УДК 622.23.037.008

Б.С.МАХОВИКОВ, В.В.ШОРНИКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ПОДВОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ МОРСКОГО ДНА

Рассмотрены перспективы освоения подводных месторождений железомарганцевых конкреций, описана конструкция подводного гидравлического добычного комплекса, приведен расчет конфигурации трассы и характеристик гибкого трубопровода, соединяющего добычной модуль с приемным судном. Рассчитана нагрузка на исполнительном органе добычной машины и описана конструкция проточной части приводной прямоточной многоступенчатой гидротурбины.

In the article the perspectives of the submarine fields of iron-manganese nodules mastering are considered, the design of the submarine hydraulic extracting complex is described, the calculations of the line configuration and the flexible tubing features that connect the extracting module and the loading vessel are given. The load on the working part of an extracting machine is calculated and the construction of the channel part of a driving uniflow multi-stage hydroturbine is described.

В связи с интенсивным развитием промышленности в мире в последнее время все более быстрыми темпами растет потребление минерального и химического сырья, в том числе энергоносителей, черных и цветных металлов и др. Увеличивающиеся темпы добычи полезных ископаемых привели к истощению запасов некоторых важнейших видов минерального сырья, что влечет за собой необходимость разработки месторождений более бедных руд, залегающих на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях. Между тем, результаты геологических исследований показывают, что на дне морей и океанов сосредоточены значительные запасы полезных ископаемых и по мере истощения минеральных ресурсов на суше подводные месторождения полезных ископаемых в ближайшей перспективе будут приобретать все большее промышленное значение. Такие месторождения представлены в основном морскими россыпями, которые располагаются преимущественно в шельфовой зоне на глубинах от 30-50 м и являются образованиями, возникающими в процессе формирования гравийно-песчаных осадков в прибрежной зоне моря, а также в ряде регионов океанского дна на глубинах до 4500 м. К наиболее перспективным с точки зрения объемов залегающего полезного ископаемого следует отнести, например, такие территории, как разрез Кларион-Клиппертон (Тихий океан) и Балтийское море.

Поскольку добыча полезных ископаемых, в частности железомарганцевых конкреций, с зоны шельфа имеющимися на данный момент средствами механизации в силу ряда причин невозможна или неэффективна, в Санкт-Петербургском горном институте на горно-электромеханическом факультете разрабатывается подводный добычной комплекс [3, 5, 6]. Такой комплекс выгодно отличается от существующих в нынешний момент добычных комплексов [7] возможностью вести разработки полезных ископаемых на больших глубинах.

Основным элементом комплекса является надводное плавсредство, в котором имеются условия для проживания и работы обслуживающего персонала, средства энергоснабжения и управления комплексом, площадки для размещения, монтажа и ремонта оборудования. Судно должно иметь танки для приема пульпы, устройства для отделения воды от твердой составляющей,

первичного обогащения и складирования добытого полезного ископаемого, а также средства для его перегрузки на другие суда с целью доставки к пункту потребления и окончательной переработки.

В состав глубоководного комплекса должна входить промежуточная, заглубленная под уровень поверхности моря капсула, с атмосферным давлением внутри, к которой присоединен гибкий шарнирный трубопровод положительной плавучести, состоящий из секций со сферическими шарнирами на концах, допускающими взаимный поворот секций до 15°.

Капсула обеспечивает напор в трубопроводе, достаточный для подъема в танк судна добытой со дна акватории горной массы в смеси с морской водой. Капсула должна быть погружена под воду так, чтобы обеспечивалась устойчивость трассы шарнирного трубопровода. Под устойчивостью трассы понимается способность сохранять кривизну в одной плоскости при незначительном волнении моря, когда верхняя ее часть погружена под уровень поверхности моря ($z_{\min} \geq 1$ м).

Положительная плавучесть гидроподъемного трубопровода достигается за счет присоединения к его поверхности распределенных по длине легких поплавков. Это требуется для исключения необходимости волочения трубопровода по дну при движении самоходной горной машины в процессе добычи полезного ископаемого, чем исключаются дополнительные силы трения, а также для снижения веса трубопровода и растягивающих его сил, что особенно важно при разработке месторождений полезных ископаемых, находящихся на больших глубинах. Кроме того, положительная плавучесть трубопровода снимает ограничения, связанные с большими глубинами добычи полезного ископаемого.

Конфигурация трассы такого гибкого трубопровода описывается уравнением перевернутой плоской цепной линии с точкой закрепления на капсуле с фиксированными отрицательными декартовыми координатами a_1 и b_1, которая имеет вид

$$z = C - \frac{k}{2}\left(e^{\frac{y+a_1}{k}} + e^{-\frac{y+a_1}{k}} \right),$$

где k – константа цепной линии; C – произвольная постоянная интегрирования уравнения цепной линии.

