УДК 622.23.037.008

Б.С.МАХОВИКОВ
Горно-электромеханический факультет,
профессор кафедры рудничных стационарных установок
М.Л.КАБАНОВ
Горно-электромеханический факультет,
аспирант кафедры рудничных стационарных установок

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБКОГО ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ ПОДЬЕМА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С ПОВЕРХНОСТИ МОРСКОГО ДНА

Представлена математическая модель, описывающая конфигурацию трасс гибкого трубопровода для гидравлического добычного комплекса, обеспечивающего подъем с поверхности морского дна железомарганцевых и других конкреций, а также полиметаллических песков, илов и дробленых корковых образований. Трубопровод связывает подводную добычную машину с пульпоприемником на базовом судне. Предложенная модель основана на уравнении цепной линии и описывает конфигурацию трасс гибкого, шарнирно сочлененного трубопровода в широком диапазоне расстояний между базовым судном и добычной машиной. Впервые путем аналитического решения по данным значений координат построены возможные варианты цепной линии, определяющей предельные границы расположения гибкого трубопровода положительной плавучести. На основании полученных результатов определены особенности механики поведения гибкого трубопровода положительной плавучести под собственной нагрузкой.

On the preliminary estimate useful fossilized from the seabed can form up to 70 percent of general mining output of useful fossilized in Russia. One of the most priori directions in this area is mining from the seabed polymetallic sands and silts.

This article introduces the mathematical model of routes configuration for positive floatability delivery pipeline which is used for the lifting of minerals from the surface of the sea bottom and connects submarine mining machine and pulp receiver on the main ship. The offered model is based on the equation of chainomatic line and describes the routes configuration for flexible, link connected pipeline in wide range of distances between main ship and mining machine.

Transporting useful fossilized from the bottom in the locked pipeline excludes a soiling of water area that ensures the whole complex being high ecology.

В связи с истощением запасов полезных ископаемых, которое для нашей страны стало особенно заметно с развалом Советского Союза, когда многие месторождения оказались вне пределов России, особенно актуальным представляется поиск новых месторождений, разработка которых поможет решить проблему дефицита легирующих элементов, которые сейчас поступают из-за рубежа. Например, важнейший из легирующих элементов марганец, крупных месторождений которого Россия не имеет, покупается за границей. И это в то время, когда на расстоянии нескольких сотен километров от Санкт-Петербурга находятся огромные, большею частью разведанные месторождения, запасов которых при современных объемах потребления марганца в нашей стране хватит на 50 лет. Речь идет о железомарганцевых конкрециях (ЖМК), лежащих в Балтийском море на глубине, не превышающей 100 м. По имеющимся данным, с 1 м^2 дна можно получить до 30 кг железомарганцевых конкреций.

Конкреции по своим физическим свойствам сильно отличаются от всех освоенных

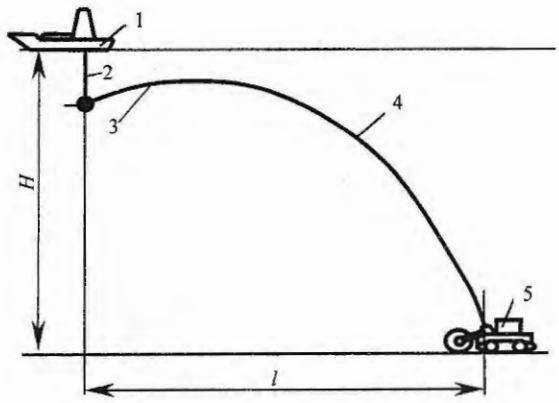


Рис.1. Схема подводного добычного комплекса

промышленностью типов руд. Железомарганцевые конкреции имеют небольшой удельный вес (средний 2,4 г/см^3, редко до 5,3 г/см^3), высокую пористость, хрупки и легко дробятся. Размеры конкреций варьируют от долей миллиметра до десятков сантиметров. Преобладающий размер ЖМК Балтийского моря 1-16 мм. В среднем ЖМК содержат 33,8 % MnO_2, 20,19 % Fe_2O_3, концентрация Cu, Mo, Co и др. редко превышает фоновые значения в 2-3 раза [1]. Следовательно, добыча железомарганцевых конкреций позволит нашей стране не зависеть от иностранных поставщиков.

Предложенный комплекс для добычи конкреций с поверхности морского дна (рис.1) включает надводное судно или субмарину, самоходную подводную горную машину на гусеничном ходу с подвешенным перед ним исполнительным органом барабанного типа, устройство для направленной подачи в гибкий гидроподъемный трубопровод твердых частиц в смеси с морской водой и трубопровод, подающий пульпу в судовые контейнеры [2].

