

Научная статья

УДК 622.232

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-49-56

Сержан Сергей Леонидович*, Малеванный Дмитрий Владимирович

Санкт-Петербургский горный университет

*E-mail: serzhan_sl@pers.spmi.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ КАПСУЛЫ**Информация о статье**

Поступила:

16 марта 2023 г.

Одобрена после
рецензирования:

18 апреля 2023 г.

Принята к печати:

27 апреля 2023 г.

Опубликована:

17 мая 2023 г.

Ключевые слова:

подводная добыча твердых полезных ископаемых, железомарганцевые конкреции, подводный добычный комплекс, промежуточная капсула, гидравлический подъем конкреций.

Аннотация.

В работе представлена технология для разработки глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых. В частности, рассматривается транспортная часть процесса добычи. Произведен анализ горно-геологических условий залегания глубоководных месторождений ЖМК и корок, выделены усредненные показатели условий среди месторождений, относящихся к Российской Федерации. Рассмотрены существующие подводные добычные комплексы, их принцип работы, обозначены недостатки применения поточного способа подъема полезного ископаемого. Обозначена необходимость разделения процесса транспортирования на два этапа, тем самым осуществляя подъем циклично-поточным методом. Описана конструкция капсулы с атмосферным воздухом, рассмотрены ее основные элементы и функции. Описана технология с применением капсулы, приведен предполагаемый цикл производства. Выведена формула расчета годовой производительности транспортного этапа технологии, с учетом допущений в производительности грунтозаборного устройства. Произведен расчет производительности с использованием данных горно-геологических условий залегания месторождения ЖМК в Российском Разведочном Районе Атлантического океана. Полученные данные занесены в таблицу. Выполнено построение графика роста производительности при изменении длины главной полуоси эллипсоидной капсулы с 1 м до 25 м. Выведено значение максимально возможной производительности при приведенном соотношении осей.

Для цитирования: Сержан С.Л., Малеванный Д.В. Технология глубоководной добычи твердых полезных ископаемых с применением промежуточной капсулы // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 2 (166). С. 49-56. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-49-56, EDN: HWKPMS

Введение

Освоение Мирового океана является одной из наиболее значимых задач с точки зрения научно-технического развития Российской Федерации. В этой связи создание технологий добычи тех или иных глубоководных полезных ископаемых является актуальной задачей. Решение вопросов, связанных с разработкой технологий и подводной добычной техники позволит осуществить развитие целых направлений, в том числе научно-технологических, увеличивая потенциал РФ.

Зарубежные компании предлагают широкий выбор добычных и транспортных технических решений, в то время как отечественные разработки

являются не столь многочисленными и находятся на стадии проектирования. Таким образом, создается технологический и научный разрыв, не позволяющий конкурировать с иностранными достижениями.

Помимо всего прочего, разработка твердых полезных ископаемых позволит нарастить темп добычи таких компонентов, как марганец, кобальт, никель и другие редкоземельные металлы, тем самым обеспечив независимость страны от внешних поставок сырья.

Совокупность приведенных факторов демонстрирует важность и актуальность развития техно-

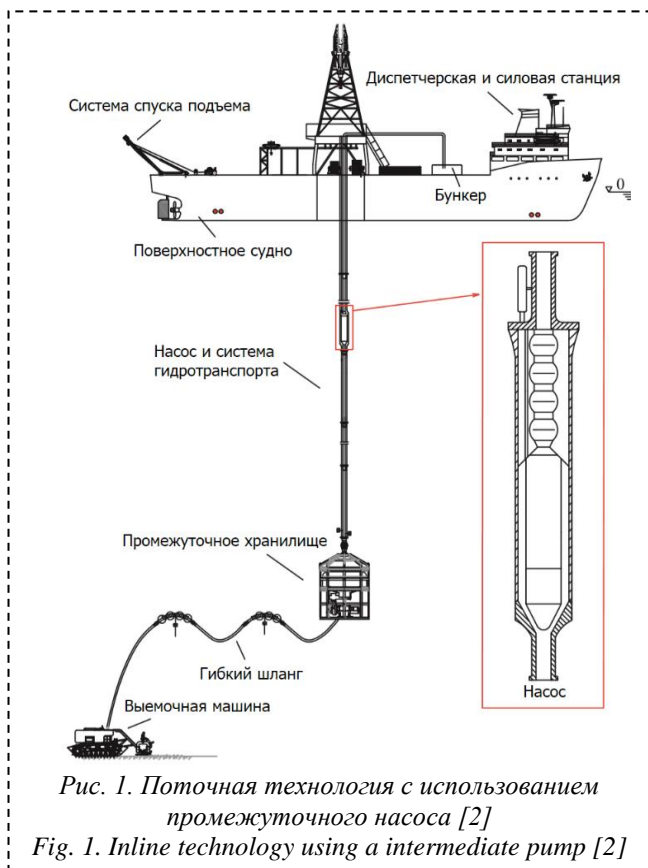


Рис. 1. Поточная технология с использованием промежуточного насоса [2]

Fig. 1. Inline technology using a intermediate pump [2]

логий глубоководной добычи и формирования добычного комплекса.

