Записки Санкт-Петербургского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т. 138. СПб, 1993

УДК 622.271.5

И.П.ТИМОФЕЕВ, Н.К.УЛАЩИК

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШАГАЮЩЕГО ШАССИ С ПОДВИЖНЫМ ПОПЛАВКОМ

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 геолого-разведочные рабочие органы в виде всасывающих наконечников, рыхлителей, ковшей, подборщиков, отвалов, грунтовых насосов, эрлифтных головок, зондов, крыльчаток, штампов и др.

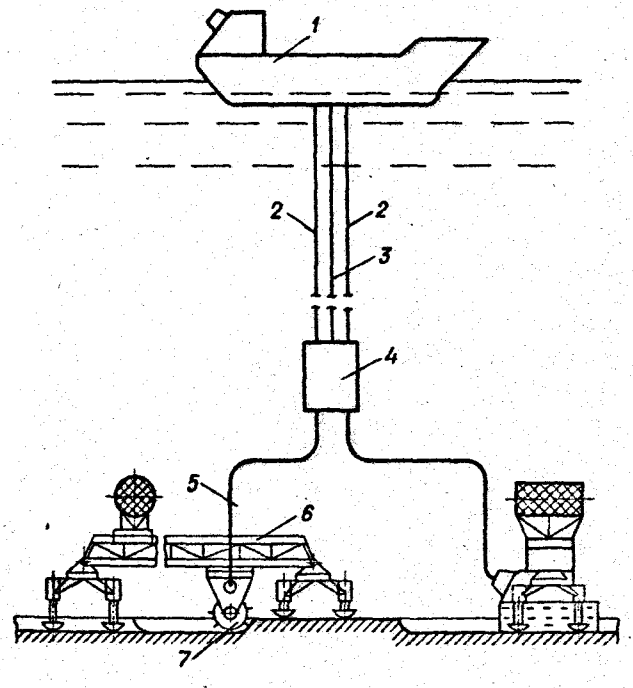


Рис.1. Добычной комплекс
1 - судно обеспечения; 2 - пульповод; 3 - трос; 4 - приемный бункер; 5 - гибкий пульповод; 6 - шагающая машина; 7 - рабочий орган

В качестве средств передвижения по дну могут быть использованы движители гусеничного, колесного, шнекового, шагающего и других типов [1,2]. Однако условия эксплуатации, характеризующиеся бездорожьем, низкой несущей способностью грунтов, пересеченностью местности, возможным наличием преград, практически делают непригодными или малоэффективными перечисленные движители. Названным условиям эксплуатации на морском дне в большей степени удовлетворяет шагающий движитель, который может просто перешагнуть или обойти преграду, оставляя дискретную колею (рис.1).

Шагающие машины хорошо вписываются в подводную технологию добычных и гео-

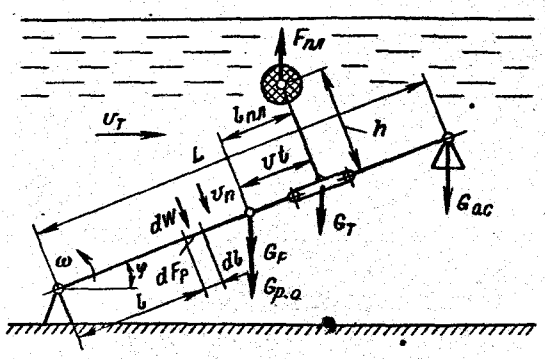


Рис.2. Расчетная схема шагающего шасси
L – длина рамы между опорами; $l_{пл}$ – смещение поплавка; h – высота кронштейна поплавка; φ – угол зависания; $F_{пл}$ – подъемная сила поплавка; $G_{р.о}, G_т, G_{о.с}$ и $G_р$ – силы тяжести в воде рабочего органа, тяжести поплавка, опорного стола и несущей рамы соответственно; $v_т$ – скорость придонного сечения; vt – путь, пройденный поплавком; W – сопротивление движению при повороте рамы; l – расстояние до элементарного участка dl; $F_р$ – площадь поперечного сечения несущей рамы

лого-разведочных работ, пересеченный рельеф, способны работать в условиях бездорожья и при низкой несущей способности грунтов и малой их сцепляемости [3].

