

Л.Н. Козыряцкий /к.т.н./, Ф.Л. Шевченко /д.т.н./, Р.И. Божко  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ПЛАВСРЕДСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА

*Одним из наиболее перспективных и эффективных способов добычи полезных ископаемых, в частности железомарганцевых конкреций, со дна Мирового океана является эрлифтный способ. При проектировании эрлифтного гидроподъема твердой фракции необходимо решать многие задачи, в том числе и вопросы перемещения вертикального подъемного трубопровода при различных режимах движения плавсредства. Приведены уравнения перемещения вертикального трубопровода как жесткого стержня, шарнирно закрепленного в центре тяжести плавсредства, с некоторым концевым грузом, с учетом подводных течений с линейным изменением скорости. Приведены схемы и результаты расчета траектории движения нижнего конца трубопровода при различных режимах движения плавсредства.*

**Ключевые слова:** Мировой океан, гидродобыча, эрлифт, вертикальный трубопровод, перемещение, плавсредство, расчеты, скорость, жесткий стержень, ускорение.

### Постановка проблемы

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, проведенные на кафедре ЭМС ДонНТУ и ПО «Южморгеология», наиболее перспективным и технически реализуемым способом глубоководной (до 6000 метров) добычи железомарганцевых конкреций (ЖМК) со дна Мирового океана на данном этапе является комплекс технических средств на базе гидравлической системы подъема, в частности, с помощью эрлифтных установок [1,2].

В Донецком национальном техническом университете (ранее ДПИ) проводились широкомасштабные и многолетние исследовательские работы по эрлифтным установкам различного назначения, в том числе эрлифтным добычным комплексам по подъему полезных ископаемых со дна водоемов. Данные разработки были внедрены в различные отрасли промышленности. Например, более десятка установок эрлифтно-земснарядных комплексов по добыче песка со дна рек и озер Западной Сибири РФ.

### Анализ последних исследований и публикаций

Специфика условий глубоководной добычи ЖМК со дна Мирового океана при глубинах до 6000 м определяет вопрос создания гидравлических глубоководных систем подъема судовых добычных комплексов как крупную и сложную комплексную научно-техническую проблему. Комплексность проблемы определяется, с одной

стороны, взаимосвязью технических процессов сбора и объема ЖМК, а с другой стороны – выполнением, кроме основной функции подъема ЖМК, функции связующего звена между плавсредством и агрегатом сбора, а также функции несущей конструкции для всего подводного оборудования добычного комплекса [3,4]. Таким образом, предполагаемая схема судового добычного комплекса с гидравлической (эрлифтной) системой подъема предусматривает необходимость выполнения всех видов функциональных связей: технических, кинематических и конструктивных. Поэтому при проектировании гидравлических систем подъема необходимо решать многие задачи, в том числе и вопросы перемещения вертикального трубопровода при различных режимах движения плавсредства для добычи ЖМК со дна Мирового океана [1,2,5...9].

### Цель (задачи) исследования

Основная задача настоящего исследования – получить соответствующие уравнения перемещения вертикального трубопровода эрлифта и определить характер его движения, а также параметры, влияющие на поведение этого трубопровода при перемещении плавсредства в водоеме.

### Основной материал исследования

Расчеты трубопровода при квазистатических нагрузках (1)...(6) показали, что он испытывает практически безмоментное напряженное состоя-

ние как гибкая нить. Рассматривая в равновесии элемент нити с погонной массой  $m$ , на который действует горизонтальная сила инерции  $m^* \ddot{y}$  ( $m^*$  – погонная масса трубопровода с учетом присоединенной массы внешней среды и массы протекающей гидросмеси), нормальная сила сопротивления движению  $K\dot{y}^2$  и растягивающее усилие  $T=m\xi g(L-x)$  ( $\xi$  – коэффициент, учитывающий архимедову силу,  $L=l \cdot (l+M) \cdot (ml)^{-1}$ ,  $M$  – масса концевого груза) при малой скорости, когда  $\sin y' = y'$ , получим дифференциальное уравнение движения (рис. 1):

$$y_{tt} = \frac{m\xi}{m^*} g((L-x)y_x)_x - \frac{k}{m^*} y_t^2 \quad (1)$$

с граничными условиями:  $y(0,t)=y(t)$  – уравнение движения плавсредства;  $y_{tt}(l,t) = \frac{M\xi}{M^*} g y_x(l,t) - \frac{K_0}{M^*} y_t^2(l)$  – уравнение равновесия концевого груза  $Q=Mg$  с коэффициентом сопротивления  $K_0$ .

