЕ, зарекомендовавшие себя в последние 30 лет применения на всех передовых мировых рудниках и шахтах.

1. Краткий анализ действующей ситуации глубоководной добычи

Руды, содержащие полезные минералы, располагающиеся на рельефе дна Мирового океана, в основном залегают на глубине от 1 до 6 км под водной поверхностью и делятся на три основных типа [1-3]:

1) глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС), содержащие медь, золото, свинец, серебро и др. металлы, месторождения которых располагаются в системе Срединно-Атлантического хребта, вокруг Папуа-Новой Гвинеи, Соломоновых островов, Вануату и Тонга, а также в других аналогичных океанских средах по всему миру [4, 5];

2) железомарганцевые (полиметаллические) конкреции (ЖМК) богатые такими элементами как: кобальт, никель, медь, молибден, литий и иттрий, а также редкоземельные металлы, залегающие на глубинах от 4 до 6 км в Тихом океане между Мексикой и Гавайями в районе, который называется зоной разломов Кларион-Клиппертон [6-8];

3) кобальтоносные железомарганцевые корки (КМК) богаты целым рядом металлов, включая кобальт, теллур, никель, медь, платину, цирконий, вольфрам и редкоземельные элементы, образующиеся на свободных от отложений склонах подводных гор, океанских плато и других возвышенных топографических объектов в океане на глубине 600-3500 м [9, 10].

Общий вид известных и исследованных зон месторождений различных полезных ископаемых дна показан на карте (рис. 1).



Рис. 1. Мировая карта подводных твердых полезных ископаемых

Одной из главных задач стоит создание экономически целесообразного комплекса, способного добывать полезные ископаемые с глубин более 2 км, так как требования к технологии и оборудованию абсолютно уникальны. Как правило, предлагается использовать связанные с кораблем обеспечения сборщики на гусеничном ходу или с исполнительными органами шагающего типа, обеспечивающие отделение и захват полезного ископаемого со дна, с возможностью минимального воздействия на окружающую среду [9, 11].

В случаях сбора ЖМК ситуация благоприятна тем, что их необходимо только собрать и транспортировать с помощью местной гидротранспортной системы в придонный бункер, находящийся либо на самом сборщике, либо в ближайшем отдалении. С полезными ископаемыми, залегающими в виде массива (КМК или ГПС), ситуация осложняется в необходимости предварительного разрушения и даже дробления [10, 12].

Для рассредоточенных ЖМК или предварительно разрыхленных КМК/ГПС, перспективным направлением на сегодняшний день является использование множества автономных сборщиков с механическими захватами [12, 13], которые охватывают одновременно большую площадь сбора и транспортируют собранный материал в придонный бункер. У такой системы есть множество плюсов: использование параллельно большого количество сборщиков, позволяет обеспечивать высокую производительность работ, минимизировав вред окружающей среде по сравнению с установками на гусеничном ходу или буксируемыми установками, высокая мобильность комплекса, избирательный принцип сбора конкреций со дна. Недостатки в основном связаны со сложностью реализации такого проекта.

У каждой концепции ключевой проблемой остается непосредственно подъем собранного материала со дна на поверхность, который и обуславливает итоговую производительность комплекса [9, 12].

Системы по подъему полезного ископаемого можно условно разделить:

- механические циклические, управляемые с поверхности (канатные грейферы, драги, скипы (бабьи) на канатах);
- гидравлические поточные (земснаряды, эрлифты, эжекторы);
- роботизированные (частично или полностью автономные самопогружающиеся и самовсплывающие устройства) [10].

Наиболее перспективным способом по нашему мнению является использование скиповых подъемных установок, адаптированных для подводной среды. Как и в воздушной среде, шахтный скиповой подъем остается высоко рентабельным методом подъема. В частности, многоканатный скиповой подъем является единственным способом подъема для рудников глубокого залегания [13-15].

В статье рассматривается многоканатный двухскиповой подъем на гибких проводниках в качестве основного подъема полезного ископаемого со дна океана до разгрузочного бункера на судне обеспечения. С целью проверки применимости многоканатного подъема в условиях глубоководной добычи ниже представлена измененная методика расчета основных параметров подъема, основанная на известных подходах к расчету классического шахтного подъема.

Обоснование выбора многоканатного подъема в условиях подводной добычи

Укрупненно различают два типа скиповых подъемных установок: с барабанными подъемными машинами и со шкивами трения [14, 15].

Первый тип в свою очередь может быть реализован как с одноконцевым подъемом (спуск порожнего сосуда с последующим подъемом этого же сосуда после загрузки), так и с двухконцевым (одновременный спуск порожнего сосуда и подъем груженого). Одноконцевой подъем на сегодняшний день является единственным способом подъема, активно используемым в условия подводной разведки, опытной добычи, а также спуске и подъеме испытательных аппаратов, зондов, вспомогательного оборудования и пробоотборочных инструментов.

Для промышленной добычи требуется достаточная модернизация одноконцевого подъема, особенно в части прочности подъемного каната, и разработка нового грузозахватного оборудования [16].

Так, например, разработана концепция одноконцевого подъема с опусканием и подниманием бункера-накопителя (бадьи) с помощью управляемого захватного устройства, представленная на рисунке 2 [17].

Комплекс для спуска и подъема оборудования для добычи полезных ископаемых со дна морей (рис. 2, а) работает следующим образом. Базовое судно 1, оснащенное барабанной лебедкой 3 с грузонесущим кабель-тросом 4, установленной на корме 2, приплывает к предварительно подготовленному участку разработки полезных ископаемых, и начинают процесс спуска и установки на морском дне бункера-накопителя 27. Для этого захватное устройство 6, соединенное со свободным концом 5 грузонесущего кабель-троса 4, опускают на поверхность бункера-накопителя, и с помощью винтовых зажимов производят захват груза. В процессе спуска работают винтовые движители 26, осуществляющие «правильное» позиционирование бункера-накопителя при опускании или подъеме [17]. Процесс спуска или подъема бункера-накопителя повторяется циклически после заполнения и опорожнения.