При движении машины 5 трасса гибкого трубопровода 4 непрерывно изменяет свой вид. Исследования пьезометрических линий потока вдоль трассы трубопровода [4] показали, что гибкий трубопровод целесообразно присоединять к судну 1 через опущенную в воду мачту 2, на конце которой установлена капсула 3 с землесосом, причем расстояние между высшей точкой гибкого трубопровода и поверхностью должно всегда быть больше нуля. Электродвигатель землесоса служит элементом, через который к комплексу подводится внешняя энергия от палубной электростанции базового судна, и является устройством, при помощи которого осуществляется внешнее управление комплексом [3].

Предполагается, что важным параметром, определяющим сопротивление движению пульпы в трубопроводе, является вид его трассы. Допустим, что задачу о форме трассы трубопровода со степенью точности, достаточной для расчетов, можно свести к задаче, решаемой с помощью математической цепной линии. Исходные данные для решения задачи следующие: глубина моря в районе горных работ H, горизонтальное расстояние между точками подвеса l, длина гибкой нити S и плотность нити ρ. При этом должно соблюдаться условие $S^2 > h^2 + l^2$.

Рассмотрим алгоритм решения задачи. Вычислив постоянную интегрирования

$$C = \sqrt{S^2 - h^2}\,/\,l, \qquad (1)$$

из уравнения цепной линии находим численными методами параметр $\xi = l/2k$ (здесь k – константа цепной линии):

$$\mathrm{sh}\,\xi / \xi = C. \qquad (2)$$

Для уравнения цепной линии в системе декартовых координат xOy

$$y = \frac{k}{2}(e^{\frac{x}{k}} + e^{-\frac{x}{k}}) = k\,\mathrm{ch}\,\frac{x}{k},$$

где $k = l/2\xi$.

Горизонтальная составляющая усилия в цепи $T_0 = k\rho g$, где g – ускорение свободного падения.

Обозначим T_a и T_b – вертикальные реакции на опорах. Для расчета этих величин необходимо знать местоположение начала координат цепной линии (рис.2). Из геометрических соотношений имеем

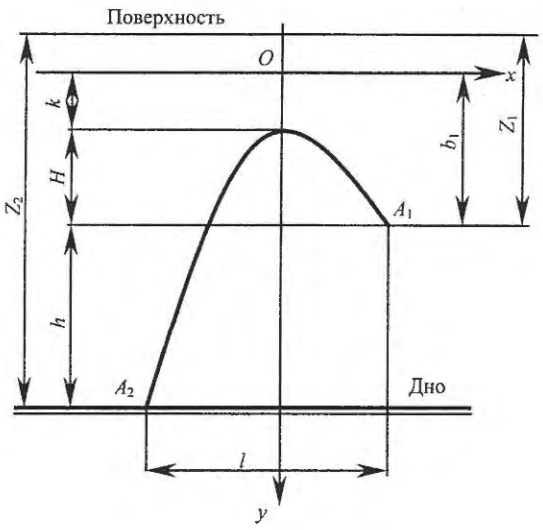


Рис.2. Условные обозначения, используемые в математической модели

$$l = a_2 - a_1, \quad h = b_2 - b_1 , \qquad (3)$$

где a_1, b_1 и a_2, b_2 – координаты точек A_1 и A_2 соответственно.

Согласно уравнениям (1) и (2) координаты точек A_1 и A_2 соответственно

$$y_1 = \frac{k}{2}\left(e^{\frac{a_1}{k}} + e^{-\frac{a_1}{k}}\right),$$

$$y_2 = \frac{k}{2}\left(e^{\frac{l+a_1}{k}} + e^{-\frac{l+a_1}{k}}\right). \qquad (4)$$

Решив совместно уравнения (3) и (4), получим

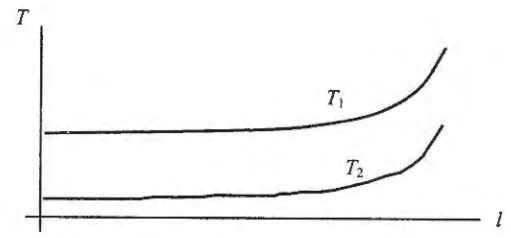


Рис.3. Зависимость натяжения трубопровода T в точках его крепления от расстояния l между этими точками

$$\frac{k}{2}\left(e^{\frac{l+a_1}{k}} + e^{-\frac{l+a_1}{k}}\right) - \frac{k}{2}\left(e^{\frac{a_1}{k}} + e^{-\frac{a_1}{k}}\right) = h$$

