

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДОБЫЧНОГО КОМПЛЕКСА ЖМК С ПРИМЕНЕНИЕМ КАМЕР РАЗРЕЖЕНИЯ

Юнгмейстер Д.А., Сержан С.Л., Смоленский М.П.
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: геология, сложности освоения, добычной комплекс, железомарганцевые конкреции, камера разрежения, производительность по массе.

Аннотация. В статье представлены три основных вида глубоководных полезных ископаемых: кобальтомарганцевые корки (КМК), полиметаллические сульфиды (ГПС) и железомарганцевые конкреции (ЖМК). Рассмотрены геология и особенности залегания железомарганцевых конкреций (ЖМК). Описывается добычной комплекс ЖМК, над которым были проведены исследования учеными Горного университета: агрегат с Г-образными рычагами. Представлена и описана концепция разработки камер разрежения для глубоководного шагающего агрегата. Рассчитаны минимально требуемые показатели расхода для устройств захвата – присосок, по полученным характеристикам подобран перекачивающий агрегат (насос). Рассчитан коэффициент перетекания устройства вакуумного захвата и производительность по массе всего комплекса добычи ЖМК.

CALCULATION OF PRODUCTIVITY OF FERROMANGANESE NODULE MINING COMPLEX WITH THE USE OF RAREFACTION CHAMBERS

Yungmeister D.A., Serzhan S.L., Smolensky M.P.
Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: geology, complexity of development, mining complex, ferromanganese nodules, rarefaction chamber, productivity by mass.

Abstract. The paper presents three main types of deep-sea minerals: cobalt-manganese crusts (CMCs), polymetallic sulfides (PMSs) and iron-manganese nodules (IMCs). The geology and peculiarities of occurrence of ferromanganese nodules (FMC) are considered. A mining complex for iron-manganese nodules, which was researched by scientists of the Mining University, is described: a unit with L-shaped arms. The concept of developing rarefaction chambers for a deep-water walking aggregate is presented and described. Minimum required flow rates for gripper-sucker devices have been calculated, the pumping unit (pump) has been selected according to the obtained characteristics. The vacuum gripper's overflow coefficient and mass capacity of the whole complex of iron-ore complex extraction were calculated.

Геология глубоководных ресурсов и сложности их освоения

Сегодняшние морские глубоководные ресурсы делятся на три типа: ЖМК, КМК и полиметаллические сульфиды. Каждый из ресурсов имеет свою глубину залегания и химический состав. Железомарганцевые конкреции по своей сути имеют биологическое происхождение: образование и нарастание редкоземельных элементов происходит вокруг морских фрагментов, вроде раковин, зубов акулы. Залегают на так называемых абиссальных равнинах [1], широких площадях морского дна на глубинах более 3500 метров с уклонами и континентальными подножьями, покрытыми пелагическими осадками и турбидитами. Морское тело оседает на глубину приблизительно от 4000 до 6000 метров. В течение большого количества времени осадки, ценные по своим свойствам, меди, кобальта, цинка, марганца и других металлов облепляют этот зуб или раковину, образуя сферическую форму. Размеры тел могут достигать 0,5 метров в диаметре, на 1 квадратный метр дна может приходиться свыше 35 килограмм ценного ресурса [2].

Железомарганцевые конкреции наблюдаются в трех океанах: Тихий, Индийский и Атлантический. В каждой из океанических сред индивидуальный объем, занимаемая площадь минеральных отложений, скорость седиментации и образования новых конкреций. Следующим по убыванию количества глубоководных редкоземельных материалов является Индийский океан. Сразу стоит отметить, что наибольшая концентрация их приходится на южные от экваториальной зоны воды. В самой зоне конкреции почти отсутствуют. Бассейн Крозе,

Центральный бассейн Индийского океана, бассейн Уортон – основные места залегания конкреций. Гораздо меньшие площади встречаются в Аравийском море и Бенгальском заливе.

В Атлантическом океане наиболее высокая скорость седиментации по сравнению с вышестоящими океанами, по причине этого количество конкреций более ограничено. К тому же большая часть морского дна находится на глубине, препятствующей компенсации карбоната кальция: процессу образования конкреций. В некоторых бассейнах седиментация в подавленном состоянии – глубоководные бассейны по обе стороны от Срединно-Атлантического хребта, ниже зоны компенсации карбоната кальция. В районе пролива Дрейка – моря Скотия Циркум-Антарктическое течение создает придонное движение воды, не позволяя осадку опуститься на дно, благодаря этому там распространены конкреции и инкрустации [3].