Режимы перемещения шагающей машины обеспечиваются изменением положения центра масс системы поплавком, создающим попеременно избыточный момент относительно одной из опор и обеспечивающим зависание рамы на необходимом угле поворота в вертикальной плоскости при движении поплавка вдоль шасси.

Рассмотрим расчетную схему (рис.2). Запишем уравнение статики при условии равенства нулю одной из реакций опорного стола на морское дно:

$$F_{пл}(0,5L + l_{пл}) = 0,5 q g L (L + 2l_к) + G_{о.с} L + G_т (0,5L + l_{пл}) + G_{р.о} 0,5L, \quad (I)$$

где q – линейная масса несущей рамы; g – ускорение свободного падения; $l_к$ – длина консолей.

Введя следующие обозначения: $G_б = G_{о.с} = G_т = G_{р.о}$; $l_к / L = \alpha_к$; $l_{пл} / L =$ $h/L = \Psi_h$, получим в безразмерных величинах уравнение для удельной подъемной силы, приходящейся на единицу длины рамы:

$$f_{пл} = \left(\frac{1 + 2\alpha_к}{1 + 2\lambda_{пл}} + \frac{2 + \lambda_{пл}}{0,5 + \lambda_{пл}} \delta_б \right) q g,$$

где $\alpha_к$ – коэффициент длины консоли, при $\alpha_к = 0$ консоль отсутствует; $\lambda_{пл}$ – относительное смещение поплавка от центра масс машины влево или вправо, при $\alpha_к = I$ $0 > \lambda_{пл} > I,5$; $\delta_б$ – относительная сила тяжести вспомогательного оборудования на машине; Ψ_h – относительное превышение поплавка над центром масс машины.

Кривые изменения удельной подъемной силы поплавка в зависимости от его смещения (рис.3) показывают, что при наличии консолей удельная подъемная сила возрастает с 75 Н/м при $\alpha_к = 0$ до I25 Н/м при $\alpha_к = 0,5$. Консоли не приводят к снижению подъемной силы поплавка.

Установка поплавка на кронштейне высотой h относительно центра масс машины обеспечивает зависание несущей рамы на угле φ в результате уменьшения плеча момента подъемной силы $F_{пл}$ на величину $h \sin \varphi$.

Угол зависания в статике определяется из выражения

$$tg\varphi = \frac{0,5+\lambda_{пл}}{\Psi_k} - \frac{0,5\,q_g\left[(1+2\alpha_к)+2\delta_б(2+\lambda_{пл})\right]}{f_{пл}\,\Psi_k}.$$

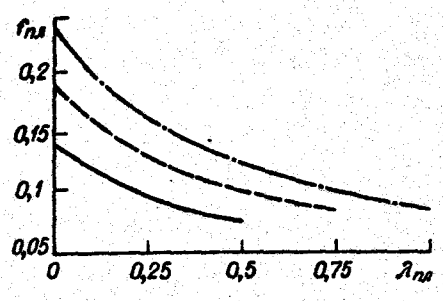


Рис.3. Зависимость удельной подъемной силы поплавка от его смещения 1 - $\alpha_к = 0$, $\lambda_{пл} \leq 0,5$; 2 - $\alpha_к = 0,25$, $\lambda_{пл} \leq 0,75$; 3 - $\alpha_к = 0,5$, $\lambda_{пл} \leq 1,0$ (для всех случаев $q = 0,1$, удельная сила тяжести вспомогательного оборудования $g_б = 0,01$)

Для условий $\alpha_к = 0$, $\delta_б = 0,1$, $\Psi_k = 0,25$ или $\Psi_k = 0,5$ углы зависания составляют 10-20°, что приемлемо для любой длины несущей рамы. Углы зависания рационально регулировать смещением поплавка вдоль несущей рамы.

Изменение угла зависания φ, угловой скорости $\dot{\varphi}$ и углового ускорения $\ddot{\varphi}$ во времени описывается уравнением Лагранжа, для решения которого были определены кинетическая энергия системы, обобщенная сила и силы сопротивления воды с учетом придонного течения.