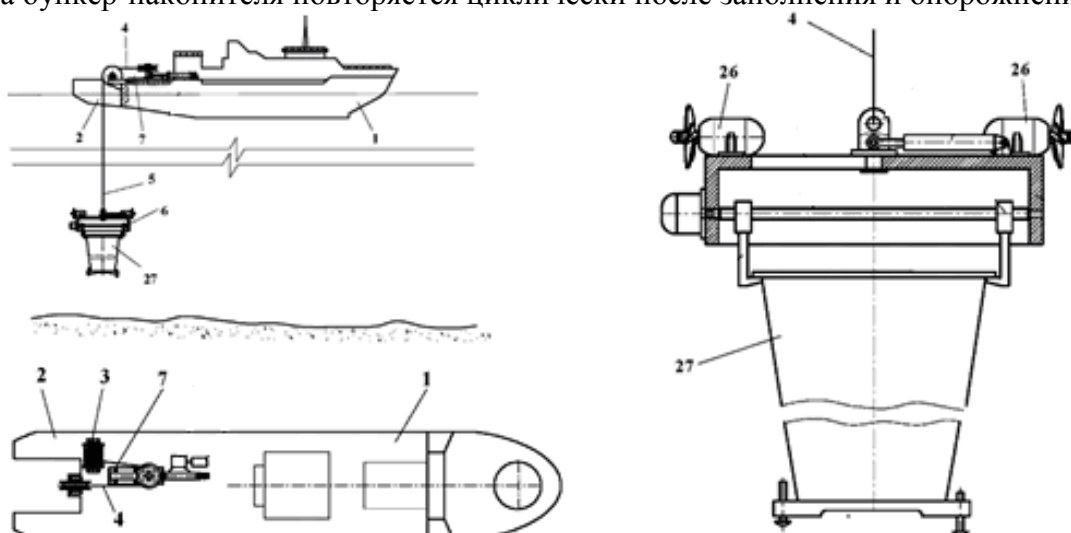


Рис. 2. Комплекс для спуска и подъема оборудования для добычи полезных ископаемых со дна морей

Практика показывает, что даже небольшое волнение моря вызывает ощутимую качку судна обеспечения, что ведет к возникновению дополнительной динамической нагрузки на грузонесущий кабель-трос 4. В основу компенсации вертикальной качки судна обеспечения 1 заложен принцип удлинения или укорачивания кабель-троса в сторону, противоположную

перемещению судна, при помощи устройства линейной компенсации 7 (рис. 3, 4), работающего по принципу гидроцилиндра. В зависимости от направления качения блок, через который пройдет трос, линейно перемещается, тем самым растягивая или укорачивая подъемный трос.

В свою очередь управляемое грузозахватное устройство может иметь несколько вариантов конструкции, два из которых представлены на рисунках 4 и 5 [18].