Задавшись значениями $y = a_1$, $z = b_1$ и k, определяем константу по формуле

$$C = b_1 + \frac{k}{2}\left(e^{\frac{a_1}{k}} + e^{-\frac{a_1}{k}} \right).$$

При известном значении C и принятом k для $z = H$, где H – глубина моря в месте производства горных работ, проверяем точность задания требуемой длины гибкого трубопровода согласно зависимости

$$s = 2k \operatorname{sh}\frac{a_1 - a_2}{2k} \operatorname{ch}\frac{a_1 + a_2}{2k}$$

и находим координату $y = a_2$. Затем можно определить координату y точки максимального подъема ($z_{\min}$) цепной линии под поверхностью моря, которая, как следует из анализа, располагается от точки подвеса трубопровода на расстоянии $y = a_1$.

Поскольку глубина моря в месте расположения месторождения может достигать нескольких километров [1], необходимо создать трубопровод, способный выдерживать большие давления, иногда достигающие значений 50 МПа. Для изготовления секций подобного гибкого трубопровода на основе известного опыта строительства подводных лодок необходимо использовать титан или титановые сплавы. Внутренний диаметр трубопровода должен быть больше $3d_э$, где $d_э$ – средний эквивалентный диаметр конкреций. Это обстоятельство будет, в основном, ограничивать производительность комплекса, а длина секции трубопровода не может превышать 12-20 м из условий допустимости ее транспортирования по железной дороге до порта на платформах.

Гибкий гидроподъемный трубопровод положительной плавучести может содержать на трассе промежуточный струйный насос, обеспечивающий попутное повышение напора пульпы, верхним концом присоединенный к капсуле, внутри которой располагаются замыкающие нагнетательный

струйный насос или землесос, подающие пульпу в жесткую вертикальную трубу для перекачивания ее в танк судна. К нижнему концу гибкого трубопровода, заканчивающемуся на входе всасывающим соплом овальной формы, присоединяется самоходная горная машина, включающая в себя исполнительный орган барабанного типа [2] и гусеничную ходовую часть с объемным гидроприводом. Барабанный исполнительный орган машины движется по донной поверхности с пробуксовкой за счет рассогласования скоростей вращения барабана и поступательного движения гусеничной тележки. Таким образом осуществляется процесс отделения конкреций от донной поверхности и отбрасывание их на вход овального сопла для смешивания с водой и подачи в виде пульпы в гибкий гидроподъемный трубопровод. Сила давления машины на донный грунт регулируется в зависимости от его прочности подкачкой сжатого воздуха в подвешенные к его борту поплавки.

Момент резания на барабане исполнительного органа при установившемся движении определяется по формуле

$$M_{\text{р}} = \frac{\pi V}{m\omega} q_{\text{р}} Rbi \sin\theta_0,$$

где $q_{\text{р}}$ – сопротивление грунта резанию; i – число резцов, одновременно участвующих в резании; m – число резцов в линии резания; R – радиус барабана; θ_0 – угловая координата точки входа резца в контакт с породой; V – скорость подачи барабана; ω – угловая скорость барабана; b – ширина резца, принимаемая равной $5d_{\text{э}}$.

Исполнительный орган барабанного типа содержит в себе встроенную многоступенчатую прямоточную гидротурбину, конструкция которой подобна турбинам турбобуров. Турбина обеспечивает его вращение за счет использования морской воды в качестве рабочего тела. Она питается из акватории, где давление γH (γ – удельный вес воды) многократно превышает рабочий напор турбины. Для обеспечения требуемых условий работы турбины отработавшую воду необходимо сбрасывать на слив через смеситель в гибкий трубопровод, за счет чего можно снизить рабочий напор на гидротурбине.

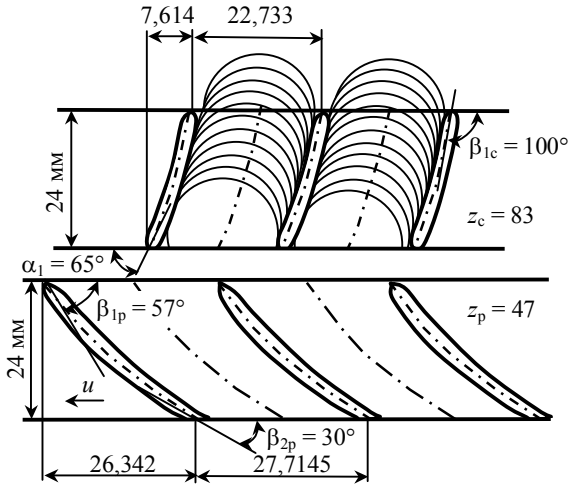
В трубопроводе давление меньше чем за его пределами за счет потерь на трение, интенсивность которых определяется концентрацией пульпы и скоростью ее движения, причем давление в трубе уменьшается с высотой, как это видно из пьезометрической линии потока в гибком гидроподъемном трубопроводе. Высота установки смесителя определяется расчетом и может регулироваться в зависимости от требуемой для исполнительного органа мощности специальным устройством.

