

РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

М.Г. РАХУТИН¹, д-р техн. наук, А.С. КАШИРСКИЙ², инженер

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, e-mail: rahutin.mg@misis.ru

² Министерство промышленности и торговли Российской Федерации,
125039, Москва, Пресненская наб., д. 10, стр. 2, e-mail: kashirsky@mail.ru

© Рахутин М.Г., Каширский А.С., 2020

В работе предложены новые классификационные признаки машин для подводной добычи твердых полезных ископаемых – цикличность и непрерывность действия. Установлено, что начиная с глубины 300...500 м для машин циклического действия скорость перемещения исполнительного органа (трала, драги-волокуши и др.) и концентрация полезных ископаемых не имеют определяющего значения. При выборе оборудования для подводной добычи на глубине более 100 м и прогнозе его производительности для машин циклического действия предложено учитывать глубину разработки, скорость подъема и опускания исполнительного органа, а для машин непрерывного действия – показатели надежности, например коэффициент готовности, определяемый экспертным путем.

Ключевые слова: машины для подводной добычи, классификационные признаки, твердые полезные ископаемые, эксплуатационная производительность, Мировой океан, железомарганцевые конкреции.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-39-45

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения дна Мирового океана являются весьма перспективным источником полезных ископаемых и содержат практически весь их спектр в объемах, которые по многим полезным компонентам значительно превышают запасы континентальной суши [1, 2].

Во многих странах такие месторождения считают перспективной сырьевой базой и активно занимаются проблемой их разработки [3–5].

В ближайшем будущем с высокой вероятностью предполагается начало промышленной подводной добычи со дна Мирового океана твердых полезных ископаемых, в том числе железомарганцевых конкреций (ЖМК), имеющих средние размеры 3...8 см и находящихся непосредственно на дне на глубине от 150 м до 5 км [6].

Цель работы – разработать принципы расчета и прогноза производительности оборудования для подводной добычи твердых полезных ископаемых на глубине свыше 100 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Начиная с 60-х годов прошлого века в различных странах проводились как экспериментальные работы, так и теоретические исследования. Предложено большое количество машин и оборудования для подводной добычи полезных ископаемых, в основном ЖМК.

Данное оборудование предлагалось классифицировать по различным признакам:

1) виду энергии, используемой для добычных и транспортных целей [7]. Основные группы машин по данному классификационному признаку – это машины, использующие механическую, гидравлическую или оба вида энергии [8];

2) глубине разработки исходя из экономической эффективности методов добычи [9]. Диапазон глубин варьировался от 50 м для многоковшовой драги до 300 м для эрлифтовой гидравлической драги; в этом диапазоне рассматривались также гидравлическая землесосная и канатная драги.

3) типу передвижения по морскому дну [10]: установки с гибким тяговым элементом, устройства с колесными движителями, машины на гусеничном и шнековом ходу, установки шагающего типа.

Наличие продолжительного и обширного опыта подводной добычи полезных ископаемых до глубины 50 м значительно облегчает выбор способа и оборудования для таких условий и не является предметом рассмотрения в данной статье.

В то же время нам не встречалось работ, посвященных расчету и прогнозу эксплуатационной производительности на больших глубинах, при этом в связи с перспективностью подводной добычи в ближайшее время расчет и прогноз производительности такого оборудования окажутся востребованными.

При выборе способа добычи и используемого оборудования одним из основных параметров является производительность как отдельных машин, так и производственного участка и предприятия в целом. Поэтому в дополнение к имеющимся классификационным признакам, приведенным выше, мы предлагаем по аналогии с подземными породопогрузочными машинами разделить все оборудование на две большие группы: машины (методы) **циклического** и **непрерывного** действия.

Примером машин непрерывного действия являются многоковшовые драги, оборудование сбора ЖМК со дна с использованием аэрлифтного подъема на поверхность.

К машинам **циклического** действия можно отнести грейферы, драги-волокуши, тралы.

В настоящее время практически отсутствуют работы, посвященные расчету или прогнозу эксплуатационной производительности рассматриваемого оборудования. Основные параметры эффективности добычи полезных ископаемых невозможно рассчитать без определения величины эксплуатационной производительности, о чем и пойдет речь в данной статье.

