

УДК 622.271.5

**И.А. Королев<sup>1</sup>, Е.К. Пермякова<sup>1</sup>, С.И. Чухарев<sup>2</sup>**

**I.A. Korolyov<sup>1</sup>, E.K. Permyakova<sup>1</sup>, S.I. Chuharev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University

## **РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОДВОДНЫХ ДОБЫЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПОДВИЖНЫМ ПРОТИВОВЕСОМ**

### **DEVELOPMENT OF ADVANCED UNDERWATER MINING COMPLEXES WITH A MOVABLE COUNTERWEIGHT**

Необходимость разведки и разработки донных месторождений полезных ископаемых требует создания специального подводного горного оборудования, в частности донных агрегатов, несущих на себе добычные рабочие органы различных типов и способные перемещаться в сложных горно-геологических условиях морского дна. Рассмотрена двухопорная шагающая установка, принцип действия которой основан на смещении центра масс системы подвижным противовесом. Работа посвящена созданию динамической модели шагающей установки для подводной добычи полезных ископаемых с целью определения закона ее движения в условиях водной среды под действием заданных внешних сил, включая силу Архимеда.

**Ключевые слова:** железомарганцевые конкреции, шагающая установка, рабочий орган, противовес, динамическая модель.

The need for exploration and development of bottom mineral deposits requires the creation of special underwater mining equipment. In particular, bottom units that carry mining working bodies of various types and are able to move in complex mining and geological conditions of the seabed. The paper considers a two-support walking installation, the principle of operation of which is based on the displacement of the center of mass of the system by a movable counterweight. The paper describes the process of dynamic model's creation of a walking machine for underwater mining, in order to determine the law of its movement in the water environment under the action of specified external forces, including the Archimedean force.

**Keywords:** ferromanganese nodules, walking unit, working body, counterweight, dynamic model.

Оценка и прогнозирование перспектив развития минерально-сырьевого комплекса ведущих мировых держав демонстрирует устойчивый рост потребления твердых полезных ископаемых (ТПИ), фактическая доступность минерально-сырьевых ресурсов является ключевым показателем промышленно-экономического потенциала [1, 3].

Резкое усложнение горно-геологических условий разработки континентальных месторождений ТПИ и тенденция к повышению рентабельности процесса добычи обостряют потребность в поиске новых, нетрадиционных источников минерального сырья, формулируя направление долгосрочной национальной политики в Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года [4].

Промышленное освоение континентальных запасов марганца в современной России практически не ведется из-за общего низкого качества карбонатных руд ведущих месторождений по категориям А+В+С (материковые месторождения) – Усинского и Дурновского месторождений (Кемеровская область), а также месторождения в Свердловской области, требующих преимущественно подземной разработки, и Порожинского марганцевого месторождения, залегающего в вулканогенно-осадочных породах (Красноярский край) [5]. Дурновское месторождение по своим горно-геологическим условиям может отрабатываться открытым способом с соответствующей рекультивацией земель, нарушенных в процессе отработки карьерного поля и отвалообразования пород вскрыши и утилизацией шламов при обогащении марганцевой руды.



Рис. 1. Марганцевая сырьевая база Российской Федерации (состояние на 2017–2018 гг.)

Логичным продолжением основного комплекса геологоразведочных и добычных работ твердых полезных ископаемых континентальных месторождений и залежей морского дна Мирового океана должна стать, по оценкам специалистов, интенсификация промышленного освоения ТПИ шельфовых месторождений [1, 4]. Конечной задачей такого комплекса мероприятий является

создание устойчивой минерально-сырьевой ресурсной базы и стратегического запаса резервов в интересах обеспечения экономической безопасности Российской Федерации. Месторождения морского дна могут восполнить дефицит марганца как одного из ключевых сырьевых элементов современной тяжелой промышленности страны, дополняя список такими стратегически важными металлами, как никель, медь и кобальт. В качестве реального источника марганца могут быть рассмотрены железомарганцевые конкреции (ЖМК) морского дна.

Последовательность работ по добыче ЖМК разбивается на множество самостоятельных операций, для осуществления которых необходимо разработать и создать соответствующие технические системы и оборудование. При подводной добыче выделяют следующие технологические операции:

- отделение добываемого полезного ископаемого от массива месторождения;
- транспортировка руды от грунтозаборного устройства до плавучего или стационарного средства (судна, баржи, платформы);
- первичная обработка руды (сепарирование, промывание и т.д.);
- хранение и транспортировка на берег для последующей металлургической переработки.

Геологоразведочные работы в международном районе морского дна Мирового океана выявили перспективные глубоководные месторождения кобальтовых корок и сульфидов с высоким содержанием меди и попутным содержанием цинка и золота. Большие глубины залегания (свыше 4500 м), общая отдаленность крупных месторождений и как следствие высокие затраты на добычу и транспортировку добытых ресурсов способствуют развитию добычи шельфовых месторождений ЖМК Балтийского, Баренцевого, Карского и Белого морей, создавая устойчивую минерально-сырьевую базу для металлургической промышленности северо-запада Российской Федерации [1].

Предварительные работы, проведенные на основании геологических данных, позволяют выполнить качественную оценку участков залегания ЖМК Финского залива: глубина залегания в среднем составляет диапазон 20–60 м, углы падения залежей составляют 2,5–3° (горизонтальность и поверхностное без покрывающих пород расположение). Дополнительным достоинством таких шельфовых месторождений является содержание  $MnO_2$  в диапазоне 15–50 %.

Изучение и промышленное освоение ресурсов морского дна невозможно без технических средств и в первую очередь подводного горного оборудования. Важная роль среди подводных горных машин отводится донным агрегатам, несущим на себе добычные и геологоразведочные рабочие органы в виде всасывающих наконечников, рыхлителей, вакуум-захватов и др. При разработке техники для промышленной добычи донных полезных ископаемых одним из важнейших предъявляемый к ней требований является обеспечение надежного перемещения агрегата в сложных условиях эксплуатации, характеризующихся

низкой несущей способностью грунтов, пересеченностью поверхности дна, возможным наличием преград и т.п. Кроме того, перемещение донного агрегата не должно вызывать разрушения поверхностного слоя, замутнения воды и нарушения экологии окружающей морской среды.

Анализ патентов и опыта разработок показывает, что существует множество решений создания комплексов для добычи ЖМК с морского дна. Но до настоящего времени все они до конца не опробованы, и, кроме того, экономическая эффективность, которая может быть оценена при сопоставлении конкурирующих предложений, еще не определена. Технология добычи ЖМК определяется тем, что конкреции свободно залегают на поверхности дна, и нет необходимости проведения работ или предварительного дробления (разрушения) горной массы. Поэтому все варианты разрабатываемых добывающих устройств рассчитаны на захват конкреций с поверхности дна и их последующее транспортирование на поверхность.

Наиболее интересными решениями и концепциями, прошедшими апробацию за последние 25 лет, являются:

- гидравлическая система с использованием эрлифтного и насосного вариантов подъема; в ней предусмотрены отдельные подсистемы для сбора конкреций и подъема их на поверхность;
- механическая (канатно-ковшовая или канатно-лебедочная) система, которая способна производить сбор и подъем конкреций;
- система автономных дистанционно управляемых челночных аппаратов, осуществляющих сбор и подъем конкреций в непрерывном режиме.

Донные технические средства обладают рядом конструкторских особенностей ввиду специфики добычи марганцевых руд, геоморфологических параметров месторождений и, что немаловажно, глубины залегания.

В качестве средств передвижения по дну уже предложены и могут быть использованы движители гусеничного, колесного, шнекового, шагающего, вибрационного и других типов. Однако перечисленные условия эксплуатации делают практически непригодными или малоэффективными большинство перечисленных движителей [5, 6, 7, 8].

Анализ известных способов передвижения донных агрегатов показал перспективность использования шагающих движителей, обеспечивающих работу на любых грунтах, в том числе и на грунтах со сложным рельефом, обладающих высокой проходимостью, экологичностью, простотой управления и позволяющих вести работы в широком технологическом диапазоне [9, 10, 11]. Перемещение двухопорной шагающей установки может быть обеспечено путем изменения положения центра масс перемещающимся вдоль ее рамы противовесом, изменением плавучести при создании подъемной силы или созданием постоянной подъемной силы с помощью подвижного поплавка.

Двухопорная шагающая установка с противовесом представлена на рис. 2. Установка состоит из несущей фермы 1, установленной на двух опорах 2, противовеса 3 и рабочего органа 4.

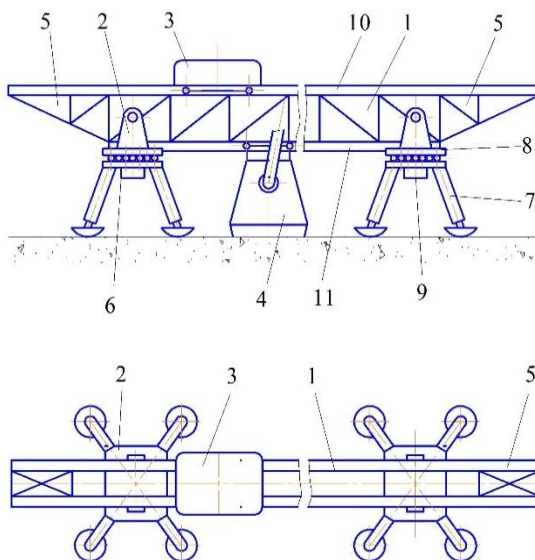


Рис. 2. Двухопорная шагающая установка: 1 – ферма; 2 – опора; 3 – противовес; 4 – рабочий орган; 5 – консоль; 6 – опорный стол; 7 – телескопическая штанга; 8 – поворотная платформа; 9 – привод; 10, 11 – направляющие

Несущая ферма 1 имеет прямолинейный участок, а концы фермы изогнуты вверх под некоторым углом, образуя относительно опор симметричные консоли 5. Каждая из опор 2 (левая и правая) состоит из опорного стола 6, снабженного телескопическими штангами 7 с опорными башмаками и поворотной платформы 8 с приводом 9, шарнирно соединенной с несущей фермой. Ферма 1 снабжена продольными направляющими 10, 11 для перемещения тяговой тележки с противовесом 3 и рабочего органа 4.

Поворот фермы 1 в вертикальной плоскости осуществляется под действием момента, создаваемого весом перемещающегося вдоль фермы противовеса 3. При перемещении противовеса 3 на левую консоль фермы изменяется положение центра масс установки, происходит отрыв правой опоры 2 от морского дна и поворот фермы 1 в горизонтальной плоскости на заданный угол приводом 10. При движении противовеса с левой консоли фермы правая опора 2 опустится в новое положение. Для переноса левой опоры противовес 3 перемещают на правую консоль фермы, и процесс шагания повторяется.

Шагающие установки данного типа являются объектами новой техники, и для них отсутствуют методики расчета основных кинематических парамет-

ров, в частности скоростей и ускорений поворота фермы и перемещения противовеса вдоль оси фермы, в зависимости от силовых и геометрических параметров установки, неизвестны законы движения установки с учетом особенностей перемещения в водной среде.

При составлении динамической модели шагающего устройства поворот фермы в горизонтальной плоскости не рассматривается. В шагающей установке данного типа поворот фермы в вертикальной плоскости осуществляется под действием момента, создаваемого весом перемещающегося вдоль фермы противовеса, приводимого в движение асинхронным двигателем. Поворот фермы происходит относительно левой опоры, при этом ось абсцисс направлена вдоль оси фермы в сторону движения противовеса, а её начало находится в центре левой опоры. При этом ферма рассматривается как труба, заполненная водой.

Шагающая установка представляет собой механическую систему с двумя степенями свободы. В качестве обобщённых координат приняты угол поворота фермы в вертикальной плоскости  $\varphi$  и координата  $x$ , определяющая положение противовеса при подъеме и опускании фермы. Из уравнения равновесия координата противовеса может быть определена следующим образом:

$$x_c = \pm \frac{m_0 (L_0 / 2 + L_1) + (m_2' + m_3') L_0}{m_1 \cos(\varphi^0 - \alpha_0)} \cos \varphi^0,$$

где  $m_0, m_1$  – соответственно массы фермы и противовеса, кг;  $m_2', m_3'$  – приведенные массы рабочего органа и правой опоры с учетом силы Архимеда, кг;  $L_0$  – расстояние между опорами, м;  $L_1$  – длина консоли, м;  $\varphi_0$  – начальное значение угла поворота фермы;  $\alpha_0$  – угол наклона консоли к оси фермы.

Здесь и далее знак (+) соответствует режиму подъема фермы, а знак (–) – режиму опускания. Сила Архимеда, действующая на ферму, уравновешивается весом находящейся в ней воды и в дальнейшем не учитывается.

Движение системы описывается двумя уравнениями Лагранжа второго рода в обобщенных координат  $x$  и  $\varphi$ :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial v} - \frac{\partial T}{\partial x} &= Q_x; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega} - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= Q_\varphi, \end{aligned}$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;  $Q_x, Q_\varphi$  – обобщённые силы, соответствующие обобщенным координатам  $x$  и  $\varphi$ .

Угловая скорость поворота фермы и линейная скорость движения противовеса относительно оси фермы

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad v = \frac{dx}{dt}.$$

На основании полученных дифференциальных уравнений, описывающих законы движения противовеса относительно оси консоли и поворота фермы в процессе шагания с учетом особенностей движения в водной среде, создан оригинальный алгоритм, позволяющий рассчитывать линейные и угловые скорости и ускорения движения основных элементов установки в зависимости от принятых параметров кинематической схемы установки –  $L_0, L_1, \alpha_0, \beta$ , а также ряда конструктивных параметров (диаметра и толщины стенки трубы фермы и др.), что позволяет оптимизировать время основных циклов движения с целью повышения производительности работы установки.

В результате проведенных исследований представлена конструкция установки, способной перемещаться по морскому дну при помощи шагового движителя и совершать работу по бурению геологоразведочных скважин (рис. 3). Буровая платформа за счет лебедки и троса может перемещаться по всей длине несущей рамы.

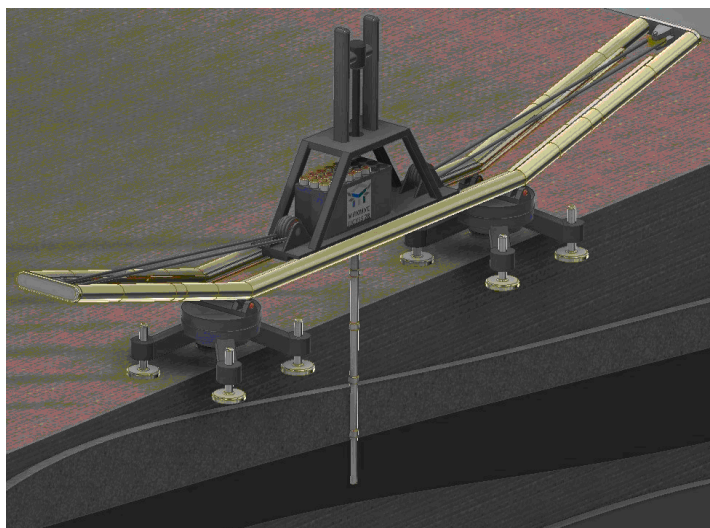


Рис. 3. Шагающая установка для геологоразведочного бурения

Полученные результаты рекомендуются к использованию при исследовании и проектировании двухопорных шагающих установок для разведки и разработки донных месторождений полезных ископаемых.

### Список литературы

1. Добрецов В.Б., Рогалев В.А., Опрышко Д.С. Мировой океан и континентальные водоемы: минеральные ресурсы, освоение, экология / Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы. – СПб., 2007. – 796 с.
2. Быховский Л.З., Терентьев В.Б., Тигунов Л.П. Железомарганцевые образования Мирового океана и морского шельфа – минеральное сырье многоцелевого назначения // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. – № 31. – М.: ВИМС, 2010. – 108 с.
3. Дробаденко В.П., Калинин И.С., Малухин Н.Г. Методика и техника морских геологоразведочных и горных работ. – М.: ИнФолио, 2010, 352 с.
4. Инженерная геология рудной провинции Кларион-Клиппертон в Тихом океане / Я.В. Неизвестнов, А.В. Кондратенко, С.А. Козлов [и др.] // Тр. ВНИИ Океанологии М-ва природн. ресурсов РФ в РАН. – Т. 197. – СПб.: Наука, 2004. – 281 с.
5. Гос. регистрация программы для ЭВМ №2015662590 Российская Федерация. Динамическое исследование процесса взаимодействия гибкого тягового элемента с донным агрегатом / Тимофеев И.П., Колтон Г.А., Королев И.А., Большунов А.В.; № 2015619312; заявл. 06.10.2015, опубл. 10.12.2015.
6. Королев И.А., Тимофеев И.П. Исследование комплекса добычи железомарганцевых конкреций при движении его гибким тяговым элементом // Записки горного института. – СПб, 2012. – Т. 196. – С. 244–247.
7. Колтон Г.А., Королев И.А., Математическое моделирование движения донного добычного устройства при транспортировании гибким тяговым элементом // Записки горного института. – СПб, 2014. – Т. 209. – С. 55–58.
8. Пат. 2466275 Российская Федерация. Комплекс для добычи и обогащения твердых полезных ископаемых / Ю.Д. Тарасов, И.П. Тимофеев, А.В. Большунов, В.Н. Морус, И.А. Королев; опубл. 2012. Бюл. № 31.
9. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – Л.: Машиностроение, 1990. – 310 с.
10. Пат. на изобретение №2601880 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 №2015148517/03. Шагающее устройство для подводной добычи полезных ископаемых / Тимофеев И.П., Соколова Г.В., Королев И.А., Кузькин А.Ю., Колтон Г.А.; заявл. 11.11.2015, опубл. 10.11.2016.
11. Пат. на полезную модель, №166446 Российская Федерация, МПК E21B 7/12, МПК E21B 7/02, МПК E21C 49/00, МПК E02F 9/04, МПК E21C 50/00. Шагающая буровая установка, № 2016126893/03; заявл. 04.07.2016; опубл. 27.11.2016.

Получено 15.11.2020



**Пермякова Екатерина Константиновна** – аспирантка кафедры «Машиностроение», Санкт-Петербургский горный университет, e-mail: s185046@stud.spmi.ru.

**Чухарев Сергей Игоревич** – студент, кафедра «Горная электромеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: 130chukharev130@gmail.com.

Научный руководитель **Королев Игорь Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение», Санкт-Петербургский горный университет, e-mail: korolev\_ia@pers.spmi.ru.