Горно-геологические ресурсы залегания глубоководных месторождений

Среди существующих твердых полезных ископаемых (ТПИ) океана наиболее перспективными и экономически интересными являются три типа: кобальто-марганцевые корки (КМК), глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС), железомарганцевые конкреции (ЖМК) [7]. Среди прочих образований их выделяет уникальный состав и концентрация редкоземельных металлов, не имеющие аналогов на суше [9, 15]. По условиям залегания можно выделить месторождения сплошного типа, «корки», к которым относятся КМК и ГПС, а также залежи неконсолидированного полезного ископаемого, типа ЖМК. «Корки» представляют собой плащевидную залежь толщиной в среднем в несколько десятков сантиметров, покрывающую морское дно в области месторождения [8]. Зачастую оно заглублено под слоем песка и ила на 10-15 см. Плотность таких корок составляет 1,4-1,7 г/см³, толщина залежи колеблется от 15 до 150 см. Глубина разработки составляет от 1200-3500 м.

Конкреции имеют разнообразную форму: овальная, лепешковидная, шаровидная, почкообразная. Размер конкреций варьируется в диапазоне от 5 до 7 см в поперечном сечении, однако есть и уникальные единицы, имеющие длину в 1,5 м. Средняя плотность таких конкреций составляет 2,6 г/см³, плотность залегания 25 тысяч тонн на 1 км². Глубина разработки варьируется от 4000-7000 м [10, 12].

Анализ существующих технических средств

В общем виде технологию разработки глубоководных месторождений полезных ископаемых можно разделить на 3 основных процесса: процесс добычи, процесс подъема и процесс транспортирования, каждый из которых выполняется отдельной машиной, образующих глубоководный добычной комплекс [1, 2, 11, 16, 24]. Однако для достижения экономически выгодной разработки необходимо, чтобы каждое звено комплекса имело высокую производительность при низких энергозатратах [14]. Так как работы ведутся на больших глубинах (от 3000 метров и глубже), очевидно, что использования циклических способов подъема будет недостаточно, для достижения экономически целесообразной производительности. И совершенно ясно, что при использовании поточных систем, таких как трубопроводный транспорт, процесс подъема полезного ископаемого будет наиболее энергозатратным элементом комплекса. В этой связи необходимо рассматривать подъемно-транспортную часть технологии как определяющее звено в формировании комплекса [17, 18]. Рассмотрим некоторые примеры существующих технологий.

Одной из современных разработок является использование погружного буфера, заполняемого полезным ископаемым, и специального грязевого насоса для подъема пульпы на поверхность (Рис. 1). Насос является уникальной разработкой, позволяющей поддерживать высокий напор с достаточно высоким расходом [2]. Однако стоит понимать, что при подъеме глубоководного твердого полезного ископаемого с помощью насосов с больших глубин трудно поддерживать подобную характеристику [13, 23]. А для глубин свыше 3500 метров подъем с помощью насоса является крайне энергозатратным [20, 21]. Однако существует способ подъема гидросмеси при помощи потенциальной энергии жидкости.

Двухэтапный способ подъема

В общем виде этот способ может быть представлен герметичным полым сосудом (капсулой), имеющим сообщение с атмосферой за счет трубопровода, а также погруженным на определенную глубину (Рис. 2) [22]. Подъем осуществляется в два этапа. Первый, поточный, заключается в преодолении примерно 65-75% высоты за счет разницы гидростатических напоров на дне акватории и в капсуле. Для этого от капсулы опускается трубопровод к некоторой выемочной машине, расположенной на дне и осуществляющей сбор породы, гидросмесь поднимается по трубопроводу, сосуд заполняется. Затем процесс переходит ко второму этапу, циклическому, если по заполнению капсулы она поднимается на поверхность для дальнейшей разгрузки, и поточному, если в капсулу установлен грунтовый насос, перекачивающий пульпу на оставшиеся 25-35% высоты [2]. Однако соответствующий насос будет иметь большое энергопотребление [3, 4]. В этой связи принято решение рассматривать менее энергозатратный вариант, а именно поточно-циклическую технологию подъема.