В декабре 2021 года прошла двадцать шестая сессия Международного органа по морскому дну. Были продлены на пять лет заявки семи международных компаний, разрабатывающих комплексы глубоководной добычи железомарганцевых конкреций. На 274-м заседании Совет утвердил выделение четырех новых участков зоны Кларион-Клиппертон, содержащих экологические особенности, где требуется повышенное внимание. Важным моментом этой сессии является задача на 2022 год по созданию проекта правил разработки минеральных ресурсов в Районе [4]. Из этого всего можно сделать вывод, что в этих правилах основным аспектом разработки месторождений ЖМК будет именно экологический фактор. Необходимость разработки наиболее безопасной для экологии дна техники должна лежать в основе любых будущих научно-исследовательских работ и полезных моделей по этой тематике.

Описание добычных комплексов СПГУ

Распространен способ захвата и удержания железомарганцевых конкреций при помощи глубоководных устройств с полостями разрежения [5]. На кафедре машиностроения СПГУ было предложено механическое устройство глубоководной добычи, представленное на рисунке 1 [6]. При данной конфигурации исключается замутненность на дне и повышается производительность установки. Агрегат представляет собой придонное добычное устройство с бункером в виде усеченного конуса. Центральная цапфа, соединенная с бункером, имеет два подвижных Г-образных рычага. Каждая из «лап» оснащена устройством вакуумного захвата с конусообразными отверстиями, разрежение возникает за счет откачки воды насосами в момент соприкосновения «лапы» и донных тел. Обратные клапана остаются в закрытом состоянии при пустом конусном отверстии. Г-образные рычаги двигаются благодаря шестеренчатой передаче между их концами и центральной цапфой. Более гибкое манипулирование происходит за счет шарниров и поршневых гидроцилиндров, установленных на каждом рычаге. Весь этап происходит следующим образом: конусообразный агрегат опускается при помощи кабель троса на дно, бункер закрепляется при помощи острия стойки, подается давление на гидроцилиндры и Г-образные рычаги поворачиваются к центру шарниров, вакуумные захваты достигают поверхности дна. Включаются насосы, откачивающие воду, схватываются конкреции, и гидроцилиндрами «лапы» разворачиваются для разгрузки. Оказавшись над приемным бункером, давление сбрасывается, и опять под действием силы тяжести ценный ресурс попадает прямо в хранилище. При необходимости цапфа может поворачиваться вокруг бункера для сбора в доступном радиусе. При заполнении бункера или после выработки участка агрегат поднимается на поверхностное судно. Разгрузившись, агрегат вновь опускается на новый участок, и цикл повторяется.

Вышеописанное устройство позволяет избежать вредной для фауны замутненности в процессе добычи, повреждений морского дна и повысить производительность за счет уменьшения количества спускоподъемных операций.

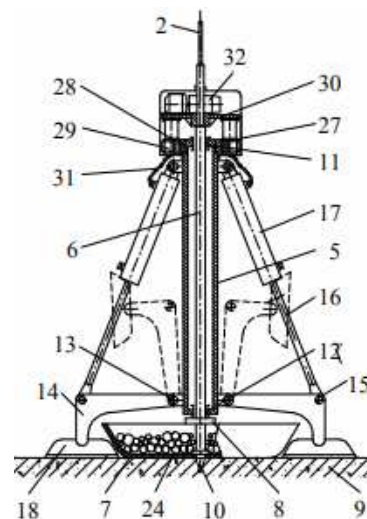


Рис. 1. Конусообразный придонный агрегат

Физические натурные исследования моделей сборщиков

Тестирование устройств вакуумного захвата несколько раз было проведено в Лаборатории СПГУ [7]. Была поставлена задача – определить вероятность захвата железомарганцевых конкреций в зависимости от времени контакта захватывающего устройства и придонных тел. На специальном стенде был проведен эксперимент и построена зависимость.

Исследования показывают, что при увеличении времени контакта резко возрастает вероятность захвата конкреций до определенного значения. Но при слишком длительном времени контакта приводит к снижению скорости сбора, что отразится на производительности установки.

Работа исполнительных органов для захвата ЖМК основана на использовании устройств с камерами разрежения. Схема такого устройства представлена на рисунке 2.