В начале равноускоренного движения плавсредства  $y(t)=at^2/2$  с ускорением  $a$ , когда скорость движения трубопровода настолько мала, что можно положить  $K=K_0=0$ , решением может быть функция:

$$y(x,t)=ax+\beta t^2. \quad (2)$$

Так как  $y_{tt}=2\beta$ ,  $y_x=a$ , то из граничных условий  $y_{tt}(0,t)=2\beta = -\frac{m\xi}{m^*} g a$ ,  $y_x(0,t) = -2\beta \frac{2m^*}{m\xi g}$ , получим:

$$y(x,t) = \frac{\alpha}{2} \left( t^2 - \frac{2m^*}{m\xi g} x \right) \cdot \eta(x,t), \quad (3)$$

где  $\eta(x,t)=1$  при  $t^2 - \frac{2m^*}{m\xi g} x > 0$ ;  $h(x,t)=0$  при  $t^2 - \frac{2m^*}{m\xi g} x < 0$ .

Это значит, что в начальный период движения гибкая нить принимает форму прямой линии с фронтом волны, достигающим нижнего сечения за время  $t = \sqrt{\frac{2m^* l}{m\xi g}}$ .

В конце режима разгона трубопровода, когда начнется его равномерное движение со скоростью  $v$  при  $y_{tt}=0$ , уравнение движения нити примет вид:  $y(t)=vt+y(x)$ , где  $y(x)$  – уравнение деформированной нити, полученное при гранич-

ных условиях:  $y(0)=0$ ,  $y'(l) = -K_0 v^2 (Mg\xi)^{-1}$ . Последовательным интегрированием для равномерного движения нити получим уравнение углов поворота  $\theta=y'(x)$  и уравнение деформированной оси  $y(x)$ :

$$\theta = \frac{k(M)^{-1} v^2 - g\xi L y'(0)}{g\xi(L-x)}; \quad (4)$$

$$y(x) = \frac{kv^2 l}{mg\xi} \left[ \frac{x}{l} - \overline{M} \left( 1 - \frac{K_0 m}{KM} \right) \ln \frac{1 + \overline{M}}{1 + M - \frac{x}{l}} \right], \quad (5)$$

где  $\overline{M} = \frac{M}{ml}$ .

Если  $\sin\theta \neq \theta$ , то вместо (4) будем иметь (6):

$$\theta = \arcsin \left[ \left( a - b - c(a+b) \left( \frac{L-1}{L-x} \right)^{\frac{a}{b}} \right) \times \left( 1 + c \left( \frac{L-1}{L-x} \right)^{\frac{a}{b}} \right)^{-1} \right], \quad (6)$$

где  $c = \frac{a-b-\sin\theta}{a+b+\sin\theta}$ ;  $b = \frac{q}{2Kv^2} = \frac{mg\xi}{2Kv^2}$ ;  $a = \sqrt{b^2+1}$ .

Угол поворота на конце трубопровода  $\theta$  вычисляется из условия равновесия концевого груза, т.е. из уравнения:

$$\sin^2 \theta + \frac{Mg\xi}{K_0 v} \sin \theta - 1 = 0. \quad (7)$$

Приближенным интегрированием (6) можно получить рекуррентную формулу горизонтальных перемещений сечений трубопровода:

$$y_i = y_{i+1} + \frac{l_i}{6l_{i-1}(l_i+l_{i-1})} [l_{i-1}(2l_i+3l_{i-1})] \text{tg}\theta_{i-1} + (l_i+3l_{i-1})(l_i+l_{i-1}) \text{tg}\theta_i - l_i^2 \text{tg}\theta_{i-1}. \quad (8)$$

Например, для трубопровода с параметрами:  $l=6000$  м,  $m\xi=82,2$  кг/м,  $M\xi=50 \cdot 10^3$  кг,  $K=179,4$  Нс<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>,  $K_0=7200$  Нс<sup>2</sup>/м, при  $v=0,5$  м/с и  $x=l$ , на основании (5) получим  $y(l)=257,4$  м, а по (7), (8), при шаге разбивки  $\Delta=100$  м –  $y(l)=262$  м.