Для реализации первого этапа подобного способа необходимо создать такую разницу давлений,

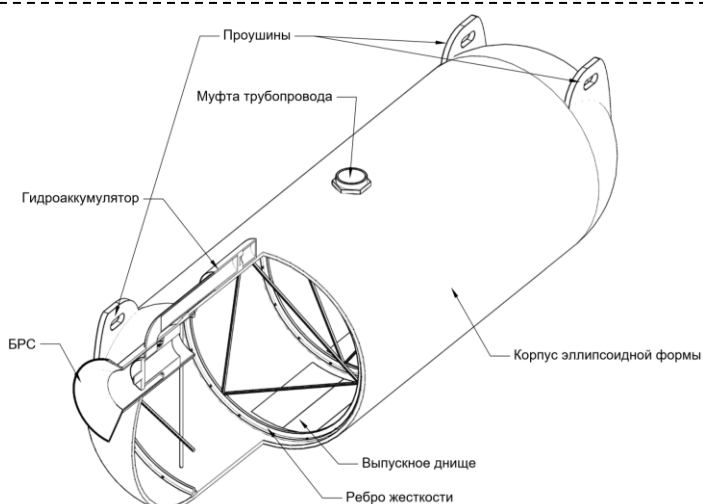


Рис. 2. Погружаемая капсула с атмосферным воздухом
 Fig. 2. Submersible atmospheric air capsule

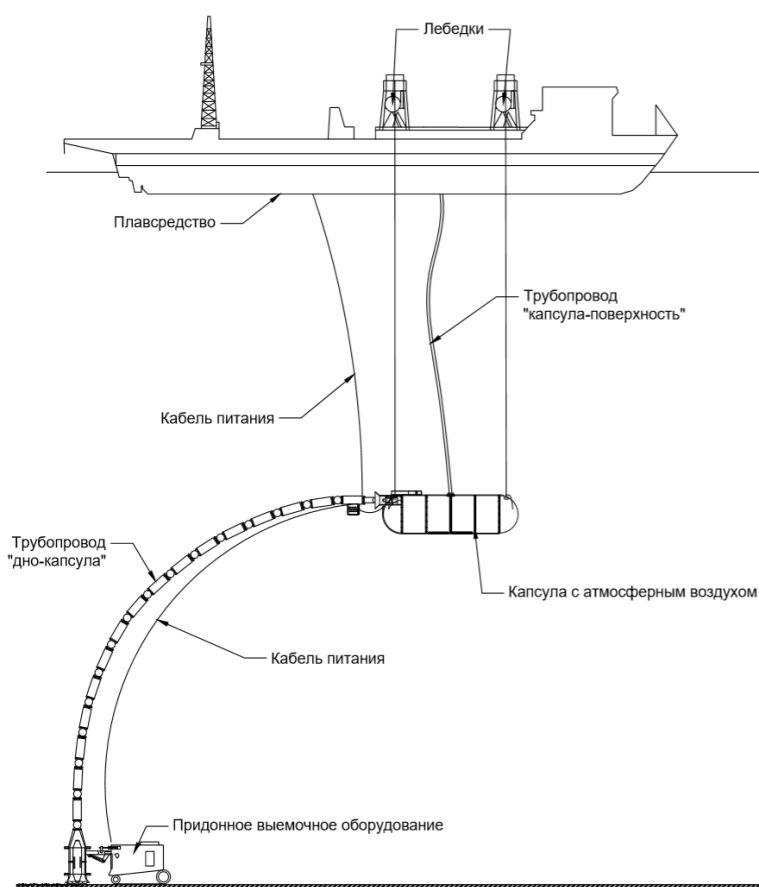


Рис. 3. Технология глубоководной разработки ТПИ с использованием погружаемой капсулы
 Fig. 3. Technology for deep-water mining of solid minerals using a submersible capsule

чтобы гидросмесь поднималась на поверхность только за счет этой разницы. Таким образом, значительно уменьшается энергопотребление процесса транспортирования, а большая часть тратится на второй этап подъема [6]. Поэтому необходимо подбирать диаметр трубопровода и глубину погружения капсулы, соответствующую заданным горно-геологическим условиям, а также обеспечить возможность контроля и регулирования скорости потока и концентрации.

Погружаемая капсула с атмосферным воздухом

Капсула представляет собой полый сосуд эллипсоидной формы, подвешенный на специальной судовой лебедке за проушины на корпусе. Во время подъема необходимо одну сторону капсулы поднимать раньше другой для достижения наиболее оптимальной формы и уменьшения показателя гидродинамического сопротивления и как следствие, уменьшения времени подъема и энергозатрат.

Внутри капсулы расположены ребра жесткости, позволяющие конструкции выдерживать нагрузки на больших глубинах. Глубина погружения определяется из условия, при котором создается устойчивый гидроподъем твердого полезного ископаемого [4]. По предварительным расчетам для подъема конкреций необходима глубина порядка 1600-1700 метров, при глубине разработки в 5 км [4].