Основу прогноза эксплуатационной производительности машин непрерывного действия для подводной добычи полезных ископаемых, на наш взгляд, должна составлять оценка уменьшения расчетной (теоретической) производительности W , что позволит прогнозировать фактическую (эксплуатационную) производительности W_0 в рассматриваемых условиях.

Для решения данной задачи предложено учитывать среднюю продолжительность производительной работы T_p на оцениваемом отрезке – например, в среднем за смену, сутки, месяц. Средняя продолжительность выполнения вспомогательных операций T_e определяется за тот же период эксплуатации. Уровень организации работ предлагается учитывать через продолжительность простоев по организационным причинам T_{on} .

Для машин непрерывного действия основным фактором, влияющим на эксплуатационную производительность, на наш взгляд, является частота отказов и продолжительность их устранения (время восстановления), характеризуемая таким показателем, как «коэффициент готовности». Данная оценка может быть точной при наработке достаточного объема статистических данных.

Надежность комплекса предлагается оценивать через продолжительность устранения отказов (время восстановления) T_{yo} с использованием показателя «коэффициент готовности» K_z . Для выбора значения данного коэффициента оцениваемое оборудование нужно разделить на пять групп исходя из предполагаемой частоты отказов и продолжительности их устранения, для этого используют пять значений коэффициента готовности K_z в диапазоне 0,4...0,9 (например, 0,4; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9).

Тогда выражение для определения величины эксплуатационной (фактической) производительности примет вид

$$W_э = W \frac{T_p}{T_p + T_{yo} + T_э + T_{on}} \quad (1)$$

Разделив числитель и знаменатель на продолжительность времени работы T_p , получим следующее выражение для определения эксплуатационной производительности:

$$W_э = W \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_z} + \frac{T_э + T_{on}}{T_p}} \quad (2)$$

На рис. 1 показано изменение расчетной эксплуатационной производительности в зависимости от значения коэффициента готовности и доли затрат времени на вспомогательные операции и простои по организационным причинам.

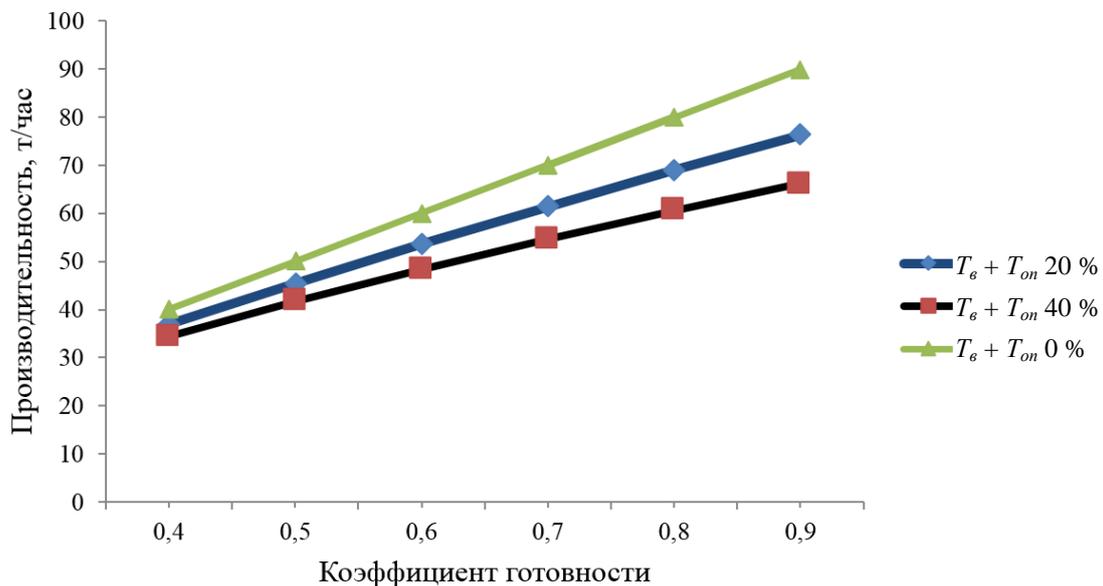


Рис. 1. Зависимость эксплуатационной производительности от значения коэффициента готовности, затрат времени на вспомогательные операции и простои по организационным причинам

Рассмотрим расчет эксплуатационной производительности циклического оборудования, к которому можно отнести тралы, драги-волокуши, грейферы (далее – «трал»).

