

УДК 622.271.64

В.П. Франчук, д-р техн. наук, проф.,  
Т.В. Шепель

Государственное высшее учебное заведение „Национальный  
горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,  
e-mail: franchuk@nmu.org.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГРУНТОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МОРСКИХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

V.P. Franchuk, Dr. Sc. (Tech.), Professor,  
T.V. Shepel

State Higher Educational Institution “National Mining University”,  
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: franchuk@nmu.org.ua

## THE RESEARCH OF THE DREDGE'S DYNAMICS DURING MARINE SEDIMENTS MINING

Представлен метод аналитического исследования динамики грунтозаборного устройства при отборе морских донных отложений при циклической технологии ведения добычных работ. Определены геометрические координаты положения грунтозаборного устройства при драгировании. Движение грунтозаборного устройства при заборе донных осадков описывается дифференциальным уравнением второго порядка с учетом неупругих сопротивлений, решение которого позволяет определить его кинематические характеристики при работе на дне.

**Ключевые слова:** *грунтозаборное устройство, приведенная жесткость каната, глубоководная добыча, динамика, усилие копания*

В последние годы все больший научный, промышленный и экономический интерес вызывают запасы морских донных отложений. Для детального изучения свойств донного грунта, с целью определения области использования в народном хозяйстве, необходимо производить отбор крупномасштабных проб. Данный процесс, как правило, производится при помощи оборудования циклической технологии, включающего грунтозаборное устройство (ГЗУ), канат и глубоководную лебедку, установленную на палубе судна. Цикл отбора пробы включает: опускание ГЗУ, забор горной массы, подъем на палубу и разгрузку ГЗУ.

Процесс грунтозабора является наиболее сложным. Поскольку работы по отбору проб донного грунта ведутся на значительных глубинах (для Черного моря – до 2200 м), проконтролировать работу ГЗУ визуально не представляется возможным, а применение различного типа средств отслеживания и контроля процесса забора достаточно сложно. Поэтому, определение усилий и выбор параметров комплекса производится аналитически. В дальнейшем предусматривается экспериментальная проверка по косвенным показателям.

При работе на дне на ГЗУ действуют различные усилия: резания, гидродинамического сопротивления, трение об ил и др. Суммарное усилие сопротивления перемещению определяет тип гибкого тягового органа и мощность глубоководной лебедки. Поэтому, точность расчета усилий, действующих на ГЗУ при заборе горной массы, является определяющим фактором при выборе параметров всего комплекса технологического оборудования.

Связь между глубоководной лебедкой и ГЗУ осуществляется через гибкое звено – канат. Поэтому, при грунтозаборе возможно появление колебаний, которые могут значительно влиять на изменение сопротивления копанию.

Ускоренное движение ГЗУ вызывает дополнительные инерционные нагрузки, учет которых во многом определяет правильность расчета в целом, а значит, и правильность выбора параметров добычного комплекса, излишний запас которых приводит к значительному росту капитальных и эксплуатационных затрат, а недостаточный – к аварии или выходу из строя оборудования.

Задача данной работы состоит в исследовании динамики ГЗУ при заборе морских рыхлых отложений.

**Идея работы.** Комплекс технологического оборудования судового базирования для геологических исследований донных осадков при циклической технологии ведения добычных работ можно представить как одномассную колебательную систему “ГЗУ – канат – судно”, где канат выступает как упругое звено. Исследование колебательной системы позволяет определить динамические и кинематические характеристики оборудования комплекса.

**Сфера использования результатов** – производственные и научно-исследовательские предприятия при создании и использовании оборудования для геологоразведочных работ способом глубоководного драгирования.

**Характеристика процесса забора донных осадков.** Забор горной массы осуществляется при драгировании путем механического воздействия клиновидной режущей части ГЗУ на забой. При этом происходит отделение породы от массива, перемещение и накопление ее в заборной полости (рис. 1). Для улучшения условий забора и внедрения режущей

части в забой, а также уменьшения энергоемкости процесса резания, угол резания  $\alpha$ , согласно [2], должен находиться в пределах 20...40°.

При оснащении режущей части зубьями усилие резания уменьшается. Поэтому в конструкции ГЗУ, как правило, предусматривается установка 4-5 зубьев на режущей кромке.

Согласно [2], для рыхлых влагонасыщенных грунтов рациональным является применение клиновидных зубьев с углом заострения в плане, равным 72°.

Тяговое усилие ГЗУ передается через тяговый канат, другой конец которого присоединен к судовой глубоководной лебедке.