К капсуле подключены два трубопровода. Один вместе с силовым кабелем спускается с судна и обеспечивает сообщение полости с атмосферой и поддерживает постоянное нормальное давление в 1,01325 бар. Для регулирования разности давлений и, соответственно, производительности гидросмеси, перекачиваемой по трубопроводу, на плавсредстве установлена задвижка для контроля движения воздуха в магистрали. В случае полного перекрытия задвижки движение по трубопроводу прекращается, так как давление в капсуле и на дне акватории уравниваются. Другой трубопровод подключается посредством быстроразъемного соединения (БРС) и соединяет капсулу с выемочным оборудованием. Для подключения БРС используется трос-кабель, соединяющий муфту и шток соединения и подтягивающий капсулу к месту стыка. Для отсоединения БРС предусмотрен гидроаккумулятор,

расположенный на муфте. Зарядка гидроаккумулятора происходит за счет погружения капсулы на глубину, превышающую расчетное значение.

Для разгрузки капсулы предусмотрено два люка, расположенных в днище капсулы. Предполагается, что через них также будет осуществляться монтаж внутренних ребер жесткости. Разгрузка происходит либо на борту судна, либо на заглубленной платформе под кораблем.

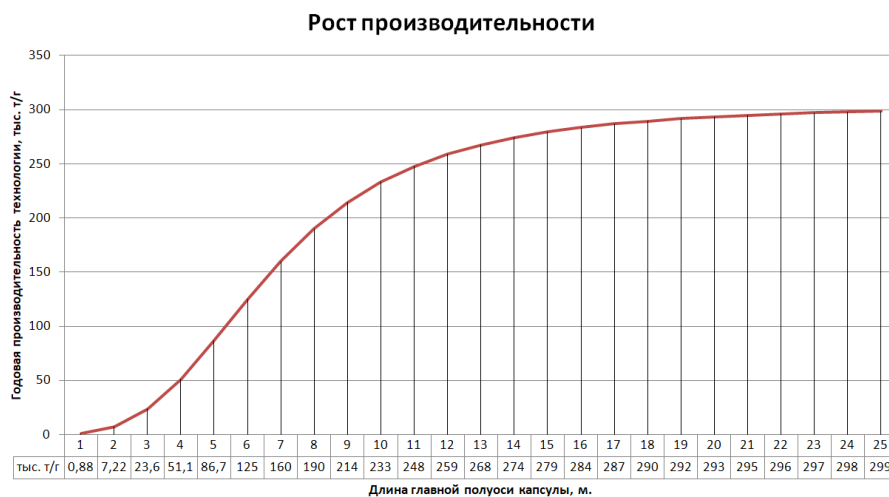


Рис. 4. Рост производительности в зависимости от величины главной полуоси эллипсоидной капсулы

Fig. 4. Performance growth depending on the size of the ellipsoidal capsule's principal semi-axis

Таблица 1. Показатели технологии в зависимости от геометрии капсулы
Table 1. Technology performance depending on capsule geometry

Параметр	Длина главной полуоси капсулы, м.					
	6	7	8	9	10	11
Принятая толщина стенки капсулы, м	0,254	0,294	0,334	0,372	0,410	0,448
Рабочий объем капсулы, м ³	62,22	98,06	145,56	205,31	279,49	369,66
Время цикла, ч.	0,86	1,07	1,347	1,703	2,151	2,698
Годовая производительность, тыс. т/год	124,7	160,1	190,2	214,3	233,2	247,8

Также внутри располагаются различные датчики (расходомер, манометр, датчик уровня и др.), помогающие диспетчерам отслеживать ситуацию. Внешние датчики давления помогает определить положение капсулы в пространстве.

Технология работает по следующему принципу (Рис. 3). Капсула, подвешенная на лебедках, опускается на 100 метров ниже расчетной глубины, происходит зарядка гидроаккумулятора, после чего капсула поднимается на необходимую глубину, где в подвешенном состоянии находится шток БРС. С помощью лебедки шток и муфта соединяются, и выемочное оборудование начинает обрабатывать поверхность [5, 19]. За счет поддерживаемой атмосферы внутри капсулы, возникающая разница давлений образует движущую силу и поднимает гидросмесь в полость капсулы. Датчики, расположенные внутри капсулы, отслеживают ее заполнение. По заполнению капсулы соединение с атмосферой перекрывается, гидросмесь больше не поступает в капсулу, гидроаккумулятор отсоединяет БРС и капсула поднимается на поверхность. На поверхности (либо заглубленной платформе) происходит разгрузка, после чего цикл повторяется.

Производительность технологии

Так как в работе рассматривается исключительно транспортная часть, предположим, что процесс добычи и транспортирования полностью удовлетворяет критериям работы капсулы. В этой связи производительность будет максимальной и ограничена лишь возможностями погружного сосуда, которые можно расширить. Однако существуют естественные ограничения, связанные с водной средой, а именно сила сопротивления воды к погружаемому телу (R).