В общем виде эксплуатационную производительность можно выразить как отношение массы полезного ископаемого в трале Q к суммарным затратам времени, включая затраты времени на его заполнение T_3 , подъем и спуск T_{cn} :

$$W_3 = \frac{Q}{T_{cn} + T_3 + T_{yo} + T_6 + T_{on}}. \quad (3)$$

В свою очередь продолжительность времени заполнения трала, учитываемая в расчетах массой полезного ископаемого, находится из выражения

$$T_3 = \frac{Q}{A_3 \cdot v \cdot q_{3AL} \cdot K_n \cdot \eta}, \quad (4)$$

где A_3 – ширина захвата трала (заходки), м; v – скорость движения (буксировки) трала, м/мин; q_{3AL} – плотность залегания конкреций, т/м²; K_n – полнота сбора конкреций, которую предлагается учитывать коэффициентом, имеющим диапазон от 0 до 1, при отсутствии потерь при сборе полезного ископаемого предлагаемый коэффициент принимает значение «1»; η – разубоживание конкреций налипшими илами, $\eta = 0,01 \cdot (100 - П\%)$, где П% – процент разубоживания.

Для расчета продолжительности подъема и опускания трала T_{cn} необходимо учитывать:

глубину залегания полезного ископаемого H , м;

скорость подъема и спуска трала V_{cn} , м/мин (для упрощения рассматриваемой модели в данном примере принимаем скорость подъема и спуска равными друг другу).

Затраты времени на подъем и опускание трала определяется из выражения

$$T_{cn} = \frac{2H}{V_{cn}}. \quad (5)$$

С учетом формул (4) и (5) выражение (3) можно записать в следующем виде:

$$W = \frac{Q}{\frac{2H}{V_{cn}} + \frac{Q}{A_3 \cdot v \cdot q_{3AL} \cdot K_n \cdot \eta} + T_{yo} + T_6 + T_{on}}. \quad (6)$$

Для многосекционных тралов объем трала нужно трактовать как объем всех секций, а к продолжительности вспомогательных операций добавляется суммарная продолжительность ввода в работу очередных секций.

Рассмотрим влияние на производительность различных факторов для следующих условий эксплуатации: ширина трала 2 м, скорость траления 30 м/мин, плотность залегания конкреций 20 кг/м², продолжительность вспомогательных операций 12 мин, время простоев по организационным причинам – 10 мин на один цикл, емкость трала 6 т, коэффициент заполнения с учетом разубоживания илом 0,85, скорость спуска-подъема трала 50, 100, 200 м/мин.

Зависимость эксплуатационной производительности от глубины разработки, скорости спуска-подъема трала и коэффициента готовности K_2 при различной глубине разработки представлена на рис. 2, 3.