Если стержень считать недеформированным, то отклонение нижнего сечения окажется равным  $y = Kv^2 l (mg)^{-1} (1 + 2K_0(Kl)^{-1})(1 + 2M(ml)^{-1})^{-1} = 279,4$  м.

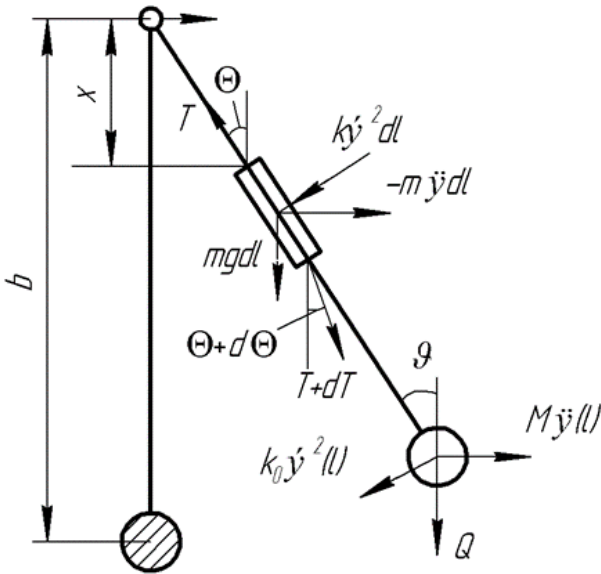


Рис. 1. К расчету деформированного трубопровода как гибкой нити

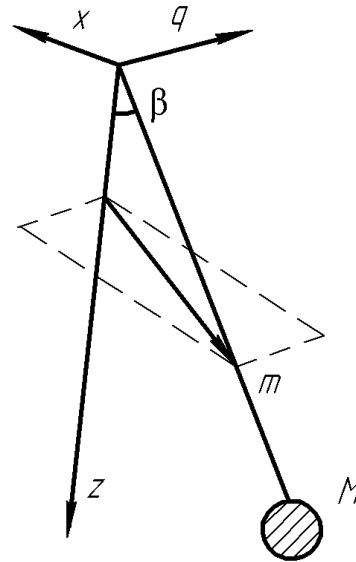


Рис. 2. К расчету перемещения трубопровода как жесткого стержня

Из этого примера видно, что с погрешностью 6,6 % транспортный трубопровод при небольших скоростях движения можно считать абсолютно жестким [5,7].

Поэтому при анализе пространственных перемещений рассматривается жесткий стержень, шарнирно закрепленный в центре тяжести плавсредства, с концевым грузом Q (рис. 2), (9)...(14).

Верхняя опорная точка стержня перемещается в горизонтальной плоскости по заданной траектории  $\vec{r} = \{x, y, 0\}$ . Перемещение произвольной точки  $\vec{r} = \vec{r}_0 + \zeta + \vec{e}$ . Скорость движения произвольного сечения

$$\vec{v}(\zeta) = \dot{\vec{r}}_0 + \dot{\zeta}\vec{e} = (\dot{x} - \zeta(\beta \cos \alpha \cdot \cos \beta - \alpha \sin \alpha \cdot \sin \beta))\dot{y} - \zeta(\beta \sin \alpha \cdot \cos \beta + \alpha \cos \alpha \cdot \sin \beta) - \zeta\beta \sin \beta. \quad (9)$$

Квадрат нормальной составляющей

$$\begin{aligned} v_n^2 &= v^2 - v_\tau^2 = v^2 - \vec{v}\vec{e}; \\ v_n^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \zeta^2(\beta^2 + \alpha^2 \sin^2 \beta) - \\ &- 2\zeta(\dot{x} \cos \alpha + y \sin \alpha)\dot{\beta} \cos \beta - \\ &- (\dot{x} \sin \alpha - y \cos \alpha)\alpha \sin \beta - \\ &- (\dot{x} \cos \alpha + y \sin \alpha)^2 \sin^2 \beta. \end{aligned} \quad (10)$$

Для вычисления перемещений используются уравнения Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = 0,$$

где  $i=1,2$ ;  $q_1=\alpha$ ;  $q_2=\beta$ .