Для значений числа Рейнольдса меньше либо равным 1 формула определения выглядит следующим образом.

$$R = 3\pi\mu v d_3 \quad (1)$$

где, μ – динамический коэффициент вязкости среды; v – критическая скорость (гидравлическая крупность) погружаемого тела; d_3 – характерный линейный размер (эквивалентный диаметр).

Стоит отметить, что при погружении тела в воду число Рейнольдса будет больше 1, из чего следует, что для турбулентного потока ($Re > 800$) [25].

$$R = C\rho S \frac{v_\infty^2}{2} \quad (2)$$

где, C – коэффициент гидродинамического сопротивления; S – миделево сечение погружаемого тела; ρ – плотность среды; v_∞ – скорость невозмущенного потока (скорость на бесконечно большом расстоянии от тела).

Помимо силы сопротивления R на тело, погружаемое в воду, действуют также силы тяготения (G_t), Архимедова сила (G_A), сила сопротивления (R), инерционная сила тела ($m \frac{dv}{dt}$).

Со временем ускорение тела становится равным нулю, и движение приобретает равномерный характер. Таким образом:

$$v_\infty = v_k$$

$$v_k = \sqrt{\frac{2gV \cdot (\rho_r - \rho)}{\rho c S}} \quad (3)$$

К сожалению, в настоящее время невозможно численно определить значение коэффициента (C), так как он включает в себя абсолютно все возможные воздействия и сопротивления, возникающие во время погружения. Поэтому возникает необходимость в создании и испытании прототипа для его определения с использованием различных форм и геометрий. Однако предположить значение, основываясь на других испытаниях, можно.

Примем следующие условия: производительность выемочного оборудования постоянна и составляет 320 т/ч; массовая концентрация гидросмеси постоянна и составляет 30%; значение коэффициента гидродинамического сопротивления составляет 0,36 [25] (исходя из эллипсоидной формы капсулы); соотношение осей капсулы постоянно и равно 0,6:0,7:1 где a:b:c соответственно. a – малая полуось, b – средняя полуось капсулы. Тогда формула расчета циклической производительности транспортной системы примет вид:

$$A = \frac{4c \cdot 2gV \cdot (\rho_r - \rho) \cdot X \cdot \rho_{\text{пи}}}{\rho \cdot C \cdot v_k^2 \cdot T} \quad (4)$$

где, c – главная полуось эллипсоида капсулы, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; V – объем капсулы, м³; ρ_r – плотность капсулы, кг/м³; ρ – плотность воды, кг/м³; X – концентрация полезного компонента в пульпе, %; $\rho_{\text{пи}}$ – плотность полезного ископаемого, кг/м³; T – время цикла (опускание, загрузка, подъем, разгрузка, вспомогательные операции), с.

Произведя многочисленные итерации с разными значениями переменных, можно сделать вывод, что производительность такой капсулы составляет в среднем 214 тыс. тонн в год (Табл. 1). Таким образом достигается экономически целесообразная производительность добычного комплекса, что позволяет говорить о погружаемой капсуле как о перспективном и экономичном способе подъема полезного ископаемого с морского дна.

Заключение

В работе представлены результаты научных изысканий в области глубоководной добычи твердых полезных ископаемых, а именно транспортной части подводного добычного комплекса. Предложенная технология позволяет избежать недостатков поточного и циклического способа отработки глубоководного месторождения, а также снизить энергопотребление за счет использования гидростатического напора водной толщи.

Описана погружаемая капсула с атмосферным воздухом, ее устройство и особенности. Описан функционал сосуда, а также элементы конструкции. Предложена и описана технология для разработки глубоководных месторождений ТПИ с использованием капсулы.

Предложена математическая модель нахождения производительности данной технологии. Введенные ограничения не окажут сильного влияния на действительные результаты. По итогу вычислений наблюдается замедление темпа роста производительности при увеличении длины главной полу-