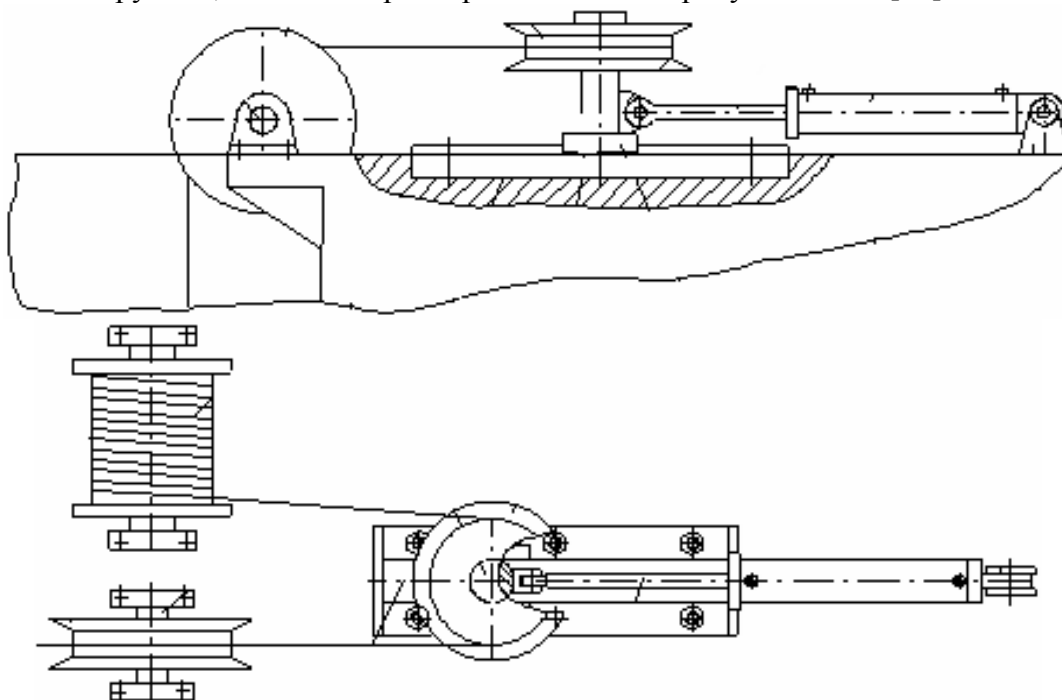


Рис. 3. Устройство линейной компенсации

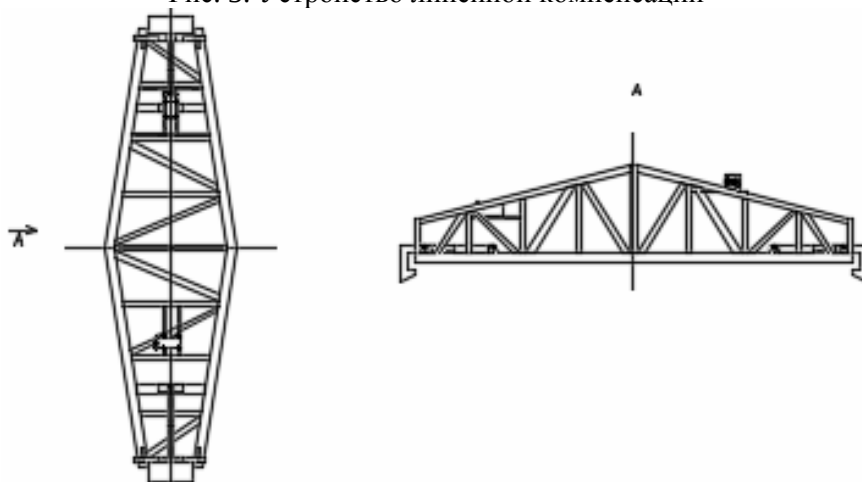


Рис. 4. Вариант № 1 исполнения грузозахватного механизма

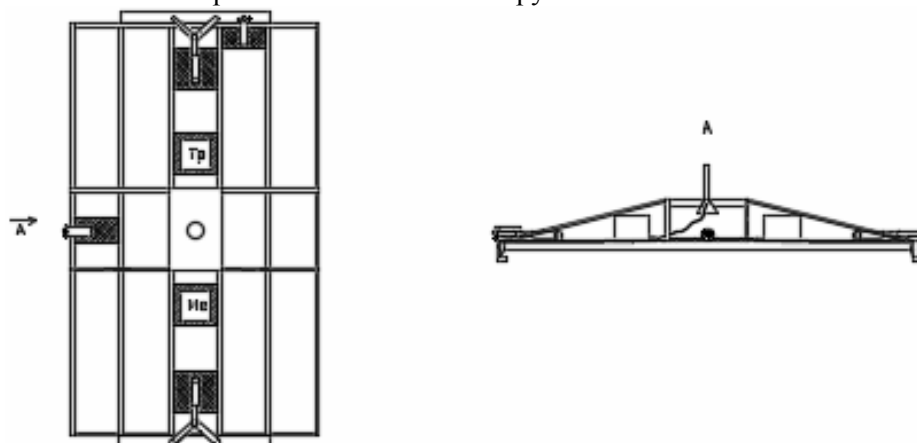


Рис. 5. Вариант № 2 исполнения грузозахватного механизма

Конструкция грузозахватных механизмов должна быть по типу ферма для снижения лобовых сопротивлений и динамической нагрузки на подъемный трос при проведении спускоподъемных операций.

Ключевым недостатком одноконцевого подъема при промышленной добыче является снижение производительности подъема руды в моменты спуска пустого бункера-накопителя. Данный недостаток возможно минимизировать путем реализации двухконцевого подъема, производительность которого постоянна.

Ограничивающим фактором подъемных комплексов с барабанными подъемными установками является предел прочности каната на разрыв и канатоемкость барабана подъемной машины. С ростом глубины спуска сосудов растет длина каната, его диаметр, и увеличиваются габаритные размеры барабана. Габариты барабана подъемной машины играют существенную роль в ограниченных условиях палубы судна-обеспечения при глубоководной добыче.

Также для барабанных подъемных машин необходимо отдельное разнесение подъемной машины и копровых шкивов с соблюдением требуемых углов девиации каната, что также сложно реализовать в стесненных условиях.

Таким образом, наибольший интерес для глубоководной добычи представляют системы со шкивами трения и башенным размещением подъемной машины, то есть непосредственно над сосудами.

Главным преимуществом подъемных систем со шкивами трения является то, что канаты не наматываются на барабан, а огибают его, тем самым барабан подъемной машины выступает в роли канатоведущего шкива. Скипы приводятся в движение путем передачи крутящего момента между поверхностью шкива и поверхностью прижатого к шкиву каната. Вторым основным преимуществом систем со шкивом трения является то, что можно использовать несколько подъемных канатов, поэтому такие системы часто называют многоканатными подъемами. На действующих рудниках количество подъемных канатов на машинах со шкивами трения варьирует в пределах 2-8 шт.

Основным недостатком многоканатных подъемов, как правило, считается требование к точной уравнированности груженой и порожней ветвей, что может быть реализовано через закрепление на дне сосудов уравнивающих канатов, которые в свою очередь могут перехлестнуться и являются дополнительными элементами обслуживания. Другим ограничивающим фактором служит такое явление как проскальзывание канатов вокруг шкива трения, чего позволяет избежать специальная футеровка шкива трения [19] и защита подъемных канатов от окружающей среды.

Стоит отметить, что неуровненность системы, имеющая место быть в воздушной среде, частично нивелируется в водной среде, где появляется выталкивающая сила Архимеда.

Принципиальная компоновочная схема многоканатной подъемной установки, реализованная на судне обеспечения, схематично изображена на рисунке 6.

На судне обеспечения располагается надстройка 1, выполняющая роль надшахтного здания и копра [20]. Внутри надстройки на нижней палубе расположена подъемная машина со шкивом трения 2, который огибают подъемные канаты 9, пропущенные через систему копровых отклоняющих шкивов 3, которые обеспечивают необходимый обхват шкива трения (более 180 град) и расположение точек схода канатов за палубой корабля.

Слева и справа от корабля на подъемных канатах подвешены скипы 7, которые поступательно перемещаются по гибким проводникам – направляющим канатам 10. Для движения вдоль направляющих канатов на подъемном сосуде установлены муфты скольжения 16. Направляющие канаты одним своим концом закреплены на натяжных барабанах 4, которые в зависимости от качки судна наматывают или разматывают канаты, а другие концы жестко закреплены на дне океана в районе обрабатываемого участка.

Для точного слежения за качкой судна внутри корабля направляющие канаты пропускаются через устройства слежения 5, которые дистанционно связаны с намоточными барабанами 4. Устройство слежения реализовано по тому же принципу, что представлено в

комплексе с одноконцевым подъемом (рис. 2, а). Для размещения точек сход направляющих канатов в необходимом месте используются отклоняющие барабаны 13.