С учетом (9), (10) вычисляются соответствующие производные кинетической энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} &= \frac{m}{2} \int_0^l \frac{\partial v^2}{\partial \dot{\alpha}} d\zeta + \frac{M}{2} \frac{\partial v^2(l)}{\partial \dot{\alpha}} = \\ &= \frac{ml^3}{3} \xi_1 \alpha \sin^2 \beta + \frac{ml}{2} \xi_2 (x \sin \alpha - y \cos \alpha) \sin \beta; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} &= \frac{ml^2}{2} \xi_2 (\dot{\beta} (x \sin \alpha - y \cos \alpha) \sin \beta + \\ &+ \dot{\alpha} (x \cos \alpha + y \sin \alpha) \sin \beta) \end{aligned}$$

и диссипативной функции

$$\Phi = \frac{1}{3} K \int_0^l v_n^3(\zeta) d\zeta + \frac{1}{3} \frac{K_0}{v_n^3(l)};$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{d\alpha} &= \frac{K}{2} \int_0^l \left( v^2(\zeta) - (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha)^2 \sin^2 \beta \right)^{\frac{1}{2}} \times \\ &\times \frac{\partial v^2}{\partial \alpha} d\zeta + \frac{K_0}{2} \times \\ &\times (v^2(l) - (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha)^2 \sin^2 \beta)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial v^2(l)}{\partial \alpha}. \end{aligned}$$

Аналогично вычисляются производные по параметру  $\beta$ . При вводе обозначений

$$\alpha = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 - (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha)^2 \sin^2 \beta;$$

$$b = -2(\dot{\beta}(\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha) \cos \beta - \dot{\alpha}(\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha) \sin \beta);$$

$$c = \dot{\beta}^2 + \dot{\alpha}^2 \sin^2 \beta;$$

$$\Delta = 4ac - b^2; R(\zeta) = a + b\zeta + c\zeta^2 = v_n^2$$

и использовании табличных интегралов производные диссипативной функции примут вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} = Ke_1 \Phi_1 + kf_1 \Phi_2 + K_0(e_1 l^2 + f_1 l) \sqrt{R(l)},$$

где

$$\Phi_1 = \left( \frac{l}{4c} - \frac{5b}{24c^2} \right) v_n^3(l) + \frac{5b}{24c^2} \sqrt{a^3} + \frac{5b^2 - 4ac}{16c^2} \times \\ \times \left[ \frac{2cl + b}{4c} v_n(l) - \frac{b\sqrt{a}}{4c} + \frac{\Delta}{4c\sqrt{c}} \right] \times \\ \times \ln \left| \frac{2\sqrt{c}v_n(l) + 2cl + b}{2\sqrt{ac} + b} \right|; \quad (11)$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{3c} \left( v_n^3(l) - \sqrt{a^3} \right) - b \frac{2cl + b}{8c^2} v_n(l) + \frac{b^2 \sqrt{a}}{8c^2} - \\ - \frac{b\Delta}{16c^2 \sqrt{c}} \ln \left| \frac{2\sqrt{c}v_n(l) + 2cl + b}{2\sqrt{ac} + b} \right|. \quad (12)$$

Аналогично вычисляется

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \beta} = Ke_2 \Phi_1 + Kf_2 \Phi_2 + K_0(e_2 l^2 + f_2 l) \sqrt{R(l)}.$$

Потенциальная энергия системы

$$\Pi = -mg\xi \int_0^l \zeta \cos \beta d\zeta - Mg\xi l \cos \beta = -\frac{gl^2}{2} \bar{\xi} \cos \beta.$$

Производные равны

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \beta} = \frac{gl^2}{2} \bar{\xi} \sin \beta.$$