оси капсулы. В этой связи был произведен поиск наибольшего значения, при адекватных размерах капсулы (Рис. 4). По итогу вычислений стало заметно стремление графика к значению в 300 тыс. т/год, поэтому данное значение является максимально возможным для данной технологии. В будущем планируется апробировать полученную формулу и найти наибольшее возможное значение, изменяя геометрию капсулы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогов В. С., Фролов В. В., Никольская Н. С., Титов А. Л. Опыт добычи и промышленного использования железомарганцевых конкреций // Горный журнал. 2012. № 3. С. 50–55.
2. Wang R., Guan Y., Jin X., Tang Z., Zhu Z., Su X. Impact of Particle Sizes on Flow Characteristics of Slurry Pump for Deep-Sea Mining // Shock and Vibration. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6684944>
3. Александров В. И., Авксентьев С. Ю., Горелкин И. М. Минимизация энергозатрат при гидравлическом транспортировании пульпы // Обогащение руд. 2012. № 3. С. 39–42.
4. Александров В. И., Егоров И. В. Расчет глубины погружения буферной емкости в системах гидроподъема горной массы с морского дна. Горное оборудование и электромеханика № 4. 2015. С. 37–40.
5. Юнгмейстер Д. А., Смирнов Д. В., Вержанский А. П., Исаев А. И. Машины и оборудование для добычи железомарганцевых конкреций СПб: «Политехника-сервис», 2015. 135 с.
6. Александров В. И. Энергоемкость системы с грунтозаборным устройством для добычи железомарганцевых конкреций с морского дна // Sciences of Europe. 2017. № 11-1(11).
7. 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 (научно-технический журнал). 2021. № 3(1). С. 147–154.
8. Мельников М. Е., Плетнев С. П. Возраст и условия формирования кобальтоносных марганцевых корок на гайтах Магеллановых гор // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 1. С. 3–16.
9. Судариков С. М., Юнгмейстер Д. А., Королев Р. И., Петров В. А. О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации. Записки Горного института. 2022. № 253. С. 82–96. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.14>
10. Halbach P. E., Jahn E. A., Cherkashov G. Marine Co-rich ferromanganese crust deposits: description and formation, occurrences and distribution, estimated World-wide resources // Springer International Publishing. 2017. P. 65–138.
11. Рева Ю. В. Технические средства добычи минеральных ресурсов и полезных ископаемых из глубин Мирового океана // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского универси-

тета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 1. С. 16–19.

12. Дробаденко В. П., Малухин Г. Н., Луконина О. А., Салахов И. Н. Современное состояние проблем освоения твердых минеральных ресурсов дна морей и океанов. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 3(1). С. 99–109.

13. Егоров И. В., Жабин А. Б., Поляков А. В. Определение рациональных параметров гидротранспорта твердых полезных ископаемых в системе гидроподъема с подводной станции. Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 9.

14. Черкашев Г. А., Голева Р. В. Международная конференция "Minerals Of The Ocean-7 & Deep-Sea Minerals And Mining-4" / /Разведка и охрана недр. 2014. № 8. С. 72–72.

15. Van Dover C. L., Arnaud-Haond S., Gianni M., Helmreich S., Huber J. A., Jaeckel A. L., Metaxas A., Pendleton L. H., Petersen S., Ramirez-Llodra E., Tunnicliffe V., Yamamoto H. Scientific rationale and international obligations for protection of active hydrothermal vent ecosystems from deep-sea mining. Marine Policy. 2018. № 90. Pp. 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.01.020>

16. Кириченко Ю. В., Кюи Н. Ч. Т. Перспективы разработки подводных россыпей Вьетнама // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 140-144.

17. Lisa A. Levin, Diva J. Amon, Hannah Lily (2020). Challenges to the sustainability of deep-seabed mining. Nature Sustainability. 2020. № 3 (10). Pp. 784–794. DOI: 10.1038/s41893-020-0558-x

18. Niner H. J., Ardron J. A., Escobar E. G., Gianni M., Jaeckel A., Jones D. O. B., Levin L. A., Smith C. R., Thiele T., Turner P. J., Watling L., Gjerde K. M. Deep-sea mining with no net loss of biodiversi-

ty-an impossible aim. Frontiers in Marine Science, 5(MAR). 2018.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00053>

19. Yungmeister D., Kireev K. Development of the construction and characterization of deep complex for collecting imc. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. № 7(2). Pp. 2086–2091.

20. Ishiguro S., Masuda M., Komatsu M. et al. Development of the Pilot System for Test of Excavating and Ore lifting of Seafloor Polymetallic Sulfides // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2018. № 55(3). Pp. 1–7.

21. Lipton I., Gleeson E., Munro P. Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismark Sea // Technical report compiled under NI 43-101. Toronto, Canada: PNG –Nautilus Minerals Niugini. 2018. 242 p.

22. Патент RU 2 779 867 C1. Промежуточная капсула для подъема твердых полезных ископаемых со дна мирового океана / Сержан С. Л., Лавренко С. А., Малеванный Д. В., Дадаян Л. М.