Скипы 7 попеременно поднимаются и опускаются с загрузкой на дне через подводный бункер 11 и загрузочный лоток 12, а разгрузкой в бункер-трюм 6, находящийся ниже уровня водораздела корабля.

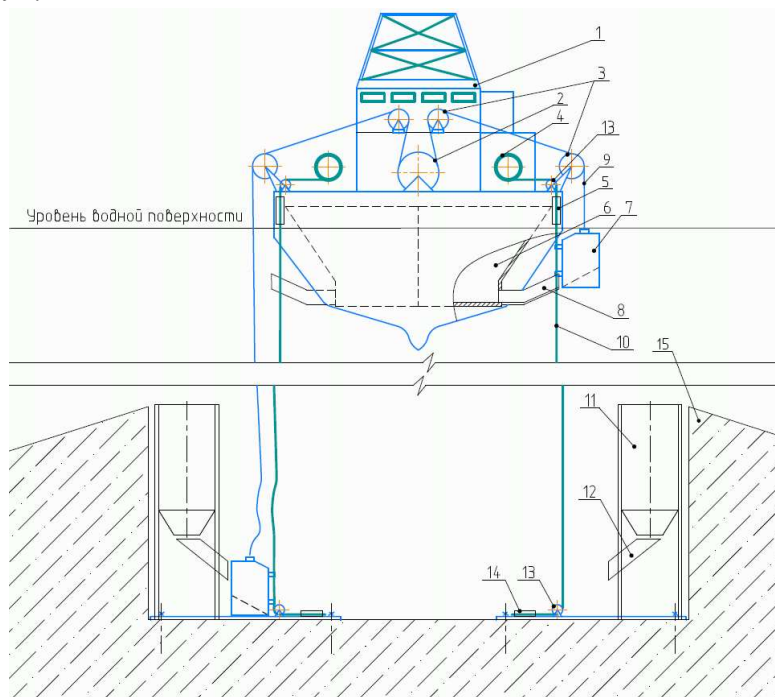


Рис. 6. Схема многоканатного подъемного комплекса для глубоководной добычи с гибкими направляющими: 8 – разгрузочный лоток; 14 – устройство жесткого крепления направляющего каната; 15 – искусственная насыпь

Для обеспечения гарантированной разгрузки скипов в бункер-трюм корабль необходимо поддерживать в частично подтопленном состоянии так, чтобы нижняя часть бункера-трюма и непосредственно разгрузочный лоток 8 были заполнены водой.

Разгружаемая масса из скипов вместе с жидкостью поступает в бункер-трюм, при этом в последнем должно быть установлено устройство циркуляции так, чтобы лишняя жидкость удалялась обратно в океан, а разгружаемая масса перемещалась в другой участок трюма.

Особенностью подводного многоканатного подъема является требование, не поднимать транспортный сосуд на палубу судна, а оставлять его под водой у границы водораздела судна. Перегрузки при поднятии сосуда из воды могут нарушить безопасное использование многоканатного подъема, поэтому рационально поднимать полезные ископаемые гидротранспортом на судно.

Критерии, которые необходимо соблюдать при реализации многоканатного подводного подъема:

- для обеспечения достаточного усилия прижатия каната к шкиву трения необходимо использовать дополнительные устройства прижатия канатов (например, прижимные цепи), а также их очистку от влаги (обдув через форсунки после выхода канатов на поверхность);
- разнести сосуды на достаточное расстояние для исключения их столкновения или перехлесту подъемных канатов;
- поддерживать своевременное натяжение и ослабление направляющих канатов для равномерного передвижения сосудов, а также исключения их перехлестывания.

Особенности методики расчета основных параметров и оценка рисков многоканатного подъема в условиях подводной добычи

Расчет шахтного многоканатного подъема выполняют по известным методикам [21-23] для проверки соблюдения основных условий, регламентируемые федеральными нормами и

правилами в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утвержденных приказом №505 от 8 декабря 2020 г. (далее ФНППБ):

- обеспечение требуемого запаса прочности канатов и элементов подъемной машины;
- обеспечение неперевышения требуемого давления каната на футеровку канатоведущего шкива;

- обеспечение условия нескольжения каната по канатоведущему шкиву.

Зададимся следующими исходными данными, сведенными в таблицу 1.

Табл. 1. Исходные данные для расчета

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Глубина опускания сосуда	H	м	4 000
Полезный объем скипа	$V_{ск}$	м ³	14
Плотность собираемого материала (руды)	ρ_p	кг/м ³	1 430
Грузоподъемность скипа	$m_{зр}$	кг	20 000
Масса скипа, включая подвесные устройства	m_c	кг	4 000
Плотность материала из которого изготовлен скип (стали)	$\rho_{ск}$	кг/м ³	7 800
Объем тела скипа	$v_{ск}$	м ³	0,5
Угол обхвата канатоведущего шкива	α	град	195
Угол обхвата канатоведущего шкива	α	рад	3,4
Коэффициент трения между тросом и приводным барабаном	f	-	0,35
Плотность морской воды	$\rho_{ж}$	кг/м ³	1 030

Проверку многоканатного подъема по критерию нескольжения производят по формуле:

$$K_{cm(\partial on)} \leq K_{cm}, \quad (1)$$

где $K_{cm(\partial on)}$ – коэффициент допустимых статических натяжений, значение которого обеспечивает нескольжения каната; K_{cm} – рассчитываемый коэффициент статических натяжений каната.

Коэффициента допустимых статических натяжений определяется по формуле:

$$K_{cm(\partial on)} \leq 0,485(e^{f\alpha} + 0,25), \quad (2)$$

где f – значение коэффициента трения между шкивов и канатом; α – угол обхвата шкива канатом, рад.