Подставляя полученные дифференциальные зависимости в уравнении Лагранжа, получаем систему уравнений для вычисления углов  $\alpha$  и  $\beta$ , определяющих стержня в пространстве:

$$\frac{ml^2 \xi_2 \ddot{\alpha} \sin^2 \beta}{3} + \frac{ml^3 \xi_1 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin 2\beta}{3} + \\ + \frac{ml^2 \xi_2 (\ddot{x} \sin \alpha + \dot{x} \dot{\alpha} \cos \alpha - \ddot{y} \cos \alpha + \dot{y} \dot{\alpha} \sin \beta)}{2} - \\ - \frac{ml^2 \xi_2 \dot{\alpha} (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \beta) \sin \beta}{2} + \\ + K \dot{\alpha} \Phi_1(t) \sin^2 \beta + \\ + K (\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha) \Phi_2(t) \sin \beta + \\ + K_0 \sqrt{R(l,t)} (l^2 \alpha \sin^2 \beta + \\ + l(\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha) \sin \beta) = 0; \quad (13)$$

$$\frac{(ml)^3 \xi_1 \ddot{\beta}}{3} - \frac{1}{2 - (ml)^3 \xi_1 \dot{\alpha}^2 \sin 2\beta} \times \\ \times (ml)^2 \xi_2 \cdot (\ddot{x} \sin \alpha + \dot{x} \dot{\alpha} \cos \alpha - \ddot{y} \cos \alpha + \dot{y} \dot{\alpha} \sin \alpha) \times \\ \times 3 \left( (ml)^2 \dot{\alpha} \xi_2 (\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha) \cos \beta \right) + \\ + \frac{(gl)^2 \xi_2 \sin \alpha}{2} + K \dot{\beta} \Phi_1(t) - \\ - K (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha) \Phi_2(t) \cos \beta + \\ + K_0 \sqrt{R(l,t)} \times (\beta l^2 - (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha) l \cos \beta) = 0, \quad (14)$$

$$\text{где } \xi_1 = \frac{1 + 3M}{ml}; \quad \xi_2 = \frac{1 + 2M}{ml}; \quad \bar{\xi}_2 = \frac{1 + 2Q}{ql}.$$

В частном случае движения опорной точки по прямой  $\bar{r}_0 = \{x, 0, 0\}$ , когда  $\dot{y} = 0$ ,  $\alpha = 0$ , остается одно уравнение (14) вида [4]:

$$\ddot{\beta} - \frac{3}{4} \frac{Kl}{m} \frac{\xi_5}{\xi_1} \dot{\beta}^2 \text{sign} \nu + \frac{3q \bar{\xi}_1}{2ml \xi_1} \sin \beta + \\ + \frac{2K \xi_4}{m \xi_1} \dot{y} \dot{\beta} \cos \beta \cdot \text{sign} \nu - \frac{3 \xi_2}{2l \xi_1} \ddot{y} \cos \beta - \\ - \frac{3K}{2ml} \frac{\xi_3}{\xi_1} \cos^2 \beta \text{sign} \nu = 0, \quad (15)$$

$$\text{где } \xi_3 = \frac{1 + 2K_0}{Kl}; \quad \xi_4 = \frac{1 + 3K_0}{Kl}; \quad \xi_5 = \frac{1 + 4K_0}{Kl}.$$

При учете подводных течений с линейным изменением скорости по двум участкам (рис. 3) уравнение (15) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \ddot{\beta} - \frac{3 Kl}{4 m} \frac{\xi_5}{\xi_1} \dot{\beta}^2 \operatorname{sign} v + \frac{3q\bar{\xi}_2}{2ml\xi_1} \sin \beta + \\ & + \frac{2K\xi_3}{m\xi_1} \dot{\beta} \cos \beta \operatorname{sign} v - \frac{3\xi_2}{2l\xi_1} \dot{y} \cos \beta - \\ & - \frac{3K}{2Ml} \frac{\xi_3}{\xi_1} \dot{y}^2 \cos^2 \beta \operatorname{sign} v - \\ & - \left( \frac{3 kl}{2 m} \alpha_2 \dot{\beta} \frac{\xi_5}{\xi_1} - \frac{2K\bar{v}_T}{m} \dot{\beta} \frac{\xi_3}{\xi_1} \cos \beta + \right. \\ & + \frac{3K\bar{v}_T}{ml} \dot{y} \frac{\xi_3}{\xi_1} \cos \beta - \frac{2K\alpha^2}{m} \dot{y} \frac{\bar{\xi}_4}{\xi_1} \cos \beta + \\ & + \frac{3K\bar{v}_T^2}{2ml\xi_1} \cos^2 \beta - \frac{2K\alpha_2}{m} \bar{v}_T \frac{\bar{\xi}_4}{\xi_1} \cos \beta + \\ & \left. + \frac{3 Kl}{4 m} \alpha_2^2 \frac{\bar{\xi}_5}{\xi_1} \right) \operatorname{sign} v = 0, \quad (16) \end{aligned}$$