Кинетическая энергия при повороте несущей рамы в вертикальной плоскости складывается из суммы кинетических энергий собственно рамы, рабочего органа, тележки и поплавка с учетом присоединенной массы воды:

$$T = \frac{\omega^2}{2}\left(a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4\right),$$

где ω - угловая скорость поворота несущей рамы;

$$a = J_р + \Delta J_р + (m_{р.о} + \Delta m_{р.о})(0,5L)^2 + (m_{о.с} + \Delta m_{о.с})L^2 + \Sigma m(0,25L^2 + Ll_{пл} + l_{пл}^2);$$

$J_р$ - момент инерции рамы при повороте относительно одной из опор; $\Delta J_р$ - присоединенный момент инерции воды при повороте рамы; $m_{р.о}$ - масса рабочего органа; $\Delta m_{р.о}$ - присоединенная масса воды к рабочему органу; $m_{о.с}$ - масса опорного стола; $\Delta m_{о.с}$ - присоединенная масса воды к опорному стану; $\Sigma m = m_{пл} + m_т + \Delta m_{пл} + \Delta m_т$; $m_{пл}$ и $m_т$ - массы поплавка и тележки; $\Delta m_{пл}$ и $\Delta m_т$ - присоединенные массы воды к поплавку и тележке соответственно;

$$b = \Sigma m(L + 2l_{пл})v_0; \quad c = \Sigma m(v_0^2 - l_{пл}\alpha_0 - 0,5\alpha_0 L);$$

$$d = -\Sigma m v_0 \alpha_0; \quad e = 0,25\Sigma m \alpha_0^2;$$

v_0 - скорость движения поплавка вдоль несущей рамы; α_0 - ускорение замедления поплавка при его остановке после состояния равновесия, т.е. равенства нулю одной из реакций опоры на дно.

Частная производная по угловой скорости и времени

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = \ddot{\varphi}\left(a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4\right) + \dot{\varphi}\left(b + 2ct + 3dt^2 + 4et^3\right).$$

Обобщенная сила для системы представлена как избыточный момент по
емной силы поплавка, преодолевающей сопротивление воды и составляющую
придонного течения:

$$Q_\varphi = M_{пл} - M_{WT} \ ,$$

где $M_{пл}$ – избыточный момент подъемной силы поплавка после момента ура
новешивания при условии равенства нулю одной из реакций опоры на дно,

$$M_{пл} = rt\cos\varphi + st^2\cos\varphi + j\sin\varphi\cos\varphi \ ;$$

$$r = V_{пл}\, g\left(\rho_в - \rho_{пл}\right) v_o - \left(G_т - F_A\right) v_o \ ;$$

$$s = 0{,}5\left(G_{тл} - F_A\right)\alpha_o - 0{,}5\, V_{пл}\,\alpha_o\, g\left(\rho_в - \rho_{пл}\right) ;$$

$$j = -V_{пл}\, g\left(\rho_в - \rho_{пл}\right) h \ ;$$

$V_{пл}$ – объем поплавка; $\rho_в$ и $\rho_{пл}$ – плотность воды и материала поплавка;
F_A – сила Архимеда для тележки; M_{WT} – момент сил сопротивления воды
составляющей придонного течения различных узлов машины.

С учетом всех составляющих обобщенная сила

$$Q_\varphi = \dot\varphi^2\left[K_{WT_1} + \left(K_{т_2} + K_{пл_2}\right)t + \left(K_{т_3} + K_{пл_3}\right)t^2 + K_{т_4}t^3 + K_{т_5}t^4 + K_{т_6}t^5 + K_{т_7}t^6\right] +$$

$$+ \dot\varphi\sin\varphi\left[K_{WT_2} + \left(K_{т_9} + K_{пл_5}\right)t + \left(K_{т_{10}} + K_{пл_6}\right)t^2 + K_{т_{11}}t^4\right] + \sin^2\varphi\left(K_{WT_3} + K\right.$$

$$\left. + K_{т_{14}}t^2\right) + \sin^2\varphi\left(K_{пл_7} + K_{пл_8}t + K_{пл_9}t^2\right) + K_{пл_{10}}\cos^2\varphi \ .$$