Подставив исходные значения, получим:

$$K_{cm(\partial on)} \leq 0,485(e^{0,35 \cdot 3,4} + 0,25); \quad K_{cm(\partial on)} \leq 1,71.$$

Значение коэффициента статических натяжений каната вычисляется по формуле (3) и для условий водной среды раскрывается в следующем виде:

$$K_{cm} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{S_1 + F_A}{S_2 - F_A}, \quad (3)$$

где S_1 – статическое натяжение груженой ветви, Н; S_2 – статическое натяжение порожней ветви (массой канатов выше уровня водной поверхности в расчете условно пренебрежено), Н; m_k – масса 1 погонного метра каната, кг; n_k – количество подъемных канатов, шт; m_g – масса воды в порожнем скипе; F_A – сила Архимеда, Н.

Сила Архимеда рассчитывается по известному закону:

$$F_A = \rho_{ж} g v_{ск}. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4) сила Архимеда есть величина постоянная и зависит от объема вытесняемой жидкости, а соответственно от массы и габаритов скипа. Однако, порожний скип заполнен только водой, а при загрузке его полезным ископаемым вода вымещается, и следует учитывать массу перевозимого груза в скипе. То есть в случае с

груженым скипом сила Архимеда будет больше на объем погруженной массы. Соответственно значения силы Архимеда для груженого и порожнего скипа составит:

$$K_{ст} = \frac{S_1 - F_{A.зр}}{S_2 - F_{A.пор}} = \frac{(m_k n_k H + m_c + m_{зр})g - \rho_{жс} g(v_{ск} + v_p)}{(m_c + m_{\theta})g - \rho_{жс} g v_{ск}} =$$

$$= \frac{m_k n_k H + m_c + m_{зр} - \rho_{жс} (V_{ск} + v_{ск})}{m_c + \rho_{жс} (V_{ск} - v_{ск})}, \quad (3)$$

где v_p – объем поднимаемого груза (руды), $v_p = V_{ск}$.

Предварительно подобранный канат проверяют по необходимому запасу прочности. Для этого значение максимальной концевой нагрузки сравнивают с разрывным усилием каната согласно п. 511 ФНППБ по системе неравенств:

$$\begin{cases} \frac{Q_{разр}}{(m_c + m_{зр})g} \geq b_1, \\ \frac{Q_{разр}}{S_{\max}} \geq b_2, \end{cases} \quad (5)$$

где b_1 – коэффициент безопасности для грузовых многоканатных установок без учета массы каната, $b_1 = 9,5$; b_2 – коэффициент безопасности для грузовых многоканатных установок с учетом массы каната, $b_2 = 4,5$; $Q_{разр}$ – суммарное разрывное усилие всех проволок каната, Н; $S_{\max}$ – максимальное статическое натяжение каната, Н.

В нашем случае максимальное статическое натяжение каната будет в моменте, когда груженный скип находится на дне и полностью загружен. Соответственно справедливо условие $S_{\max} = S_1$. Также, при наличии нескольких канатов, значение статического натяжения должно быть поделено на количество канатов. Учитывая все вышесказанное, выражение (5) примет вид системы неравенств:

$$\begin{cases} \frac{Q_{разр} n_k}{(m_c + m_{зр})g} \geq 9,5, \\ \frac{Q_{разр} n_k}{S_1} \geq 4,5, \end{cases} \quad (6)$$

Существуют импортные тросы марки Dyneema. Данные тросы изготовлены из синтетических материалов, являются весьма легкие и обладают высокой прочностью. Недостатком таких решений служит невозможность вплетения в их сечение информационных или силовых кабелей.

Отечественные разработки предлагают кабель-тросы на основе арамидных проволок производства АО «ЦПТ». В данный момент на заказ изготавливается экспериментальный кабель-трос диаметром 60 мм, удельной массой 2,6 кг/м и разрывным усилием 2500 кН, который предполагается использоваться при реализации одноконцевого подъема в качестве несущего каната, а также для передачи информации на грузозахватное устройство.

Для имеющейся концевой нагрузки подходят синтетические тросы Dyneema 26 мм и 40 мм при их количестве 4 шт. и 2 шт. соответственно. Арамидный трос диаметром 60 мм может использоваться в количестве 1 шт.

Для вышеописанных канатов с учетом их параметров и количества посчитаны коэффициенты статических натяжений по формуле (3).

В подъемных машинах со шкивами трения удельное давление каната на шкив – один из важных параметров. Он предопределяет конструктивное исполнение канатопроводящего шкива, его габариты, возможности применения разных фрикционных материалов для футеровки шкива и в целом определяет эксплуатационные качества машины. При расчете многоканатных машин пользуются значением удельного давления на футеровку шкива, которое определяется по формуле:

$$P = \frac{(S_1 + S_2)}{D_{шт} d_k} \leq P_{доп} \quad (7)$$

где $P_{доп}$ – допустимое давление на шкив трения, $P_{доп} = 2,0$ МПа; $D_{шт}$ – диаметр шкива трения, мм.

Диаметр шкива трения зависит от диаметра подъемного каната. Нормами безопасности регламентируется минимально допустимое соотношение диаметра каната от диаметра шкива трения. Для многоканатных подъемных машин, данное соотношение составляет 95 и выражение для расчета диаметра шкива трения примет вид:

$$D_{шт} = 95d_k, \quad (8)$$

где d_k – диаметр подъемного каната, мм.

По представленным выражениям (3)-(8) посчитаны основные параметры подъема для различных комбинаций диаметра и количества подъемных канатов. Полученные значения сведены в таблицу 2.