где  $\bar{\xi}_3 = \xi - \frac{l_1^2}{l^2} \left( 1 - \frac{v_T}{v_T^2} \right)$ ;  $\bar{\xi}_4 = \xi_4 - l \frac{l_1^3}{l^3} \left( 1 - \frac{v_T}{v_T} \right)$ ;  
 $\bar{\xi}_5 = \xi_5 - \frac{l_1^4}{l^4} \left( 1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)$ .

При вычислении коэффициентов  $\xi_1, \xi_2$  параметрами  $M$  и  $m$  нужно учитывать присоединение массы окружающей среды и протекающей гидросмеси, а в коэффициенте  $\bar{\xi}_2$  учитываются весовые нагрузки в воде.

Решение системы (13), (14) выполняется методом Рунге-Кутты [6,10...12].

Анализ результатов расчета траектории движения нижнего конца трубопровода при различных режимах движения плавсредства приводит к следующим выводам:

- в начале движения плавсредства волна деформации трубопровода быстро (в течение минуты) достигает нижнего сечения, а трубопровод при этом практически не изгибается;
- время разгона нижнего конца трубопровода пропорционально скорости движения плавсредства и не зависит от характера разгона плавсредства;
- отставание нижнего конца трубопровода пропорционально квадрату скорости движения плавсредства с постоянным коэффициентом пропорциональности, зависящим от параметров трубопровода;
- время торможения нижнего конца трубопровода до его полной остановки зависит от характера торможения плавсредства;
- при движении плавсредства по полукруго-

вым траекториям нижний конец трубопровода перемещается по аналогичным траекториям, приближаясь к траекториям плавсредства по мере увеличения конечного груза;

- время стабилизации движения нижнего конца трубопровода не зависит от траектории перемещения плавсредства.

Анализ расчетов на компьютере, с использованием в том числе зависимостей (17)...(23), позволил аппроксимировать уравнения скорости движения нижнего конца трубопровода кривой

$$y = v \left( 1 - e^{-\bar{K}t} \right), \text{ что определяет уравнения движения } y = vt + \frac{v}{\bar{K}} e^{-\bar{K}t} + c \text{ и ускорений } \ddot{y} = v\bar{K} e^{-\bar{K}t}.$$

Постоянные  $C$  и  $\bar{K}$  находятся из условия  $t=0, y=0$ , а также из условия, что в установившемся режиме движения, когда  $e^{-\bar{K}t} = 0$ , отставание

нижнего конца трубопровода  $\frac{v}{\bar{K}}$  можно получить, положив  $\dot{\beta} = \ddot{\beta} = \ddot{y} = 0$ , т.е.

$$y^* = \frac{v}{\bar{K}} = \frac{Kv^2}{q} \frac{\xi_3}{\xi_2} l. \quad (17)$$

Зная скорость движения нижнего конца трубопровода  $\dot{y} = v \left( 1 - \exp \left( -\frac{q\xi_2 t}{Kv\xi_3 l} \right) \right)$ , можно найти

время разгона  $t^*$ , приравняв разность скорости плавсредства  $v$  и скорости нижнего конца трубопровода  $\dot{y}$  заданной точности  $n$  в процентах:

$$t^* = \frac{q\xi_2}{Kv\xi_3 l} \ln \frac{100}{n} = \frac{mg\xi_2 \bar{\xi}_2}{Kv\xi_3 l} \ln \frac{100}{n}. \quad (18)$$