Здесь

$$K_{WT_1} = K_{p_1} + K_{p.o_1} + K_{o.c_1} + K_{т_1} + K_{пл_1} \ ;$$

$$K_{WT_2} = K_{p_2} + K_{p.o_2} + K_{o.c_2} + K_{т_8} + K_{пл_4} \ ;$$

$$K_{WT_3} = K_{p_3} + K_{p.o_3} + K_{o.c_3} + K_{т_{12}} \ ;$$

где K_{p_i} – коэффициенты, зависящие от конструктивных факторов рам
скорости течения,

$$K_{p_1} = \rho_в\, C_{W_p} D L^4/8 \ ;$$

$$K_{p_2} = \rho_в\, C_{W_p} D\, v_т L^3/3 \ ;$$

$$K_{p_3} = \rho_в\, C_{W_p} D\, v_т^2 L^2/4 \ .$$

$K_{p.o_i}$ – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров рабочег
гана и придонного течения,

$$K_{p.o_1} = 0{,}0625\ \rho_в\, C_{W_{p.o}}\, S_{p.o}\, L^3 \ ;$$

$$K_{p.o_2} = 0{,}25\ \rho_в\, C_{W_{p.o}}\, S_{p.o}\, L^2 v_т \ ;$$

$$K_{p.o_3} = 0{,}25\ \rho_в\, C_{W_{p.o}}\, S_{p.o}\, L\, v_т^2 \ ;$$

$K_{o.c_i}$ – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров опорног
стола и придонного течения,

$$K_{o.c_1} = 0{,}5\,\rho_в\, C_{W_{o.c}}\, S_{o.c}\, L^3 \ ;$$

$$K_{o.c_2} = \rho_в\, C_{W_{o.c}}\, S_{o.c}\, L^2 v_т \ ;$$

$$K_{в.с_3} = \rho_в C_{W_{в.с}} S_{в.с} L v_1^2;$$

$K_{т_i}$ – коэффициенты, зависящие от конструктивных и кинематических параметров тележки и придонного течения,

$$K_{т_1} = 0,5 \rho_в C_{W_т} S_т (0,5L + l_{пл})^3;$$
$$K_{т_2} = 1,5 \rho_в C_{W_т} S_т (0,5L + l_{пл})^2 v_0;$$
$$K_{т_3} = 0,5 \rho_в C_{W_т} S_т (0,5L + l_{пл})(v_0 - 1,25 \alpha_0 L - 1,5 \alpha_0 l_{пл} + 2 v_0^2);$$
$$K_{т_4} = \rho_в C_{W_т} (0,5L + l_{пл})(v_0 - L\alpha_0 - l_{пл}\alpha_0)\ \alpha_0 v_0^2;$$
$$K_{т_5} = 0,0625 \rho_в C_{W_т} S_т (0,5L + l_{пл})(v_0 - L\alpha_0 - l_{пл}\alpha_0)\alpha_0^4 v_0^2;$$
$$K_{т_6} = 0,375 \rho_в C_{W_т} S_т \alpha_0^2 v_0;$$
$$K_{т_7} = -0,0625 \rho_в C_{W_т} S_т \alpha_0^3;$$
$$K_{т_8} = \rho_в C_{W_т} S_т (0,5L + l_{пл}) v_т;$$
$$K_{т_9} = 2 \rho_в C_{W_т} S_т (0,5L + l_{пл}) v_0 v_т;$$
$$K_{т_{10}} = \rho_в C_{W_т} S_т v_0^2 v_т;$$
$$K_{т_{11}} = 0,25 \rho_в C_{W_т} S_т \alpha_0^2 v_т;$$
$$K_{т_{12}} = 0,5 \rho_в C_{W_т} S_т (0,5L + l_{пл}) v_т;$$
$$K_{т_{13}} = 0,5 \rho_в C_{W_т} S_т v_0 v_т;$$
$$K_{т_{14}} = 0,25 \rho_в C_{W_т} S_т v_т^2 \alpha_0;$$