Табл. 2. Расчетные параметры многоканатного подъема

Параметр	Ед. изм.	Значение		
		Синтетические тросы Дунеема		Арамидный кабель-трос АО «ЦПТ»
Количество подъемных канатов, шт.	n_k	4	2	1
Диаметр каната, мм	d_k	26	40	60
Масса 1 погонного метра каната, кг/пог. м	m_k	0,384	0,881	2,6
Разрывное усилие каната, кН	$Q_{разр}$	600	1 260	2 500
Запас прочности без учета массы канатов	$z_1 \geq 9,5$	$10,2 \geq 9,5$	$10,7 \geq 9,5$	$10,6 \geq 9,5$
Натяжение гружено ветви, Н	S_1	295 908,8	304 777,1	337 660,2
Запас прочности с учетом массы канатов	$z_2 \geq 4,5$	$8,1 \geq 4,5$	$8,3 \geq 4,5$	$7,4 \geq 4,5$
Натяжение гружено ветви, Н	S_2	18 420,0	18 420,0	18 420,0
Коэффициента статических натяжений каната	$K_{ст}$	$0,85 \leq 1,7$	$0,9 \leq 1,71$	$1,09 \leq 1,71$
Минимальный диаметр шкива трения, мм	$D_{шт}$	2 470	3 800	5 700
Удельное давление на футеровку шкива трения при минимальном диаметре шкива трения	P	$4,89 \leq 2,0$ – условие не выполняется	$2,12 \leq 2,0$ – условие не выполняется	$1,04 \leq 2,0$ – условие выполняется
Принятый диаметр шкива трения, мм	$D_{шт}$	6 200	4 100	5 700
Удельное давление на футеровку шкива трения	P	$1,95 \leq 2,0$	$1,97 \leq 2,0$	1,04

Из таблицы 2 видно, что при использовании 2-х и 4-х тросов Дунеема с диаметрами 26 и 40 мм соответственно потребуется использование шкива трения диаметром 6200 и 4100 мм соответственно. В тоже время, для использования 1-го арамидного троса АО «ЦПТ» минимальный диаметр шкива трения составит 5700 мм. Для уменьшения минимального диаметра шкива трения потребуется отступление от требований норм безопасности.

Согласно регламентирующим ограничениям норм безопасности наиболее предпочтительнее использование 2-х тросов диаметром 40 мм и разрывным усилием 1200 кН.

С другой стороны, регламентирующие документы для организации промышленной безопасной при подводной добычи полезных ископаемых отсутствуют, и не совсем корректно руководствоваться требованиями, предъявляемыми к шахтным (рудничным) подъемам.

Так, например, пересмотр требований по запасу прочности канатов, а также соотношения диаметра шкива трения от диаметра каната приведет к увеличению максимальной допустимой концевой нагрузки, что позволит увеличить грузоподъемность скипов при сохранении параметров тросов. Безусловно, из-за специфики условий эксплуатации в последующем нормы безопасности должны быть скорректированы.

Расчет производительности подъема

Для расчета производительности подъема следует определить кинематику движения сосудов. Целесообразно предварительно задаться классической трехпериодной тахограммой движения, по которой можно рассчитать время каждого этапа движения и время полного цикла [24, 25].

Полный путь будет складываться из трех участков, пройденных сосудом соответственно за время ускоренного, равномерного и замедленного движений.

Наличие высоких лобовых сопротивлений в воде не позволит развивать скорость более 3 м/с. Поэтому на самом длинном участке равноускоренного движения данная скорость будет максимальной.

Основные получившиеся данные по производительности подъема представлены в таблице 3.

Табл. 3. Производительность подводного многоканатного подъема

Характеристика периодов	Время, с	Путь, м
1 – ускоренное движение (при $a = 0,5 \text{ м/с}^2$), разгон до максимальной скорости	12	18
2 – равномерное движение (при $V=3 \text{ м/с}$), движение с максимальной скоростью	1 321	3 964
3 – замедленное движение (при $a = -0,5 \text{ м/с}^2$), торможение до остановки	12	18
Разгрузка/загрузка	120	0
Параметр	Значение	
Полное время цикла, с	1 465	
Количество циклов в час	2,46	
Часовая производительность, т/ч	49,2	
Режим работы подъема, дн./год	250	
Время работы подъема, ч/сут.	15	
Техническая годовая производительность подъема, т/год	184 485	

Выводы

Использование канатного подъема при глубоководной добыче в качестве основного транспорта руды и/или вспомогательного для подъема элементов подводного комплекса является перспективным направлением в виду изученности процесса работы и наличия технических средств для его реализации.

При глубоководной добыче рекомендуется рассматривать применение двухконцевого подъема, основывающегося на принципе машин со шкивами трения – многоканатной подъемной системы. Это позволит поднимать собранные полезные ископаемые без потери времени на спуск порожней емкости.

Целесообразно развести скипы по разным бортам судна обеспечения с помощью отклоняющих шкивов, а в качестве проводников сосудов использовать гибкие направляющие канаты.

При использовании двух подъемных канатов (кабель-тросов) с суммарным разрывным усилием не менее 1200 кН, диаметром порядка 40 мм и массой погонного метра до 1 кг возможно поднимать одновременно скипы грузоподъемностью до 20 т, при этом годовая техническая производительность подъемного комплекса с двумя скипами может достигать 184 тыс. т/год.

При работе подводного многоканатного подъема существенные риски возможны из-за изменения условий трения канатов о барабан подъемной машины, поэтому следует рассматривать дополнительные технологии по увеличению значений коэффициента трения и угла обхвата канатов. Мероприятия по увеличению коэффициента трения должны быть направлены на подбор материала футеровки с лучшим фрикционным сцеплением. Кроме того, при использовании подъема в условиях глубоководной добычи, материал футеровки должен обладать дополнительными свойствами, обеспечивающие непроскальзывание мокрых канатов. Данная задача может считаться научной и будет находиться в области материаловедения и на данный момент не имеет технического решения. Изменение угла обхвата возможно, добавив дополнительные отклоняющие шкивы под основной шкив трения. Данное техническое решение известно и описывается во множестве источников.