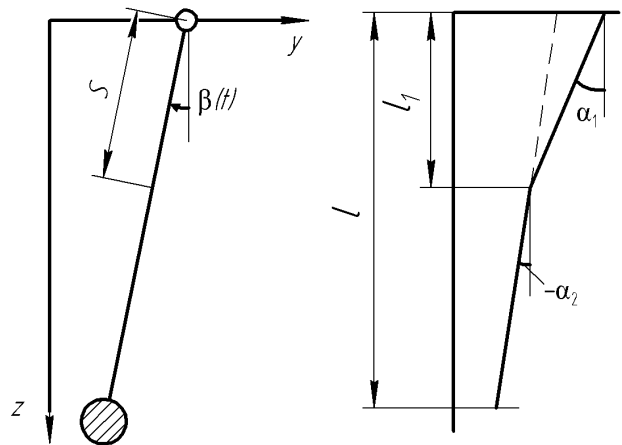


Рис. 3. Эпюра скорости подводных течений

Так, например, для трубопровода с параметрами, приведенными выше, время стабилизации движения трубопровода с точностью до 5 %, согласно (18),  $t^* = 3423$  с.

Предполагая мгновенное торможение плавсредства, т.е., полагая в (15)  $\dot{y} = \ddot{y} = 0$  и учитывая отрицательный знак относительной скорости движения  $\text{sign}(-l\beta)$ , получим

$$\ddot{\beta} + \frac{3kl}{4m} \frac{\xi_5}{\xi_1} \xi_2^2 + \frac{3q\xi}{2ml} \frac{\bar{\xi}_2}{\xi_1} \xi = 0, \quad (19)$$

или в линейных перемещениях  $y = \beta l$ ,

$$\ddot{y} + hy^2 + ay = 0, \quad h = \frac{3K\xi_5}{4m\xi_1}, \quad \alpha = \frac{3q\xi\bar{\xi}_2}{2\omega_1 ml}.$$

Непосредственным интегрированием этого уравнения получим квадрат скорости движения и ускорение нижнего конца трубопровода:

$$y^2 = -\frac{\ddot{y}_0}{h} e^{2h(y_0 - y)} + \frac{\alpha}{2h^2} \left(1 - e^{2h(y_0 - y)}\right) - \frac{\alpha y}{h}; \quad (20)$$

$$\ddot{y} = \ddot{y}_0 e^{2h(y_0 - y)} - \frac{\alpha}{2h^2} \left(1 - e^{2h(y_0 - y)}\right). \quad (21)$$

Начальное ускорение  $\ddot{y}_0 = h\dot{y}_0^2 - ay_0$  можно вычислить, т.к. начальная скорость  $y_0 = v$  и начальное отклонение  $y_0 = y^*$  известны.

Из (21) следует, что на небольшом участке перемещения нижнего конца трубопровода  $y_0 = y$  его ускорение (замедление) стабилизируется, принимая значение

$$\ddot{y}^* - \frac{\alpha}{2h} = -\frac{q\xi\bar{\xi}_2}{k\xi_5 l}. \quad (22)$$

Принимая ускорение (замедление) постоянным, т.е. движение равнозамедленным

$$y(t) = \frac{v_0^* t + \ddot{y}^* t^2}{2},$$

можно найти время торможения трубопровода

$$T = \frac{v_0^*}{\ddot{y}^*}; \quad v_0^* = \sqrt{\frac{\alpha}{h}|y_0| + \frac{1}{2h}} \approx \sqrt{\frac{\alpha}{h}|y_0|}. \quad (23)$$

### Выводы

Выполненные исследования по гидродобыче железомарганцевых конкреций со дна Мирового океана с помощью эрлифтов, а также схемы и результаты расчета траекторий движения верти-

кального подъемного трубопровода эрлифта дали основание:

– получить соответствующие уравнения движения этого трубопровода как жесткого стержня;

– выявить поведение трубопровода и параметры, влияющие на это поведение при перемещении плавсредства;

– определить время торможения трубопровода при некотором постоянном ускорении (замедлении) перемещения плавсредства.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку глубоководных эрлифтно-земснарядных комплексов для удаления скопившегося ила у плотин глубоководных водохранилищ гидроэлектростанций, расположенных преимущественно в горной местности.