Подобная система энергоснабжения позволяет использовать практически неограниченную потенциальную энергию моря для обеспечения работы комплекса без использования дополнительных источников энергии, что экономически выгодно.

В связи с тем, что гидротурбина имеет мягкую механическую характеристику, а объемный гидропривод гусеничного хода может иметь жесткую характеристику, при условии, что его насос приводится в движение асинхронным двигателем специального исполнения, а для его привода используется часть мощности гидротурбины, для обеспечения устойчивой работы исполнительного органа должно быть соблюдено условие $v / \omega = \text{const}$.

В прямоточных многоступенчатых гидротурбинах с одинаковыми конструкциями ступеней перепады напоров и утечки в каждой из них равны между собой. При этом ротор турбины жестко связан с вращающимся барабаном, а статор закреплен на ее оси и в процессе работы машины остается неподвижным. Рабочий процесс такой гидротурбины нами достаточно глубоко исследован [4], разработана компьютерная программа для определения ее механической характеристики и найдены геометрические параметры решетки лопастей статора и ротора.

Проточная часть ступени гидротурбины, обеспечивающая плавный разворот потока из статора (*а*) в ротор (*б*), представлена на рисунке. Подобное устройство гидротурбины позволяет получать высокие значения



Проточная часть прямоточной турбины

ее объемного и гидравлического КПД при следующих параметрах решеток лопастей на входе и выходе: статора $\beta_{1c} = 90°$, $\beta_{2c} = 118°$и ротора $\beta_{1p} = 42°$, $\beta_{2p} = 27°$. При этом очевидно, что перепады напоров и утечки в каждой из ступеней равны между собой. Таким образом, объемный КПД многоступенчатой гидротурбины не зависит от числа ступеней, а гидравлический КПД в связи с уменьшением доли напора потока, выходящего из турбины на слив, растет до определенных пределов. Полный КПД гидротурбины с ростом числа ее ступеней возрастает. При этом полная мощность каждой из ступеней, зависящая от величины среднего диаметра турбины, для ограничений которого в морском комплексе оснований нет, может достигать больших значений, достаточных для получения требуемой производительности подводной добычной машины и комплекса в целом при ограниченном числе ступеней.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Глубина разработки подводных месторождений твердых полезных ископаемых при использовании гидромеханических комплексов предлагаемой конструкции практически не имеет ограничений.

2. Для подъема полезного ископаемого в смеси с морской водой целесообразно использовать многосекционный шарнирный трубопровод положительной плавучести предлагаемой конструкции. При этом затраты энергии на гидроподъем полезного ископаемого частично покрываются за счет использования потенциальной энергии моря, а с ростом глубины разработки, из соображений прочности, диаметр трубопровода приходится уменьшать, с чем и связаны ограничения производительности комплекса.

3. Добыча конкреций с поверхности морского дна осуществляется горной машиной на гусеничном ходу с барабанным исполнительным органом, обеспечивающим рыхление грунта, захват твердых полезных ископаемых в смеси с морской водой и подачу их в шарнирный трубопровод для подъема в танк судна.

4. Для привода в работу исполнительного органа горной машины предлагается использовать прямоточную многоступенчатую гидротурбину специальной конструкции, питающуюся из окружающей водной среды с отбором части напора за счет сброса отработавшей воды в гидроподъемный трубопровод.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кругляков В.В.* Геоморфология и современные геологические процессы в рудной провинции Кларион-Клиппертон (Тихий океан) // Морские инженерно-геологические исследования / ВНИИОкеангеология. СПб, 2003.

2. *Маховиков Б.С.* Анализ работы исполнительного органа для добычи конкреций на шельфе / Технология и механизация горных работ: Сб. научных трудов. М.: Изд-во АГН, 1998.

3. *Маховиков Б.С.* Горнодобывающий комплекс для морской разработки твердых полезных ископаемых / Б.С.Маховиков, М.Л.Кабанов // Горные машины и автоматика. 2003. № 5.

4. *Маховиков Б.*С. Определение конструктивных параметров проточной части осевой гидротурбины для привода подводной добычной машины // Изв. вузов. Горный журнал. 2001. № 2.

5. Патент № 2157438 РФ. Гибкий погружной пульпопровод / В.В.Шорников, В.Э.Шмидт, Б.С.Маховиков и др. // Изобретения. 2000. № 28.

6. Патент № 2203421 РФ. Установка для добычи полезных ископаемых со дна акватории / Б.С.Маховиков, А.Б.Незаметдинов, В.В.Шорников, А.В.Шалыгин // Изобретения. 2003. № 12

7. *Потемкин С.В.* Разработка россыпных месторождений. М.: Недра, 1995.