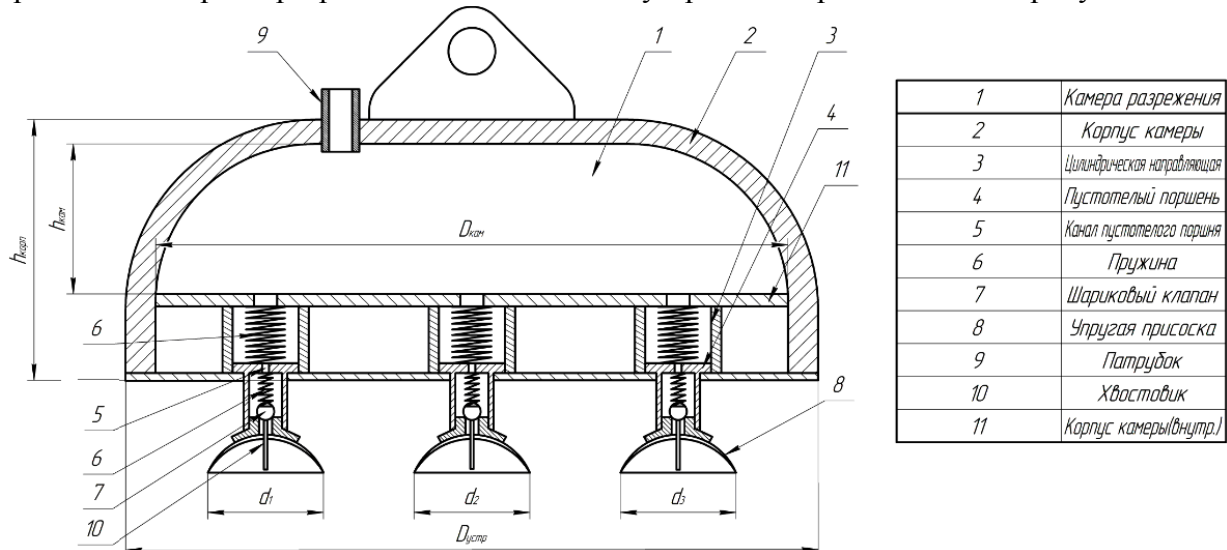


Рис. 2. Схема устройства с камерой разрежения

Устройство работает следующим образом: как видно из чертежа на рисунке 3 в присосках (поз. 8) присутствует хвостовик (поз. 10). Хвостовик на шариковом клапане выполняет роль толкателя: при контакте с ЖМК за счет открытия клапан, давление в камере разрежения захватывает конкрецию. Присоска выполняет селективную функцию за счет подобранного диаметра, при соответствии которому минерал, оказавшись в полости присоски, толкает шариковый клапан (поз. 7) вверх. Для более тщательного подбора конкреций, лежащих неровным слоем, предусмотрены пустотелые поршни (поз. 4), свободно продвигающиеся при наложении по цилиндрической направляющей (поз. 3) внутрь устройства [8].

Расчет производительности сборщика в зависимости от его параметров

Производительность устройства с камерами разрежения можно рассчитать исходя из требуемой силы захвата конкреции F_s . Теоретическая сила захвата при вертикальном перемещении объекта рассчитывается по формуле

$$F_{\text{тин}} = m \cdot (g + a) \cdot S, \quad (1)$$

где m – масса конкреции, g – ускорение свободного падения, a – ускорение системы, S – коэффициент запаса.

Рассчитаем требуемую силу захвата конкреции для устройства с камерами разрежения с присосками, диаметром 0,1 м:

$$m_k = \rho_k \cdot V_k = \rho_k \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi R^3 = \rho_k \cdot \frac{\pi d^3}{6}, \quad (2)$$

$$F_{\text{тин}} = \frac{\rho_k \cdot \pi d^3 \cdot g \cdot S}{6} = \frac{2000 \cdot 3,14 \cdot 0,1^3 \cdot 9,81 \cdot 1,5}{6} = 15,39 (H),$$

где ρ_k – плотность конкреции (кг/м^3), V_k – объем конкреции (м^3), d – диаметр камеры разрежения (м).