23. Masanobu S., Takano S., Kanada S., Ono, M. Pressure loss due to hydraulic transport of large solid particles in vertical pipes under pulsating flow conditions. // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2021. №143(6). doi.org/10.1115/1.4036385

24. Atmanand M. A., Ramadass G. A. Concepts of deep-sea mining technologies // Deep-Sea Mining. Resource potential, technical and environmental considerations. 2017. P. 295–341. DOI:10.1007/978-3-319-52557-0_10

25. Гейер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод : учебник для вузов. 3-е изд., доп. и перераб. Москва : Недра, 1991. 331 с.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Сержан Сергей Леонидович, доцент кафедры Транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский Горный Университет (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), кандидат технических наук, доцент, serzhan_sl@pers.spmi.ru

Малеванный Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры Транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский Горный Университет (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), s215051@stud.spmi.ru

Заявленный вклад авторов:

Сержан С.Л. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Малеванный Д.В. – научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; написание текста сбор и анализ данных; выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Sergei L. Serzhan*, Dmitriy V. Malevannyi

St. Petersburg Mining University

*E-mail: serzhan_sl@pers.spmi.ru

TECHNOLOGY OF DEEP-WATER MINING OF SOLID MINERALS USING AN INTERMEDIATE CAPSULE



Article info

Received:

16 March 2023

Accepted for publication:

18 April 2023

Accepted:

27 April 2023

Published:

17 May 2023

Keywords: underwater mining of solid minerals, ferromanganese nodules, underwater mining complex, intermediate capsule, hydraulic lifting of nodules

Abstract.

The paper presents the technology for the development of deep-sea deposits of solid minerals. In particular, the transport part of the mining process is considered. The analysis of mining and geological resources of deep-water deposits of iron ore and crusts is made, the average indicators of the conditions among the deposits belonging to the Russian Federation are highlighted. The existing underwater mining complexes, their principle of operation are considered, the disadvantages of using the flow method of mineral lifting are indicated. The necessity of dividing the transportation process into two stages, thereby carrying out lifting by the cyclic-flow method is indicated. The construction of the capsule with atmospheric air is described and its main elements and functions are considered. The technology using the capsule is described and the estimated production cycle is given. The formula for calculating the annual productivity of the transport stage of the technology is derived, taking into account the assumptions in the productivity of the soil intake device. The calculation of productivity was made on the basis of data on mining and geological conditions of iron ore deposit location in the Russian Exploration Region of the Atlantic Ocean. The obtained data was entered into the table. The productivity growth graph was plotted when the length of the semi-major axis of the ellipsoidal capsule changed from 1 meter to 25 meters. The value of the maximum possible productivity with the given ratio of axes was deduced.

For citation: Serzhan S.L., Malevannyi D.V. Technology of deep-water mining of solid minerals using an intermediate capsule. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 2(166):49-56 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-49-56, EDN: HWKPM5

REFERENCES

1. Rogov V.S., Frolov V.V., Nikol'skaya N.S., Titov A.L. Opyt dobychi i promyshlennogo ispol'zovaniya zhelezomargancevykh konkrecij. *Gornyj zhurnal*. 2012; 3:50-55.
2. Wang R., Guan Y., Jin X., Tang Z., Zhu Z., Su X. Impact of Particle Sizes on Flow Characteristics of Slurry Pump for Deep-Sea Mining. *Shock and Vibration*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6684944>
3. Aleksandrov V.I., Avksent'ev S.Yu., Gorrelkin I.M. Minimizaciya energozatrat pri gidravlicheskom transportirovanii pul'py. *Obogashchenie rud*. 2012; 3:39-42.
4. Aleksandrov V.I., Egorov I.V. Raschet glubiny pogruzheniya bufernoj emkosti v sistemah gidropod"ema gornoj massy s morskogo dna. *Gor-noe oborudovanie i elektromekhanika*. 2015; 4:37-40.
5. Yungmejster D.A., Smirnov D.V., Verzhanskij A.P., Isaev A.I. Mashiny i oborudovanie dlya dobychi zhelezomargancevykh konkrecij //«Politehnika-servis», SPb, 2015. 135 s.
6. Aleksandrov V.I. Energoemkost' sistemy s gruntozabornym ustrojstvom dlya dobychi zhelezomargancevykh konkrecij s morskogo dna. *Sciences of Europe*. 2017; 11-1(11).
7. Vil'mis A.L., Buyanov M.I., Kalinin I.S., Tivonenko V.A. Tverdye poleznye iskopaemye dna mirovogo okeana-potencial'nye ob"ekty dlya razvitiya geotekhnologicheskikh metodov. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2021; (3-1):147-154.
8. Mel'nikov M.E., Pletnev S.P. Vozrast i usloviya formirovaniya kobalt'nosnykh margancevykh korok na gajotah Magellanovykh gor. *Litologiya i poleznye iskopaemye*. 2013; 1:3-16.
9. Sudarikov S.M., Yungmejster D.A., Korolev R.I., Petrov V.A. O vozmozhnosti umen'sheniya tekhnogennoj nagruzki na pridonnye biocenozy pri dobyche tverdykh poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem tekhnicheskikh sredstv razlichnoj modifikacii. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022; 253:82-96. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.14>

10. Halbach P.E., Jahn E.A., Cherkashov G. Marine Co-rich ferromanganese crust deposits: description and formation, occurrences and distribution, estimated World-wide resources. *Springer International Publishing*. 2017. P. 65–138.