При невозможности подбора значений коэффициента трения и угла обхвата, удовлетворяющих условию непроскальзывания, следует рассматривать устройства, осуществляющие дополнительную нагрузку на порожнюю ветвь – балласт. Масса балласта подбирается таким образом, чтобы выполнялось условие непроскальзывания в самом нагруженном состоянии – груженный скип перед разгрузкой. Применение балласта осложняется тем, что возникает необходимость в постоянном его монтаже после разгрузки скипа на поверхности и демонтаже под водой перед новой загрузкой.

Оптимальной заменой балласта могут послужить дополнительные движители, установленные на скипах и создающие попеременное усилие в зависимости от опускания и подъема скипа. Величина значения усилия, создаваемого движителем, должна соответствовать массе балласта.

Список литературы

1. Комплексное освоение недр: перспективы расширения минерально-сырьевой базы России / Под ред. К.Н. Трубецкого, В.А. Чантурия, Д.Р. Каплунова. – М.: Изд-во «ИПКОН РАН», 2009. – 496 с.
2. Вильмис А.Л., Буянов М.И., Калинин И.С., Тивоненко В.А. Твердые полезные ископаемые дна мирового океана – потенциальные объекты для развития геотехнологических методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №3-1. – С. 147-154. – doi.org/10.25018/0236_1493_2021_31_0_147.
3. Кириченко Ю.В., Каширский А.С. История и перспективы развития глубоководной добычи твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №S11. – С. 123-134.
4. Petersen S., Krätschell A., Augustin N., Jamieson J., Hein J.R., Hannington M.D. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deepsea mineral resources // Marine Policy. 2016, vol. 70, pp. 175-187.
5. Андреев С.И., Казакова В.Е., Романова Л.Н. Сульфидные руды мирового океана: распространение, состав, генезис, перспективы освоения // Горный журнал. – 2012. – №3. – С. 7-17.
6. Jiang X.-D., Gong J.-L., Ren J.-B., Zhang J., Chou Y.-M. An interdependent relationship between microbial ecosystems and ferromanganese nodules from the Western Pacific Ocean // Sedimentary Geology. 2020, vol. 398, p. 105588. doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105588.
7. Kang Y., Liu S. The development history and latest progress of deep-sea polymetallic nodule mining technology // Minerals. 2021, vol. 11, p. 1132. doi.org/10.3390/min11101132.
8. Юнгмейстер Д.А., Судариков С.М., Киреев К.А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 88-95. – doi.org/10.31897/PMI.2019.1.88.
9. Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А., Маркелов С.В. Проблемы и перспективы освоения минеральных ресурсов дна морей и океанов // Горный журнал. – 2019. – №11. – С. 27-35. – doi.org/10.17580/gzh.2019.11.07.
10. Tilot V., Fourchault L., Alain J., Mallefet J., Navas J. M. Multilevel assessment and options for the management of cumulative impacts on pelagic ecosystems in the north-eastern tropical Pacific Ocean // Deep-sea mining and the water column. 2024, pp. 415-473. DOI: 10.1007/978-3-031-59060-3_13.
11. Sharma R. Environmental issues of deep-sea mining: impacts, consequences and policy perspectives. – Springer, 2019. – DOI: 10.1007/978-3-030-12696-4.

12. Юнгмейстер Д.А., Королев Р.И., Исаев А.И., Соколова Г.В., Григорчук А.В. Горные машины и оборудование. Специальные вопросы. Выбор конструкций оборудования для добычи морских ЖМК и КМК на основе их физико-механических свойств: учебное пособие. – СПб.: Политехника Сервис, 2023. – 134 с.
13. Андреев С.И., Черкашев Г.А. Минеральные ресурсы глубоководных районов Мирового океана: состояние проблемы изучения и освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2018. – №1. – С. 10-15.
14. Toro N., Robles P., Jeldres R.I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: a critical review // *Ore Geology Reviews*. 2020, vol. 126, p. 103699. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103699.
15. Трифанов Г.Д. Эксплуатация шахтных подъемных установок. – Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического ун-та, 2015. – 314 с.
16. Зотов В.В., Кузиев Д.А., Рыжов И.М. Основные направления повышения технического уровня шахтных подъемных установок // *Горная промышленность*. – 2014. – №2(114). – С. 111-112.
17. Рахутин М.Г., Каширский А.С. Расчет и прогноз производительности оборудования для подводной добычи твердых полезных ископаемых // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. – 2020. – №4. – С. 39-45.
18. Atmanand M.A., Ramadass G.A. Concepts of deep-sea mining technologies // *Deep-sea mining*. 2017, pp. 305-343. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_10.
19. Анцев В.Ю., Витчук П.В., Федоров А.В. Способы увеличения тяговой способности канатоведущего шкива // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2014. – №11-1 – С. 44-54.
20. Кассихина Е.Г. Разработка системы конструирования стальных копров многофункционального назначения для шахт нового технического уровня // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – №9. – С. 136-141.
21. Ishiguro S., Masuda M., Komatsu M., Yamaji N., Kawano S. Development of the Pilot System for Test of Excavating and Ore lifting of Seafloor Polymetallic Sulfides // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2018, vol. 55, no. 3, pp. 1-7.
22. Бородин Э.О., Королев Р.И. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций с механизмом шагания // *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019. Сборник научных трудов*. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. – С. 69-76.
23. Бережинский В.И., Шатило А.Н. Канаты шахтных подъемных установок. – М.: Изд-во ЛКС, 2015. – 232 с.
24. Балашев И.А. Расчет подъемных канатов по нагрузочным коэффициентам и концевой нагрузке // *Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова*. – 1949. – Т. 67. – С. 43-57.
25. Мартынихин В.Д. Расчет тягово-несущих канатов с параллельными совместно нагруженными ветвями, образующими замкнутый контур // *Механизация лесоразработок и транспорта леса*. – 1972. – №2. – С. 35-43.