Сила прижатия конкреции в глубоководной среде для одной присоски с учетом создаваемого разрежения будет равна:

$$F_{np} = \Delta p \cdot S = \Delta p \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 300000 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 2355 (H), \quad (3)$$

Согласно справочнику [9] для присосок диаметром до 20 мм, предпочтительнее подбирать требуемый расход не менее 0,17 м³/ч или 2,83 л/мин. Расчет производительности устройства с камерами разрежения будет осуществляться по формуле

$$Q_{\min} = Q_H \cdot n, \quad (4)$$

где Q_H – требуемый расход всасывания для одного отверстия, n – количество присосок.

$$Q_{\min} = 2,83 \cdot 45 = 127,35 \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}} \right) = 2,12 \left(\frac{\text{л}}{\text{с}} \right)$$

Использование насоса Calpeda NM 25/160B/A позволяет покрыть существующую потребность в расходе и создать разрежение в камере, необходимое для захвата конкреций [10].

Согласно исследованиям [7], одним из важнейших показателей работы устройства захвата является коэффициент перетекания $K_{пер}$. Он показывает отношение расхода в дросселе к производительности насоса. В качестве дросселя выступает суммарная площадь свободного пространства в зоне контакта приемного отверстия камеры разрежения и конкрецией. Зависит от производительности насоса, эластичности присоски и формы самой конкреции.

$$K_{пер} = \frac{Q_{св.пр.}}{Q_H}, \quad (5)$$

где $Q_{св.пр.}$ – расход жидкости через свободное пространство, Q_H – производительность насоса.

$$Q_{св.пр.} = \beta \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P} = 0,8 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2}{1000} \cdot 0,3} = 0,0198 \cdot S, \quad (6)$$

где β – коэффициент расхода, S – площадь отверстия, через которое проходит вода, ρ – плотность воды. Коэффициент расхода насоса принимается за 0,8. Площадь отверстий может варьироваться, зависимость коэффициента перетекания представлена на рисунке 6.

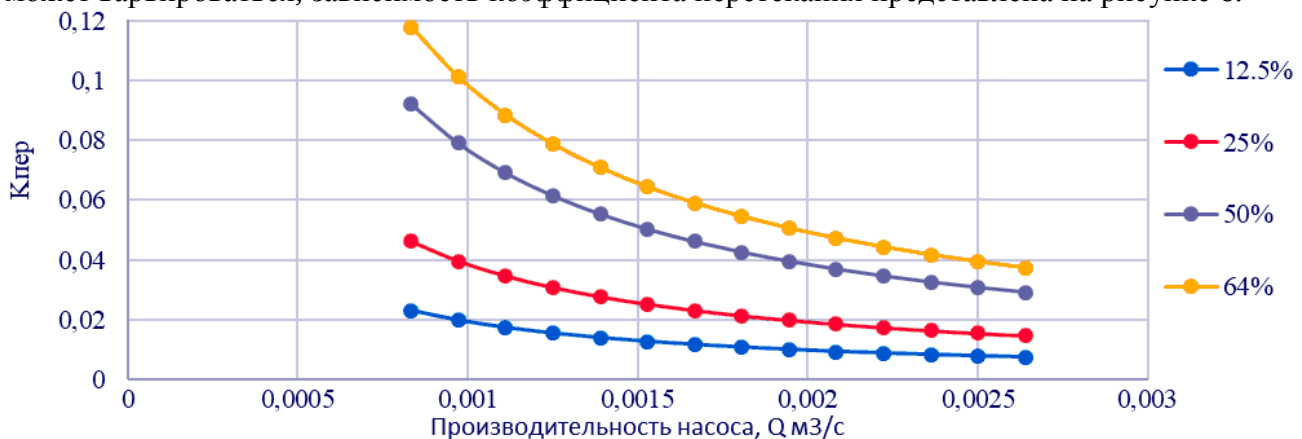


Рис. 6. Зависимость коэффициента перетекания от производительности насоса при разной площади зазора

Расчет производительности одного устройства с камерами разрежения должен опираться на диаметр присосок и их количество. Пластина диаметром 920 мм – 1000 мм может уместить приблизительно 45 присосок, диаметром 10 мм. Таким образом, за одно прижатие устройства ко дну будет обрабатываться примерно 0,85 м². Для шести камер разрежения рассчитаем объем захвата камерой участка с конкрециями.

$$V_{зах.к} = \frac{n_{\text{вз}} \cdot \pi \cdot d_{\text{вз}}^2}{4} \cdot \left(\frac{q}{\rho} \right) \cdot k_{зах} = \frac{6 \cdot 3,14 \cdot 0,92^2}{4} \cdot \left(\frac{30}{2000} \right) \cdot 1 = 0,08 (м^3), \quad (7)$$

где q – масса конкреций на 1 м², ρ – плотность конкреций, $k_{зах}$ – коэффициент захвата.