11. Reva Yu. V. Tekhnicheskie sredstva dobychi mineral'nyh resursov i poleznyh iskopaemyh iz glubin Mirovogo okeana. *Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii»*. 2020; 1:16-19.

12. Drobadenko V.P., Maluhin, G.N., Lukonina, O.A., Salahov I. N. Sovremennoe sostoyanie problem osvoeniya tverdyh mineral'nyh resursov dna morej i okeanov. *Gornyj informaci-onno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2021; (3-1):99-109.

13. Egorov I.V., Zhabin A.B., Polyakov A.V. Opređenje racional'nyh parametrov gidrotransporta tverdyh poleznyh iskopaemyh v sisteme gidropod"ema s podvodnoj stancii. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2019. Vyp. 9.

14. Cherkashev G.A., Goleva R.V. Mezhdunarodnaya konferenciya "Minerals Of The Ocean-7 & Deep-Sea Minerals And Mining-4". *Razvedka i ohrana nedr*. 2014; 8:72-72.

15. Van Dover C.L., Arnaud-Haond S., Gianni M., Helmreich S., Huber J.A., Jaeckel A.L., Metaxas A., Pendleton L.H., Petersen S., Ramirez-Llodra E., Tunnicliffe V., Yamamoto H. Scientific rationale and international obligations for protection of active hydrothermal vent ecosystems from deep-sea mining. *Marine Policy*. 2018; 90:20-28. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.01.020>

16. Kirichenko Yu.V., Kyui N.Ch.T. Perspektivy razrabotki podvodnyh rossypej V'etnama. *Gornaya promyshlennost'*. 2021; 4:140-144.

17. Lisa A. Levin, Diva J. Amon, Hannah Lily Challenges to the sustainability of deep-seabed mining.

Nature Sustainability. 2020; 3(10):784-794. DOI: 10.1038/s41893-020-0558-x

18. Niner H.J., Ardron J.A., Escobar E.G., Gianni M., Jaeckel A., Jones D.O.B., Levin L.A., Smith C.R., Thiele T., Turner P.J., Watling L., Gjerde K.M. Deep-sea mining with no net loss of biodiversity-an impossible aim. *Frontiers in Marine Science*. 5(MAR). 2018. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00053>

19. Yungmeister D., Kireev, K. Development of the construction and characterization of deep complex for collecting imc. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016; 7(2):2086-2091.

20. Ishiguro S., Masuda M., Komatsu M. et al. Development of the Pilot System for Test of Excavating and Ore lifting of Seafloor Polymetallic Sulfides. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2018; 55(3):1-7.

21. Lipton I., Gleeson E., Munro P. Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismark Sea. *Technical report compiled under NI 43-101*. Toronto, Canada: PNG –Nautilus Minerals Niugini, 2018. 242 p.

22. Patent RU 2 779 867 C1. Promezhutochnaya kapsula dlya pod"ema tverdyh poleznyh iskopaemyh so dna mirovogo okeana / Serzhan S.L., Lavrenko S.A., Malevannyj D.V., Dadayan L.M.

23. Masanobu S., Takano S., Kanada S., Ono M. Pressure loss due to hydraulic transport of large solid particles in vertical pipes under pulsating flow conditions. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2021; 143(6). doi.org/10.1115/1.4036385

24. Atmanand M.A., Ramadass G.A. Concepts of deep-sea mining technologies. *Deep-Sea Mining. Resource potential, technical and environmental considerations*. 2017. P. 295-341. DOI:10.1007/978-3-319-52557-0_10

25. Gejer V.G., Dulin V.S., Zarya A.N. Gidravlika i gidroprivod : uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., dop. i pererab. Moskva: Nedra; 1991. 331 s.

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Sergei L. Serzhan, Associate Professor, Department of Transport Technological Processes and Machines, St. Petersburg Mining University (Vasilievsky Island 21, Line 2, building 2. 199106, Saint Petersburg, Russia), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, serzhan_sl@pers.spmi.ru

Dmitriy V. Malevannyi, Postgraduate student, Department of Transport Technological Processes and Machines, St. Petersburg Mining University (Vasilievsky Island 21, Line 2, building 2. 199106, Saint Petersburg, Russia), s215051@stud.spmi.ru

Contribution of the authors:

Sergei L. Serzhan – research problem statement; scientific management; conceptualisation of research; writing the text, data collection; drawing the conclusions.
Dmitriy V. Malevannyi – scientific management; reviewing the relevant literature; writing the text, data collection; data analysis; drawing the conclusions.

Author have read and approved the final manuscript.