$K_{пл_i}$ – коэффициенты, зависящие от конструктивных факторов превышения поплавка и придонного течения,

$$K_{пл_1} = 0,5 \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} (0,5L + l_{пл}) R^2;$$
$$K_{пл_2} = 0,5 \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} v_0 R^2;$$
$$K_{пл_3} = -0,25 \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} \alpha_0 R^2;$$
$$K_{пл_4} = \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} (0,5L + l_{пл}) R v_т;$$
$$K_{пл_5} = \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} R v_т v_0;$$
$$K_{пл_6} = -0,5 \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} R \alpha_0 v_т;$$
$$K_{пл_7} = 0,5 \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} (0,5L + l_{пл}) v_т^2;$$
$$K_{пл_8} = 0,5 \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} v_т^2 v_0;$$
$$K_{пл_9} = -0,25 \rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} \alpha_0 v_т^2;$$

$$K_{пл_{10}} = 0{,}5\rho_в C_{W_{пл}} S_{пл} v_т^2 h ;$$

R – радиус поворота поплавка относительно одной из опор,

$$R = \sqrt{(0{,}5L + l_{пл} + v_0 t - 0{,}5 a_0 t^2)^2 + h^2};$$

C_W – коэффициент сопротивления движению в воде соответствующего узла машины; S – площадь миделева сечения соответствующего узла машины; D – площадь миделева сечения несущей рамы.

Уравнение движения машины с подвижным поплавком в воде с учетом течения при замедленном движении тележки после уравновешивания поплавком одной стороны машины имеет вид

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4}\Big\{(rt + st^2 + j\sin\varphi)\cos\varphi - \dot{\varphi}(b + 2ct + 3dt^2 + 4et^3) -$$

$$- \dot{\varphi}^2\left[K_{WT_1} + (K_{T_2} + K_{пл_2})t + (K_{T_3} + K_{пл_3})t^2 + K_{T_4}t^3 + K_{T_5}t^4 + K_{T_6}t^5 + K_{T_7}t^6\right] -$$

$$- \dot{\varphi}\sin\varphi\left[K_{WT_2} + (K_{T_9} + K_{пл_5})t + (K_{T_{10}} + K_{пл_6})t^2 + K_{T_{11}}t^4\right] - \sin^2\varphi\left(K_{WT_3} + K_{T_{13}}t +\right.$$

$$\left. + K_{T_{14}}t^2\right) - \sin^2\varphi\left(K_{пл_7} + K_{пл_8}t + K_{пл_9}t^2\right) - \cos^2\varphi\, K_{пл_{10}}\Big\}. \qquad (3)$$

Уравнение (3) решено на ЭВМ. Получены зависимости изменения угла поворота, угловой скорости и углового ускорения во времени. Для практического использования результатов решения уравнения (3) построены графики изменения диаметра сферического поплавка от длины несущей рамы шагающей машины при смещении поплавка на $0{,}25L$ и $0{,}5L$ (рис.4).

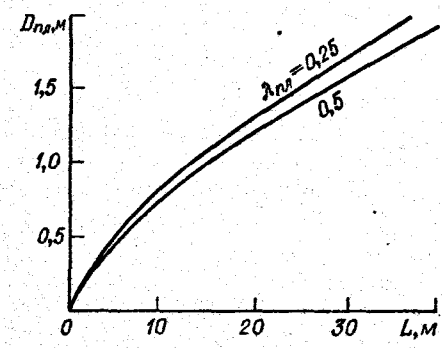


Рис.4. Графики для выбора диаметра поплавка сферической формы

Проведенные исследования позволяют обоснованно выбирать основные геометрические, кинематические и силовые параметры при конструировании шагающих шасси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бульдозер-амфибия типа Д155В-1 (Япония) // Черная металлургия. 1979. № 4. С. 59–60.

2. Развитие технических решений по глубоководным средствам сбора железомарганцевых конкреций // Судостроение. 1984. № 12. С. 4–8.

3. Тимофеев И.П. Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна / Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 176 с.