В условиях заданного диаметра камеры разрежения 920 мм, оптимальное количество положений камер разрежения на дне равняется 15 точкам. Исходя из этого, объем добываемых ЖМК с одной точки базирования механического сборщика равен 3,6 м³.

$$V_{пол} = N_{пол} \cdot V_{захв.к} = 15 \cdot 0,08 = 1,2 (\text{м}^3), \quad (8)$$

Расчет количества позиций для заполнения емкости резервуара сборщика объемом 10 м³ выполняется через соотношение

$$N_{точ} = \frac{E}{V_{пол}} = \frac{10}{1,2} \approx 9, \quad (9)$$

Таким образом, для заданного резервуара при объеме собираемого количества ЖМК, рассчитанного для устройства заданного диаметра, потребуется девять загрузок конкреций в приемный резервуар. Временной цикл полного перехода из положения захвата в положение разгрузки составляет примерно 2 минуты.

$$T_{цикл.захв.} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \approx 2 (\text{мин}),$$

где t_1 – время прижатия устройства к ЖМК и включение насоса; t_2 – время захвата конкреций; t_3 – время подъема конкреций; t_4 – время выгрузки. Перемещение сборщика ЖМК на новый участок занимает приблизительно 5 минут. Полный цикл добычи рассчитывается по формуле

$$T_{цикл.полн.} = N_{точ} \cdot (t_{пер} + N_{пол} \cdot T_{цикл.захв.}) = 9 \cdot (7 + 15 \cdot 2) = 333 (\text{мин}). \quad (10)$$

Примем время опускания и подъема – 30 минут, время разгрузки на судно – 10 минут и время заполнения одного сборщика – 333 минуты и рассчитаем производительность одного сборщика.

$$T_{общ.сборщ} = T_{спуск} + T_{цикл.полн.} + T_{подъем} + T_{разгр.} = 30 + 333 + 30 + 10 = 403 (\text{мин}), \quad (11)$$

$$Q_{расч.сборщ} = \frac{\rho \cdot E}{T_{общ.сборщ}} = \frac{2000 \cdot 10}{7} = 2,85 (\text{т} / \text{час}). \quad (12)$$

Комплекс может состоять из 5 сборщиков и донного резервуара объемом 100 м³, в который будут складываться накопленные конкреции. При таких параметрах общее время заполнения контейнера будет рассчитываться:

$$T_{общ.конт} = T_{спуск} + 2 \cdot T_{цикл.полн.} + T_{подъем} + T_{разгр.} = 30 + 2 \cdot 333 + 30 + 10 = 736 (\text{мин}),$$

$$Q_{расч.конт.} = \frac{\rho \cdot E}{T_{общ.конт.}} = \frac{2000 \cdot 100}{12} = 16,7 (\text{т} / \text{час}).$$

Таким образом, расчетная производительность установки с пятью сборщиками и резервуаром объемом 100 м³, при заданных параметрах, способна добывать 16,7 тонн конкреций в час.

Заключение

Расчет производительности добычного комплекса железомарганцевых конкреций с применением камер разрежения в качестве способа захвата показал, что использование пяти сборщиков на дне, оснащенных шестью рычагами с камерами, и нескольких резервуаров для складирования, позволяет достичь производительности 16,7 т/час. Опираясь на целевую производительность в 300-500 т/час, напрашивается вывод о необходимости использования большого количества сборщиков или пропорционального увеличения их габаритов, а соответственно объема резервуара и камер разрежения, позволяя собирать с большей производительностью. Однако, другим способом повышения производительности также может служить сокращения времязатрат на совершение операций перемещения, подъема и спуска, которые зависят как от скорости, так и от глубины залегания конкреций.

Расчет коэффициента перетекания показывает минимальное значение вероятности отказа системы захвата при четырех положениях конкреции относительно присоски, что свидетельствует о стабильной работе устройства. В частности, при суммарной площади свободного пространства между присоской и захваченной конкрецией, равному 12,5% от общей площади соприкосновения, коэффициент захвата равен 0,02. Таким образом,

подобранный диаметр присоски, равный 0,1м является оптимальным с точки зрения надежности захвата и подбора конкреций близкого по значению диаметра.