References

1. Integrated development of subsoil resources: prospects for expanding Russia's mineral resource base / Edited by K.N. Trubetskoy, V.A. Chanturia, D.R. Kaplunov. – М.: Publ. house «IPKON RAS», 2009. – 496 p.
2. Vilms A.L., Buyanov M.I., Kalinin I.S., Tivonenko V.A. Solid mineral deposits of the world ocean – potential objects for the development of geotechnologies // *Mining information and analytical bulletin*. 2021, no. 3-1, pp. 147-154. doi.org/10.25018/0236_1493_2021_31_0_147.
3. Kirichenko Yu.V., Kashirskiy A.S. History and prospects of deep sea hard mineral mining // *Mining information and analytical bulletin*. 2015, no. S11, pp. 123-134.
4. Petersen S., Krätschell A., Augustin N., Jamieson J., Hein J.R., Hannington M.D. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deepsea mineral resources // *Marine Policy*. 2016, vol. 70, pp. 175-187.
5. Andreev S.I., Kazakova V.E., Romanova L.N. Sulphide ores of the world ocean: distribution, composition, genesis, development prospects // *Mining Journal*. 2012, no. 3, pp. 7-17.
6. Jiang X.-D., Gong J.-L., Ren J.-B., Zhang J., Chou Y.-M. An interdependent relationship between microbial ecosystems and ferromanganese nodules from the Western Pacific Ocean // *Sedimentary Geology*. 2020, vol. 398, p. 105588. doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105588.
7. Kang Y., Liu S. The development history and latest progress of deep-sea polymetallic nodule mining technology // *Minerals*. 2021, vol. 11, p. 1132. doi.org/10.3390/min11101132.
8. Yungmeister. D.A., Sudarikov S.M., Kireev K.A. Feasibility of type of deep-water technologies for the extraction of marine ferro-manganese nodules // *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 235, pp. 88-95. doi.org/10.31897/PMI.2019.1.88.
9. Drobadenko V.P., Vilms A.L., Lukonina O.A., Markelov S.V. Problems and prospects for the development of mineral resources of the seabed and ocean floor // *Mining Journal*. 2019, no. 11, pp. 27-35. doi.org/10.17580/gzh.2019.11.07.
10. Tilot V., Fourchault L., Alain J., Mallefet J., Navas J. M. Multilevel assessment and options for the management of cumulative impacts on pelagic ecosystems in the north-eastern tropical Pacific Ocean // *Deep-sea mining and the water column*. 2024, pp. 415-473. DOI: 10.1007/978-3-031-59060-3_13.

11. Sharma R. Environmental issues of deep-sea mining: impacts, consequences and policy perspectives. – Springer, 2019. – DOI: 10.1007/978-3-030-12696-4.
12. Yungmeister D.A., Korolev R.I., Isaev A.I., Sokolova G.V., Grigorchuk A.V. Mining machines and equipment. Special issues. Selection of equipment designs for extraction of deep-sea FMN and CMC based on their physical and mechanical properties: studying book – SPb.: Polytechnic Service, 2023. – 134 p.
13. Andreev S.I., Cherkashev G.A. Mineral resources of the deep-sea regions of the World Ocean: the state of the problem of study and development // Mineral resources of Russia. Economics and management. 2018, no. 1, pp. 10-15.
14. Toro N., Robles P., Jeldres R.I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: a critical review // Ore Geology Reviews. 2020, vol. 126, p. 103699. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103699.
15. Trifanov G.D. Operation of mine hoisting installations – Perm: Publ. house of Perm National Research Polytechnic University, 2015. – 314 p.
16. Zotov V.V., Kuziev D.A., Ryzhov I.M. Main trends of improving the mine hoist engineering performance standards // Russian Mining Industry. 2014, no. 2(114), pp. 111-112.
17. Rakhutin M.G., Kashirskiy A.S. Calculation and forecast of productivity of equipment for underwater extraction of solid minerals // Bulletin of Tver State Technical University. Series: Technical Sciences. 2020, no. 4, pp. 39-45.
18. Atmanand M.A., Ramadass G.A. Concepts of deep-sea mining technologies // Deep-sea mining. 2017, pp. 305-343. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_10.
19. Antscev V.Yu., Vitchuk P.V., Fedorov A.V. The methods for increasing traction capability of cable sheave // News of the Tula State University. 2014, no. 11-1, pp. 436-446.
20. Kassikhina E.G. Development of the designing system of multi-purpose steel headframes for the mines of the new technological level // Mining information and analytical bulletin. 2015, no. 9, pp. 136-141.
21. Ishiguro S., Masuda M., Komatsu M., Yamaji N., Kawano S. Development of the Pilot System for Test of Excavating and Ore lifting of Seafloor Polymetallic Sulfides // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2018, vol. 55, no. 3, pp. 1-7.
22. Borodkin E.O., Korolev R.I. A device for collecting ferromanganese nodules with a walking mechanism // Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics: IPDME-2019. Collection of scientific papers. – SPb.: Saint-Petersburg Mining University. 2019. – P. 69-76.
23. Berezinsky V.I., Shatilo A.N. Ropes of mine hoisting installations. – Moscow: Publ. house LKS, 2015. – 232 p.
24. Balashev I.A. Calculation of hoisting ropes by load coefficients and end load // News of the Tomsk order of Labor Red Banner Polytechnic Institute named after S.M. Kirov. 1949, vol. 67, pp. 43-57.
25. Martynikhin V.D. Calculation of traction-carrying ropes with parallel jointly loaded branches forming a closed contour // Mechanization of logging and forest transport. 1972, no. 2, pp. 35-43.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Королёв Роман Иванович – кандидат технических наук, главный специалист горно-механического сектора отдела горного проектирования	Korolev Roman Ivanovich – candidate of technical sciences, chief specialist of the mining and mechanical sector of the mining design Department
Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроения	Yungmeister Dmitriy Alekseevich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of mechanical engineering
Ефимов Фёдор Андреевич – аспирант	Efimov Fyodor Andreevich – postgraduate student
Фёдоров Евгений Васильевич – аспирант	Fedorov Evginiy Vasilievich – postgraduate student
fyodor_efimov99@mail.ru	

Получена 22.09.2025