### Список литературы

1. Адамов, Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: дис.... канд. техн. наук: 05.05.06 / Адамов Борис Исаевич. – Донецк, 1982. – 323 с.
2. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни [и др.]. – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
3. Chung, J.S. Dynamik Vertical Stretching Oscillation of an 18000-ft Ocean Mining Pipe / J.S. Chung, A.K. Whitney. – Annual Offshore Technological Conference. Dallas, Tex., Houston, May, 1981. – No.81. – P. 225-234.
4. Chung, J.S. Nonlinear Transient Motion of Deep Ocean Mining Pipe / J.S. Chung, A.K. Whitney // ASME Transactions Journal of Energy Resources Technology. – 1981. – No.20. – P. 117-127.
5. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 272 с.
6. Шевченко, Ф.Л. Устойчивость упругих деформируемых систем. – Донецк: ДПИ, 1986. – 52 с.
7. Финкельштейн, З.Л. Средства гидромеханизации: учеб. пособ. / З.Л. Финкельштейн, Л.Н. Козыряцкий. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 168 с.
8. Бойко, М.Г. Землесосні і ерліфтно-землесосні снаряди: навч. посіб. / М.Г. Бойко, Л.М. Козиряцький, А.П. Кононенко. – Донецьк, 2005. – 436 с.
9. Эрлифты и гидроэлеваторы в горной промышленности: учеб. пособ. / Л.Н. Козыряцкий [и др.]. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 160 с.
10. Kyrychenko, Y. Advanced method for calculation of deep-water airlifts and the special software development / Y. Kyrychenko, V. Kyry-

- chenko, A. Taturevych // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 215-222.
11. Kyrychenko, Y. Research of dynamic processes in deep-water pumping hydrohoists lifting two-phase fluid / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Romanyukov // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 115-124.
12. Mikami, T. Free vibration analysis of shells of revolution considering the fluid-structure interaction / T. Mikami, J. Yoshimura // Mem. Fac. Eng. Hokkaido Univ. – 1990. – No.1. – P. 1-15.

L.N. Kozryatsky /Cand. Sci. (Eng.)/, **F.L. Shevchenko** /Dr. Sci. (Eng.)/, R.I. Bozhko  
Donetsk National Technical University (Donetsk)

**DISPLACEMENT OF THE VERTICAL PIPELINE  
UNDER VARIOUS MODES OF MOVEMENT OF A WATERCRAFT INTENDED  
FOR MINING FROM THE BOTTOM OF THE WORLD OCEAN**

**Background.** One of the most promising and effective ways to extract minerals, in particular ferromanganese nodules, from the bottom of the World Ocean is airlift. When designing an air hydraulic lift of a solid fraction, it is necessary to solve many problems, including the issues of moving a vertical lifting pipeline under various modes of movement of a watercraft. The Donetsk National Technical University (formerly DPI) conducted large-scale and long-term research on airlift installations for various purposes, including airlift mining complexes for lifting minerals from the bottom of reservoirs. These developments have been implemented in various industries.

**Materials and/or methods.** The main objective of this study is to obtain the corresponding equations of motion of the vertical airlift pipeline and determine the nature of its movement, as well as the parameters that affect the behaviour of this pipeline when moving a watercraft in a reservoir.

The complexity of the problem is determined, on the one hand, by the relationship between the technical processes of collection and the volume of raw materials produced, and on the other hand, by the performance of the main lifting function, the functions of a link between the watercraft and the collection unit and the supporting structure for all underwater equipment of the mining complex.

**Results.** The corresponding equations of motion of this pipeline as a rigid rod obtained. The pipeline behaviour and parameters that affect this behaviour when moving a watercraft identified. The time of pipeline deceleration at a certain constant acceleration (deceleration) of the movement of the watercraft determined.

**Conclusion.** Further research will focus on the development of deep-water airlift-dredging systems for removing accumulated silt from dams in deep-water reservoirs of hydroelectric power plants located mainly in mountainous areas.

**Keywords:** the World Ocean, hydraulic mining, airlift, vertical pipeline, movement, watercraft, calculations, speed, rigid rod, acceleration.

**Сведения об авторах**

**Л.Н. Козыряцкий**

SPIN-код: 3349-7584

Телефон: +380 (62) 301-07-24

Эл. почта: kozyr.1946@mail.ru

**Р.И. Божко**

SPIN-код: 2510-2591

Телефон: +380 (62) 301-07-24

Эл. почта: bozhko342@mail.ru

*Статья поступила 20.09.2020 г.*

© Л.Н. Козыряцкий, **F.L. Шевченко**, Р.И. Божко, 2020

*Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич*