УДК 622.285.4: 624.191.6

ОБОСНОВАНИЕ ТИПОВ ГЛУБОКОВОДНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ДОБЫЧИ МОРСКИХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ

Д.А.ЮНГМЕЙСТЕР, С.М.СУДАРИКОВ, К.А.КИРЕЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены условия залегания придонных полезных ископаемых, представленных в виде сульфидов (месторождение «Логачев») и железо-марганцевых конкреций (ЖМК). Дан анализ конструкций и параметров различных средств сбора и транспортирования сульфидов и ЖМК со дна до поверхности, указана возможность эффективного использования подъема сосудов на кабель-тросе. Предложены конструктивные схемы для сбора ЖМК и сульфидов в виде емкостей на тросе, оборудованных манипуляторами с захватывающими устройствами тарельчатого, барабанного или грейферного типа. В них захват кусков породы или ЖМК осуществляется за счет создания разрежения в коллекторах исполнительных органов и притягивания к ним кусков породы или ЖМК перепадом давления воды внутри коллектора и снаружи. Даны ориентировочные параметры добычной системы. Так, для кабель-троса, выполненного из кевлара диаметром 50 мм, производительность может составить 200-400 тыс.т в год на одну установку при различной удельной массовой концентрации ЖМК на 1 м².

Ключевые слова: Мировой океан; железо-марганцевые конкреции; сульфиды; кабель-трос; придонный добычный комплекс; производительность

Как цитировать эту статью: Юнгмейстер Д.А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций / Д.А.Юнгмейстер, С.М.Судариков, К.А.Киреев // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 88-95. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88

Введение. Современными исследованиями как геофизическими, так и методами отбора проб было доказано, что на ложе Мирового океана (глубина от 1,5 до 5 км) интерес представляет три типа придонных глубоководных полезных ископаемых: железо-марганцевые конкреции (ЖМК), кобальто-марганцевые корки (КМК) и сульфиды. Все это уникальные месторождения, промышленная разработка которых не ведется в настоящее время.

С точки зрения добычи полезных ископаемых со дна океана наибольший интерес (к сожалению, и техническую трудность) представляет добыча ЖМК, которые представляют собой по большей части сферические образования диаметром 5-20 см. Они лежат ровным слоем на поверхности дна, иногда незначительно погружены в ил.

Особую сложность создания глубоководной техники вызывают весьма тяжелые условия работы машин на глубине океана 5 км: давление воды 50 МПа, температура 2-3 °С, локально расположенные кислотные включения или области воды с повышенным содержанием соли, подводные течения и т.п. Тем не менее могут быть предложены разные способы промышленной добычи указанных различных типов придонных полезных ископаемых [1-3, 5-8]. Среди них могут быть выделены следующие (рис.1 [8]): механическое сгребание; гидравлический захват и транспортирование; открытые горные работы (карьеры) на придонных разработках для добычи КМК и ЖМК. При этом необходимы устройства, аналогичные машинам, которые работают на карьерах.

Методы и средства добычи полезных ископаемых со дна Мирового океана. Наибольшую трудность представляет подъем материала со дна на поверхность. Анализ патентов показывает, что наиболее часто предлагается способ вертикального транспортирования – использование гидротранспорта. Так, фирма «Nautilus Minerals» (международный консорциум) разработала такую технологию, при которой трубы не должны разрываться под собственным весом, а добычные машины обрабатывают материал при одновременном обеспечении придонного дробления полезных ископаемых до размера трубы не более 5 см.

Применять эрлифтные установки можно также, когда в трубу на определенной глубине (как правило, менее 1,5 км) подается сжатый воздух. Предлагается также подъем полезных ископаемых в сосудах. Может быть разработан аппарат как некая разновидность субмарины, которая самостоятельно опускается на дно, потом, уменьшая свой вес и захватив полезные ископаемые, поднимается со дна на поверхность (они могут применяться только в глубинах до 1 км).

Рис.1. Упрощенные компоновочные схемы глубоководных добычных агрегатов: а – скрепер канатный (лебедка на судне); б – элеватор ковшовый; в – гидротранспорт; г – эрлифт; д – самовсплывающая установка; е – контейнерный подъемник; ж – ковшовая лента с промежуточными приводами; з – гидротранспорт с погружной (50-100 м) капсулой с насосами
1 – судно-носитель; 2 – донный агрегат; 3 – транспортное средство; 4 – автономный всплывающий агрегат; 5 – промежуточный привод

Рис.2. Глубоководное месторождение сульфидов: а – общий вид; б – образец обломка «курильщика»

По нашему мнению, наибольший интерес представляет использование в качестве подъемных установок лебедки, установленной на судне, и кабель-троса. Совершенно очевидно, что стальные канаты не применимы. Расчеты показывают, что при использовании кабель-тросов диаметром 6 см, наружная несущая оплетка которых выполнена из кевлара (производство Германии или КНР), максимальное тяговое усилие с учетом веса каната (не более 10 т) и динамики работы составляет 150 т. Динамическая составляющая в начале движения установки со дна в толще воды 20 т (лобовое сечение сосуда 10 м², скорость 3 м/с). Таким образом, получается, что сосуд (скип) позволяет поднимать до 80 т полезных ископаемых за цикл. Минимальное время цикла, которое складывается из времени подъема и опускания, загрузки и разгрузки на поверхности, составляет около 2 ч. Как показали расчеты, для указанных выше параметров производительность специального судна со специальными устройствами может составлять 200-400 тыс. т полезных ископаемых в год. Все это позволяет говорить о рентабельности способа.

По данным проф. С.М.Сударикова, который лично на глубоководных аппаратах исследовал глубоководное месторождение сульфидов «Логачев», так называемые «курильщики» первоначально представляют собой столбы образований, внутри которых находятся крепкие трубчатые сульфиды, в основном из железа и меди. Окисляясь на поверхности, они представляют собой рыхлые породы с меньшей крепостью (рис.2).

Эти столбы – «курильщики» – со временем разрушаются и образуют на дне залежи окисленных сульфидов в виде весьма неровного рельефа.

Отработка столбов особенно действующих «курильщиков» нецелесообразна из-за высокой температуры (350 °С) и повышенной кислотности. Кроме того, учитывая способ отделения от массива кусков и подъем их на поверхность, такие работы вызывают серьезные технические трудности, а зачастую просто невозможны. Поэтому ведение добычных работ может осуществляться только на остывших и разрушившихся столбах «курильщиков», но даже в этом случае использование традиционных технологий, аналогичных открытым горным работам на поверхности земли, весьма затруднено – на карьерах применяют буровзрывной способ. Необходимо выравнивание площадок для техники, а по крепким породам выполнение таких работ на больших глубинах требует серьезных исследований и опытных изысканий.

Таким образом, по сложным придонным рельефам крепких сульфидов может применяться технология, осваиваемая концерном «Nautilus Minerals». Однако реальная работа комплекса машин, предложенного этим концерном, сопряжена с решением большого числа очень серьезных проблем.

Для сбора ЖМК экологически «чистым» способом нами предлагается технология, в которой конкреции собираются устройством, снабженным манипуляторами с пластинами, захватывающими ЖМК за счет создания разрежения в полостях этих пластин (вакуумные захваты (ВЗ)). Такое устройство для сбора тяжелых железомарганцевых конкреций, запатентованное в настоящее время (рис.3), относится к горному делу, в частности к устройствам для подводной добычи полезных ископаемых.

Рис.3 Схема устройства для сбора тяжелых железо-марганцевых конкреций: а – комплекс для сбора ТЖК; б – общий вид придонного добычного устройства; в – общий вид вакуумного захвата; з – вид снизу на вакуумный захват

1 – плавсредство; 2 – кабель-трос; 3 – придонное добычное устройство; 4 – лебедка; 5 – центральная цапфа; 6 – стойка; 7 – приемный бункер; 8 – опорный буртик; 9 – поверхность морского дна; 10 – острие стойки; 11, 12 – подшипники; 13 – шарнир; 14 – Г-образный рычаг; 15 – вершина Г-образного рычага; 16 – шток гидроцилиндра; 17 – гидравлический цилиндр; 18 – вакуумный захват; 19 – корпус; 20 – электродвигатель; 21 – насос; 22 – эластичная пластина; 23 – конусное отверстие; 24 – железомарганцевая конкреция; 25 – зазор; 26 – обратный клапан; 27 – механизм поворота; 28 – зубчатый венец; 29 – приводная шестерня; 30 – опора; 31 – патрубок; 32 – приводная станция

Известна установка добычи ЖМК, снабженная надводным плавсредством, транспортирующим органом, придонным добычным устройством сбора с бункером для заполнения ковшей, закрепленных на тяговом канате. Добычное устройство установлено на салазках, оборудовано в передней части ножом-рыхлителем, имеет днище в виде грохотной решетки, перемещается с помощью каната. Движением добычного устройства по дну и черпаков на канате управляют с надводного плавсредства.

Недостатками установки являются низкие производительность, напрямую зависящая от ширины ковшей, и коэффициент обогащения конкреций на дне, что ведет к подъему большого объема пустой породы, запутыванию ветвей тягового каната из-за их свободного провисания, нарушению экологической обстановки в процессе подъема заполненных ковшей.

Устройство для добычи конкреций с морского шельфа содержит надводное плавсредство с установленным на нем оборудованием для обеспечения работы устройства, транспортирующего контура с ковшами, буксировочного каната, придонного добычного устройства в виде полутора, закрепленного на салазках.

Недостаток данного устройства – значительные потери полезного ископаемого при транспортировке из-за свободного свисания ветвей транспортирующего контура.

Установка для добычи полезных ископаемых со дна акватории включает надводное плавсредство с необходимыми устройствами для поддержания жизнеобеспечения и работы обслужи-

вающего персонала и средства энергоснабжения и управления комплексом, гидроподъемный трубопровод, придонную машину на гусеничном ходу с барабанным исполнительным органом.

Недостатками данной установки являются затрудненное управление придонным механизмом, связанное с повышенным замутнением окружающей среды во время работы гусеничной цепи, ограниченная производительность системы из-за необходимости уменьшения диаметра трубопроводов при работе на больших глубинах, возможность заштыбовки трубопровода.

Устройство селективного отбора и предварительного обогащения железомарганцевых конкреций [3], принятое за прототип, включает надводное плавсредство, транспортирующий орган, придонное добычное устройство в виде барабана с продольными пазами на внешней поверхности.

Недостаток данного устройства – невозможность добычи на больших глубинах, низкая производительность установки из-за ограниченной ширины барабана, высокая замутненность в зоне ведения работ.

Техническим результатом использования добычного комплекса с ВЗ является устранение указанных недостатков, а именно: обеспечение добычи железомарганцевых конкреций на значительных глубинах (до 5000 м), исключение замутненности в зоне добычи и повышение производительности установки. Технический результат использования комплекса с ВЗ можно получить, если транспортирующий орган выполнен в виде кабель-троса, а придонное добычное устройство включает приемный бункер в форме усеченного конуса, жестко связанного со стойкой, расположенной внутри центральной цапфы, нижняя часть которой шарнирно соединена с двумя Г-образными рычагами, на концах которых расположены вакуумные захваты железомарганцевых конкреций, а верхняя часть посредством гидравлических цилиндров шарнирно связана с вершинами Г-образных рычагов и снабжена зубчатым венцом, входящим в зацепление с двумя приводными шестернями, установленными на стойке, при этом стойка жестко связана с несущей частью кабель-троса.

Схема устройства для сбора тяжелых железомарганцевых конкреций приведена на рис.3. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций, или комплекс с ВЗ (рис.3, а) включает надводное плавсредство, кабель-трос, придонное добычное устройство. Кабель-трос связан с подъемной лебедкой, установленной на плавсредстве.

Придонное добычное устройство (рис.3, б) содержит центральную цапфу, внутри которой расположена стойка, жестко связанная с приемным бункером. Стойка выполнена с опорным буртиком, на который опирается цапфа. Для надежной фиксации бункера на поверхности морского дна конец стойки в виде острия внедряют в поверхность дна при опускании придонного добычного устройства.

Цапфа опирается на буртик стойки и подвижно связана с ней подшипниками для поворота к оси стойки. Нижняя часть центральной цапфы шарнирами соединена с двумя Г-образными рычагами, расположенными диаметрально относительно друг друга. Вершины Г-образных рычагов шарнирно соединены со штоками гидравлических цилиндров, закрепленных в верхней части цапфы.

На концах Г-образных рычагов закреплены вакуумные захваты железомарганцевых конкреций. В корпусе (рис.3, в) вакуумного захвата размещены электродвигатель в масляной ванне и насос.

Основание вакуумного захвата выполнено в виде сменной эластичной пластины, на поверхности которой равномерно распределены сквозные конусные отверстия (рис.3, г), размер которых зависит от диаметра добываемых железомарганцевых конкреций, получаемых на основании геологоразведочных изысканий донного пространства.

Между эластичной пластиной и корпусом находится зазор (рис.3, в), ширина которого выбирается в зависимости от эластичности пластины. Конусные отверстия снабжены обратными клапанами, запирающими отверстия при отсутствии в них конкреций.

Для поворота вакуумных захватов к оси стойки с целью изменения их положения вокруг приемного бункера, внутри центральной цапфы расположен механизм поворота с зубчатым венцом, входящим в зацепление с приводными шестернями на опоре, жестко закрепленной на стойке.

Гидроцилиндры при помощи сети патрубков соединены с приводной станцией, также установленной на опоре. Стойка соединена с несущим кабель-тросом, связанным с лебедкой плавсредства.

Предлагаемое устройство для сбора тяжелых железомарганцевых конкреций работает следующим образом. Придонное добычное устройство с плавсредства при помощи кабель-троса

опускают в придонную область. Опорой устройства на дне служит бункер, при этом острие стойки внедряется в поверхность морского дна и надежно фиксирует положение бункера. Г-образные рычаги с вакуумными захватами занимают верхнее (транспортное) положение (пунктир, рис.3, б). При подаче давления от приводной станции в поршневую зону гидроцилиндров выдвигаются штоки и Г-образные рычаги поворачиваются к центру шарниров до соприкосновения вакуумных захватов с поверхностью дна. Далее электродвигатели, получающие питание по кабель-тросу, включают насосы вакуумных захватов. Вода из конусных отверстий эластичной пластины по продольным зазорам откачивается насосом, в результате чего происходит разрежение по всей поверхности захвата в зоне конусных отверстий. Благодаря разрежению происходит захват и удержание железомарганцевых конкреций на поверхности эластичной пластины. При отсутствии конкреции в каком-либо из конусных отверстий обратный клапан остается закрытым.

После захвата конкреций вакуумными захватами гидроцилиндры поворачивают Г-образные рычаги с вакуумными захватами в удобное для разгрузки положение. Как только вакуумные захваты оказываются над поверхностью приемного бункера, отключают насосы и тяжелые железомарганцевые конкреции под действием собственного веса падают в приемный бункер. Далее включают поворотный механизм и поворачивают центральную цапфу вместе с закрепленными на ней Г-образными рычагами с вакуумными захватами и гидроцилиндрами на некоторый угол, соответствующий новому положению захватов.

Как только участок вокруг приемного бункера будет полностью обработан, а бункер полностью заполнен, с помощью кабель-троса придонное добычное устройство поднимают на надводное плавсредство.

Поднятые на плавсредство добытые железомарганцевые конкреции складываются в трюмах, а затем при помощи барж переправляются на берег для дальнейшей переработки.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет обеспечить добычу железомарганцевых конкреций на значительных глубинах (до 5000 м), повысить производительность установки за счет исключения многократных спускоподъемных операций, так как конкреции предварительно накапливаются в приемном бункере до полного его заполнения, при этом не нарушается рельеф морского дна при захвате конкреций, что исключает замутненность в зоне отработки залежей.

Исследование лабораторной модели придонного добычного устройства. Исследование модели придонного добычного устройства на основе устройства захвата с полостями разрежения (или вакуумные захваты – ВЗ) выполнялось на стенде (рис.4) [8-12]. Процесс захвата и удержания имитации ЖМК происходил с неплотным притягиванием объектов и постоянными перетеканиями воды.

Основная задача опыта – определение вероятности захвата ЖМК в зависимости от времени непосредственного с ними контакта устройства сбора. Вероятность захвата вычислялась из отношения числа захваченных объектов к общему числу максимально возможного захвата. Производительность насоса составляла 0,125 л/с. Результат опыта по захвату имитаций ЖМК представлен на рис.5.

Рис.4. Захват объектов имитации конкреций

Рис.5. Зависимость вероятности захвата имитации конкреций от времени контакта с устройством

1 – аппроксимирующая кривая; 2 – экспериментальные данные

Рис.6. Зависимость коэффициента перетекания от производительности насоса

Из графика видно, что с увеличением времени контакта захватывающего устройства с конкрециями возрастает вероятность их захвата, однако слишком длительное время контакта неизбежно приведет к снижению скорости перемещения придонного добычного устройства, и как следствие – к сокращению общей производительности добычного агрегата.

Исследование процесса захвата ЖМК отражено на графике зависимости коэффициента перетекания от производительности насоса при различном значении процентного использования рабочего пространства захватывающего устройства (рис.6). Стабильный захват и удержание конкреций наблюдаются при коэффициенте перетекания менее единицы. Из гра-

фика видно, что снижение коэффициента перетекания при увеличении производительности насоса и 100 %-ном использовании рабочего пространства захвата происходит с большей интенсивностью, чем в других случаях, что обеспечивает более устойчивый захват при одинаковом значении производительности. Кроме того, критическое значение производительности насоса, при котором происходит отрыв конкреций от устройства захвата при 100 %-ном использовании рабочего пространства, минимально.

Эффективная работоспособность ВЗ наблюдается при значении коэффициента перетекания $K_{пер} < 1$, а стабильное удержание захваченных конкреций при $K_{пер} = 0-0,55$ и при максимальном использовании рабочего пространства устройства захвата.

Заключение. На сегодняшний день остаются нерешенными следующие проблемы: до сих пор не совсем понятна технология переработки ЖМК и КМК для получения металлов; для разработки и создания опытных добычных глубоководных установок недостаточно времени (3-5 лет). Согласно международным требованиям, если не приступить к опытной добыче этих месторождений, то эти участки будут выставлены на аукцион и могут быть куплены другими странами; все устройства, которые работают в придонной зоне, должны проходить экологическую экспертизу в международной независимой организации. Однако разработанные на кафедре машиностроения Санкт-Петербургского горного университета и опробованные в лабораторных условиях устройства, выполняющие захват ЖМК с помощью пластин, в которых создается разрежение с последующей перегрузкой в емкости, позволяют утверждать, что такие устройства совместно с кевларовыми тросами и специальными судовыми установками дают оригинальное решение задачи опытно-промышленного сбора ЖМК в Мировом океане.

Благодарность. Статья написана по результатам работ, выполненных в рамках хоздоговоров между Санкт-Петербургским горным университетом, ООО «ГИКО» и «ВНИИО». Авторы выражают благодарность Г.В.Соколовой и А.В.Григорчуку за помощь в разработке конструкции вакуумных захватов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добрецов В.Б. Основные вопросы освоения минеральных ресурсов Мирового океана / В.Б.Добрецов, В.А.Рогалев / Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы. СПб, 2003. 524 с.
2. Патент № 2301338 РФ. Комплекс для разработки полезных ископаемых шельфовой зоны Мирового океана / Д.А.Юнгмейстер, Б.С.Маховиков, Д.В.Смирнов, А.Я.Бурак. Оpubл. 20.06.2007.

3. Патент № 2375578 РФ. Способ селективного отбора и предварительного обогащения железомарганцевых конкреций и устройство для его реализации / Д.А.Юнгмейстер, Д.В.Смирнов, А.В.Большунов, М.М.Ветлюков, М.Ю.Платовских, А.А.Смыслов, Н.Н.Гришкин. Опубл. 10.12.2009.
4. Расчет параметров и экспериментальные исследования исполнительных органов придонного агрегата для сбора железомарганцевых конкреций / Д.А.Юнгмейстер, М.М.Ветлюков, М.Ю.Платовских, Д.В.Смирнов // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 11. С. 53-56.
5. Смолдырев А.Е. Транспорт конкреций с морских глубин // Итоги науки и техники. 1986. Т. 33. С. 71-100.
6. Тимофеев И.П. Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 176 с.
7. Тимофеев И.П. Теоретические исследования параметров шагающего шасси с подвижным поплавком / И.П.Тимофеев, Н.К.Улащик // Записки Горного института. 1993. Т. 138. С. 3-8.
8. Юнгмейстер Д.А. Формирование комплексов горных машин на основе морфологического анализа / Санкт-Петербургский горный институт. СПб, 2002. 142 с.
9. Юнгмейстер Д.А. Привод транспортного органа агрегата для добычи железомарганцевых конкреций / Д.А.Юнгмейстер, Д.В.Смирнов // Записки Горного института. 2005. Т. 167(2). С. 99-101.
10. Юнгмейстер Д.А. Расчет параметров исполнительного органа агрегата для добычи конкреций морского дна / Д.А.Юнгмейстер, А.В.Большунов, Д.В.Смирнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 5. С. 89-94.
11. Юнгмейстер Д.А. Лабораторные исследования добычного исполнительного органа агрегата сбора железомарганцевых конкреций / Д.А.Юнгмейстер, А.В.Большунов, Д.В.Смирнов // Записки Горного института. 2008. Т. 178. С. 198-200.
12. Юнгмейстер Д.А. Комплекс для ведения добычи железомарганцевых конкреций со дна моря / Д.А.Юнгмейстер, Д.В.Смирнов // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 1. С. 49-50.
13. Yungmeister D. Development of the Construction and Characterization of Deep Complex for Collecting IMC / D.Yungmeister, K. Kireev // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences (RJPBCS). 2016. Vol. 7(2). P. 2086-2091.

Авторы: **Д.А.Юнгмейстер**, д-р техн. наук, профессор, iungmeister@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **С.М.Судариков**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, sergei_sudarikov@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **К.А.Киреев**, аспирант, iungmeister@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 06.05.2018.

Статья принята к публикации 09.06.2018.