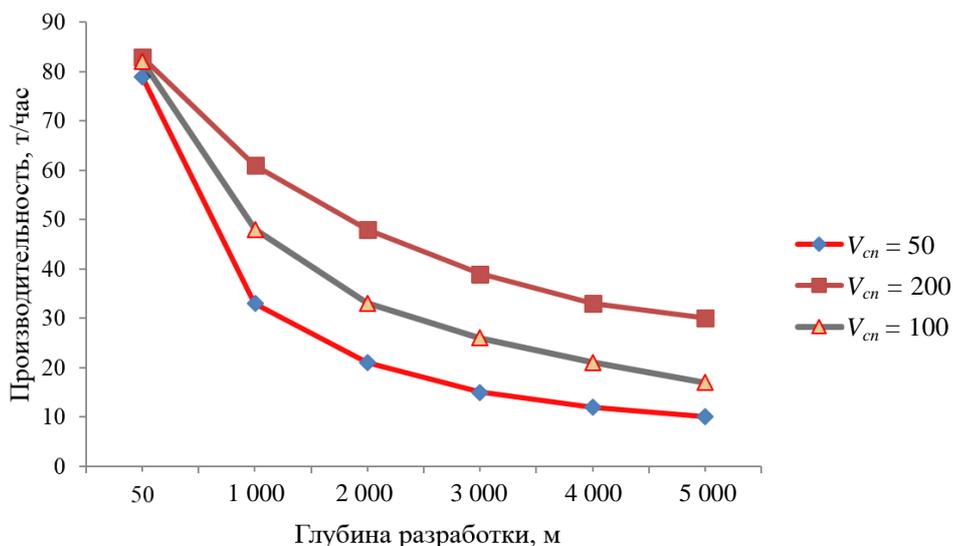


Рис. 2. Зависимость эксплуатационной производительности от глубины разработки и скорости спуска-подъема троса

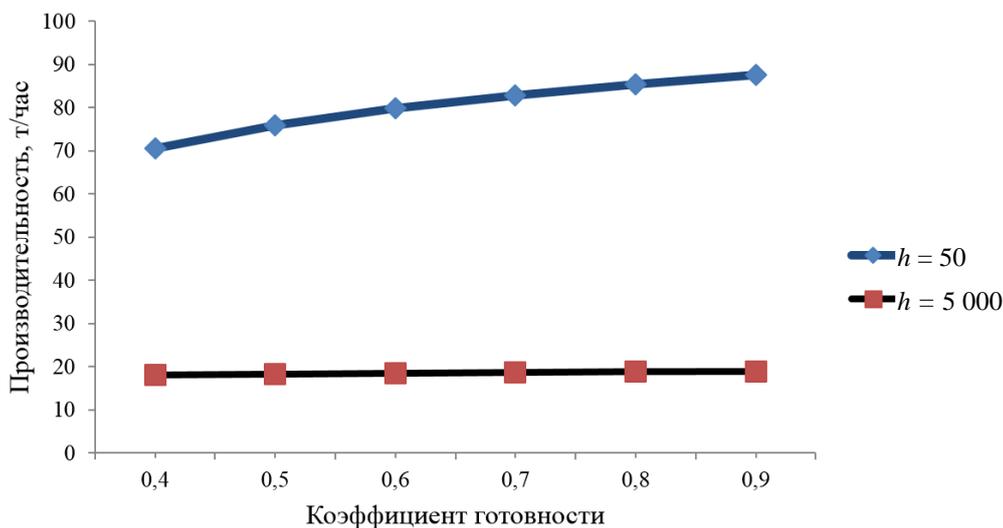


Рис. 3. Зависимость эксплуатационной производительности от значения коэффициента готовности и глубины разработки

Как видно из представленных зависимостей, основными факторами, влияющими на производительность машин циклического действия, являются глубина разработки и скорость спуска-подъема троса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования предложено классифицировать машины для подводной добычи на машины **циклического** и **непрерывного** действия.

При выборе оборудования подводной добычи и прогнозе его производительности предложено учитывать для машин циклического действия глубину разработки и скорость подъема и спуска исполнительного органа (троса, драги и т.д.), а для машин непрерывного действия прогнозные показатели их надежности, в частности коэффициент готовности.

Установлено, что начиная с глубины 300...500 м для машин циклического действия скорость перемещения исполнительного органа и концентрация полезного ископаемого на дне не имеют определяющего значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеральные ресурсы Мирового океана: концепция изучения и освоения (на период до 2020 г.) / гл. ред. С.И. Андреев. СПб.: ВНИИ «Океангеология», 2007. 97 с.
2. Вержанский А.П., Андреев С.И. К вопросу «О создании морской горнодобывающей отрасли России» // *Горная промышленность*. 2015. № 3. С. 6–9.
3. 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. 44–49.
4. Lodge M.W., Segerson K., Squires D. Sharing and Preserving the Resources in the Deep Sea: Challenges for the International Seabed Authority // *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2017. V. 32. № 3. P. 427–457.
5. Nijen K.V., Passel S.V., Squires D. A stochastic techno-economic assessment of seabed mining of polymetallic nodules in the Clarion Clipperton Fracture Zone // *Marine Policy*. 2018. V. 95. P. 133–141.
6. Железо-марганцевые конкреции Тихого океана / отв. ред. П.Л. Безруков. М.: Наука, 1976. 300 с.
7. Добрецов В.Б., Рогалев В.А. Основные вопросы минеральных ресурсов Мирового океана. СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2003. 524 с.
8. Сержан С.Л. Обоснование рациональных параметров системы с грунтозаборным устройством и гидродвигателем для добычи железомарганцевых конкреций: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 157 с.
9. Мерио Дж. Минеральные богатства океана. М.: Прогресс, 1969. 440 с.
10. Тимофеев И.П. Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна. Л.: ЛГИ, 1987. 176 с.