или

$$e^{\frac{l+a_1}{k}} + e^{-\frac{l+a_1}{k}} - e^{\frac{a_1}{k}} - e^{-\frac{a_1}{k}} = 2\frac{h}{k},$$

откуда по известным l, h, и k находим методом итераций a_1, а затем a_2 и y_1. Вычислив производные y', а также углы α кривой с осью x в точках A_1 и A_2

$$tg\alpha_1 = y_1' = \frac{1}{2}\left(e^{\frac{a_1}{k}} + e^{-\frac{a_1}{k}}\right);$$

$$tg\alpha_2 = y_2' = \frac{1}{2}\left(e^{\frac{a_2}{k}} + e^{-\frac{a_2}{k}}\right),$$

рассчитаем вертикальные составляющие реакций на опорах A_1 и A_2: $T_1 = T_0 tg\alpha_1$; $T_2 = T_0 tg\alpha_2$.

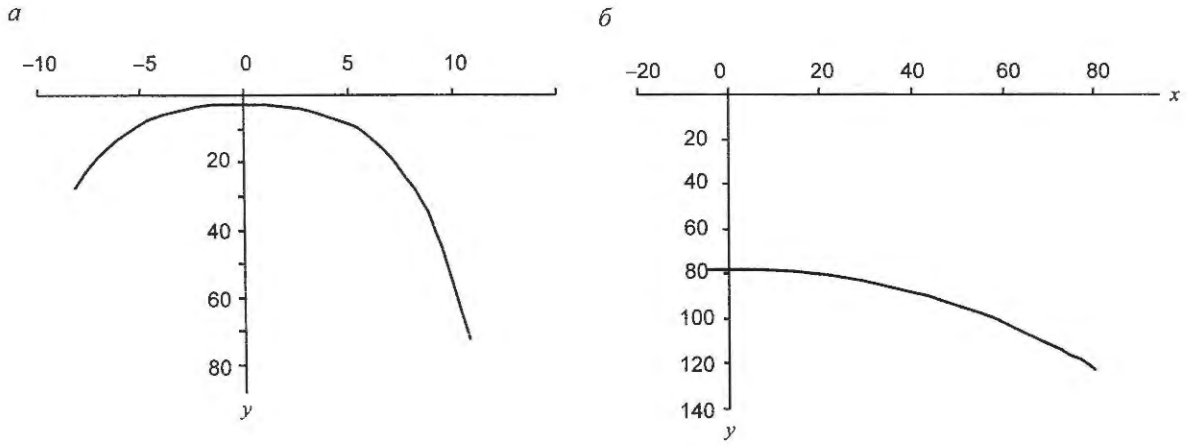


Рис.4. Вид цепной линии при S = 100 м, Z_1 = 25 м, Z_2 = 70 м и l = 18 м (*а*) и l = 85 м (*б*)

Рассмотрим случай, когда расстояние l между точками подвеса настолько велико, что цепь становится прямой линией. Тогда в соответствии с формулой (1)

$$C = \sqrt{l^2}\,/\,l = 1.$$

Из уравнения (2) при $C = 1$ получим $\xi = 0$, откуда $k = l/2\xi \to \infty$, и следовательно, $T_0 \to \infty$. Таким образом, для выпрямления цепи под нагрузкой ее нужно растягивать теоретически бесконечно большей силой. На практике это означает, что при достижении добычной машиной некоторой точки, напряжения в точках крепления превысят предел прочности материала, из которого изготовлены шарниры, и трубопровод будет поврежден (рис.3). Вид цепной линии представлен на рис.4. Укажем, что неконсервативные силы не учитывались.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Добрецов В.Б.* Технология добычи железомарганцевых конкреций Балтийского моря с помощью вертикального эрлифтного подъема / В.Б.Добрецов, А.А.Кулешов, В.С.Евдокименко // Горный журнал. 2001. № 8.

2. *Маховиков Б.С.* Технология подводной разработки россыпей на шельфе и в глубоководных районах морской акватории России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 2.

3. *Маховиков Б.С.* Расчет энергозатрат при работе морского горно-технологического комплекса // Горный журнал. 2001. № 8.

4. *Смирнов В.И.* Курс высшей математики. М.: Наука, 1956.