Список литературы

1. Margolis S.V, Burns R.G. Pacific Deep-Sea Manganese Nodules: Their Distribution, Composition, and Origin // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1976, vol. 4, no. 1, pp. 229-263. DOI: 10.1146/annurev.ea.04.050176.001305.
2. Levin L.A., Mengerink K., Gjerde K.M., Rowden A.A., Lee Van Dover C., Clark M.R., Ramirez-Llodra E., Currie B., Smith C.R., Sato K.N., Gallo N., Sweetman A.K., Lily H., Armstrong C.W., Bridger J. Defining “serious harm” to the marine environment in the context of deep-seabed mining // Mar. Policy. Elsevier. 2016, vol. 74, no. October, pp. 245-259. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.09.032.
3. Cronan D.S. Manganese Nodules // Encyclopedia of Ocean Sciences. 3rd ed. Elsevier, 2019, no. June, pp. 607-614. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11383-1.
4. Российская Федерация. Международный орган по морскому дну. Двадцать шестая сессия: Протокол заседания. Т. 19396, опубл. 14.12.2021. – 12 с.
5. Смирнов Д.В. Придонное устройство добычи железомарганцевых конкреций со дна мирового океана и расчет его основных параметров // Записки Горного института. – 2007. – Т. 170, – ч. 1. – С. 69-72.
6. 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/rmi.2019.1.88. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88.
7. Юнгмейстер Д.А., Большунов А.В., Смирнов Д.В. Лабораторные исследования добычного исполнительного органа агрегата сбора железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 198-200.
8. Патент № 193043 РФ. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей / Юнгмейстер Д.А., Сержан С.Л., Исаев А.И., Королев Р.И., Бородкин Э.О. – №2019124412, заявл. 29.07.2019; опубл. 11.10.2019, Бюл. №29.
9. Примеры расчёта вакуумной техники: Каталог Camozzi. – М., 2020. – 6 с.
10. Моноблочные центробежные насосы с резьбовыми раструбами: Каталог Calpeda. – М., 2020. – 12 с.

References

1. Margolis S.V, Burns R.G. Pacific Deep-Sea Manganese Nodules: Their Distribution, Composition, and Origin // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1976, vol. 4, no. 1, pp. 229-263. DOI: 10.1146/annurev.ea.04.050176.001305.
2. Levin L.A., Mengerink K., Gjerde K.M., Rowden A.A., Lee Van Dover C., Clark M.R., Ramirez-Llodra E., Currie B., Smith C.R., Sato K.N., Gallo N., Sweetman A.K., Lily H., Armstrong C.W., Bridger J. Defining “serious harm” to the marine environment in the context of deep-seabed mining // Mar. Policy. Elsevier. 2016, vol. 74, no. October, pp. 245-259. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.09.032.
3. Cronan D.S. Manganese Nodules // Encyclopedia of Ocean Sciences. 3rd ed. Elsevier, 2019, no. June, pp. 607-614. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11383-1.
4. Russian Federation. International Seabed Authority. Twenty-sixth Session: Minutes of the Meeting. Vol. 19396, publ. 14.12.2021. – 12 p.
5. Smirnov D.V. Bottom-mounted device for mining of ferromanganese nodules from the bottom of the World Ocean and calculation of its main parameters // Journal of Mining Institute. 2007, vol. 170, part 1, pp. 69-72.
6. Yungmeister D.A., Sudarikov S.M., Kireev K.A. Feasibility of type of deep-water technologies for the extraction of marine ferromanganese nodules // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 235, pp. 88-95.
7. Yungmeister D.A., Bolshunov A.V., Smirnov D.V. Laboratory studies of the mining executive body of the unit for collecting ferromanganese nodules // Journal of Mining Institute. 2008, vol. 178, pp. 198-200.
8. Patent No. 193043 RU. Device for collecting ferromanganese nodules from the seabed / Yungmeister D.A., Serzhan S.L., Isaev A.I., Korolev R.I., Borodkin E.O. – №2019124412, application 29.07.2019; publ. 11.10.2019, Bul. No. 29.
9. Calculation examples of vacuum technology: Catalogue Camozzi. – Moscow, 2020. – 6 p.
10. Monoblock centrifugal pumps with threaded sleeves: Catalogue Calpeda. – Moscow, 2020. - 12 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

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
Сержан Сергей Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин	Serzhan Sergey Leonidovich – candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of transport technological processes and machines
Смоленский Максим Павлович – аспирант	Smolensky Maxim Pavlovich – postgraduate student
ivanchenko97@mail.ru	

Получена 07.06.2022