Для цитирования: 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 (8). С. 39–45.

CALCULATING AND FORECASTING HARDWARE PERFORMANCE FOR UNDERWATER MINING OF SOLID MINERALS

M.G. RAKHUTIN¹, Dr. Sc., A.S. KASHIRSKIY², Engineer

¹ National research technological university "MISIS", 4, Leninsky Prospekt, 119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: rahutin.mg@misis.ru

² Ministry of industry and trade of the Russian Federation, 10, p. 2, Presnenskaya emb., 125039, Moscow, e-mail: kashirsky@mail.ru

In this article, new classification features of machines for underwater mining of solid minerals are proposed, such as their cyclical and continuous operation. It is established that for cyclical machines starting from a depth of 300...500 m the speed of movement of the executive body (trawl, drag, etc.) and the concentration of minerals do not have a determining

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (8), 2020*

value. When selecting equipment for underwater mining at a depth of more than 100 m and forecasting its performance, it is proposed to take into account the depth of development for cyclical machines, the speed of lifting and lowering of the executive body, and for continuous machines, reliability indicators, for example, the readiness coefficient determined by expert means.

Keywords: machines for underwater mining, classification features, solid minerals, operational productivity, world ocean, ferromanganese nodules.

REFERENCES

1. Mineralnye resursy Mirovogo okeana: kontseptsiya izucheniya i osvoyeniya (na period do 2020 g.) [Mineral resources of the World Ocean: the concept of study and development (for the period until 2020)]. Ch. ed. S.I. Andreev. Saint Petersburg: VNI Okeangeologiya, 2007. 97 p.
2. Verzhansky A.P., Andreev S.I. On the question "On the creation of the marine mining industry in Russia". *Gornaya promyshlennost*. 2015. No. 3 (121), pp. 6–9. (In Russian).
3. Drobadenko V.P., Vilmis A.L., Lukonina O.A., Markelov S.V. Problems and prospects for the development of mineral resources of the bottom of the seas and oceans. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 11, pp. 44–49. (In Russian).
4. Lodge M.W., Segerson K., Squires D. Sharing and Preserving the Resources in the Deep Sea: Challenges for the International Seabed Authority. *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2017. V. 32. No. 3, pp. 427–457.
5. Nijen K.V., Passel S.V., Squires D. A stochastic techno-economic assessment of seabed mining of polymetallic nodules in the Clarion Clipperton Fracture Zone. *Marine Policy*. 2018. V. 95, pp. 133–141.
6. Zhelezo-margantsevyie konkrety Tikhogo okeana. [Ferromanganese nodules of the Pacific Ocean]. Resp. ed. P.L. Bezrukov. Moscow: Nauka, 1976. 300 p.
7. Dobretsov V.B., Rogalev V.A. Osnovnye voprosy mineralnykh resursov Mirovogo okeana [Main issues of mineral resources of the World ocean]. Saint Petersburg: Mezhdunarodnaya akademiya nauk ekologii, bezopasnosti cheloveka i prirody, 2003. 524 p.
8. Serjeant S.L. Substantiation of rational parameters of a system with a ground-intake device and a hydraulic motor for mining ferromanganese nodules: cand. diss. (Engineering). Saint Petersburg, 2015. 157 p. (In Russian).
9. Mero Dzh. Mineralnye bogatstva okeana. [Mineral wealth of the ocean]. Moscow: Progress, 1969. 440 p.
10. Timofeev I.P. Shagayushchie mashiny dlya osvoyeniya resursov morskogo dna. [Walking machines for the development of the resources of the sea bottom]. Leningrad: LGI, 1987. 176 p.

Поступила в редакцию/received: 11.08.2020; после рецензирования/revised: 27.10.2020;
принята/accepted 08.11.2020