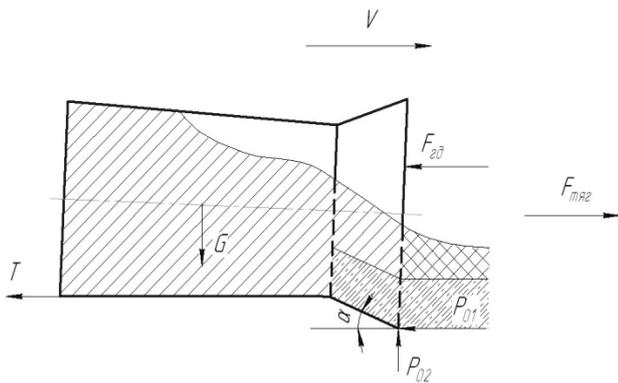


Рис. 1. Схема усилий, действующих на корпус ГЗУ при заборе горной массы

**Определение силы сопротивления резанию пород технологического слоя.** Силу сопротивления резанию подводного грунта определяем по методике М.К. Сукача [1].

Согласно выражению 17 [1], сопротивление разрушению подводного грунта равно

$$F_{рез} = b \cdot h_p \cdot \left[ \tau_0 \cdot \frac{\cos \alpha + 1}{\sin \alpha} + \frac{3}{2} \cdot \tau_0 \cdot \frac{3 \cos \alpha + 1}{\sin \alpha} \cdot Q + (\rho - \rho_v) \cdot g \cdot \frac{h^2}{2} \right], \quad (1)$$

где  $b$  – ширина ножа;  $\alpha$  – угол резания;  $\rho$  и  $\rho_v$  – плотность грунта и воды;  $h_p$  – глубина резания;  $\tau_0$  – граничное напряжение сцепления грунта;  $Q$  – критерий подобия, характеризующий состояние грунта в стружке и численно равен отношению толщин (объемов) зон текучести и твердых участков;  $g$  – ускорение свободного падения.

**Усилия, действующие на ГЗУ при грунтозаборе.** При заборе горной массы на корпус ГЗУ действуют усилия (рис. 1): сопротивления разрушению подводного грунта ( $P_{01}$ ), сопротивления внедрению режущей кромки в забой ( $P_{02}$ ), сопротивления перемещению корпуса ГЗУ ( $T$ ), усилия гидродинамического сопротивления ( $F_{зд}$ ), инерционные нагрузки (на рис. 1 не показаны).

Согласно [2],  $P_{02}$  при рациональной форме режущей кромки и однородных пластичных породах не

превышает 1/10 от усилия сопротивления разрушению горной породы  $P_{01} = F_{рез}$

$$P_{02} = 0,1 \cdot P_{01}. \quad (2)$$

Силу трения  $T$  об ил заполненного грунтозаборного устройства определяем по формуле

$$T = K \cdot N, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент трения стали об ил в воде;  $N$  – нормальная реакция, равная весу наполненного ГЗУ в воде.

Действие усилия  $P_{02}$ , определяемого по выражению (2), обуславливает неравномерность давления днища грунтозаборного устройства на донный ил, поэтому равенство величины нормальной реакции и веса грунтозаборного устройства является приближенным допущением для упрощения дальнейших расчетов.

Сила гидродинамического сопротивления определяется из выражения [3, с. 145]

$$F_{гд} = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_v \cdot S \cdot v^2, \quad (4)$$

где  $C_f$  – коэффициент подобия;  $\rho_v$  – плотность воды;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $v$  – скорость перемещения ГЗУ.

Таким образом, требуемое тяговое усилие составит

$$F_{тяг} = P_{01} + T + F_{гд}. \quad (5)$$

**Выбор расчетной модели для определения усилия натяжения каната в воде.** Для упрощения решения задачи введем следующие допущения:

- 1) канат являет собой нерастяжимую гибкую нить;
- 2) кривая, форму которой принимает канат, описывается уравнением плоской цепной линии;
- 3) подводные течения не оказывают воздействия на канат;
- 4) плотность воды не меняется с изменением глубины;
- 6) усилие сопротивления копанью – постоянная величина;
- 7) касательная к кривой, описывающей канат, в точке крепления ГЗУ – горизонтальна.

Опираясь на вышеприведенные допущения, вводим следующую расчетную модель (рис. 2), где:  $h$  – глубина ведения работ;  $N$  – усилие натяжения каната;  $V, H$  – соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие усилия натяжения.

Для осуществления процесса драгирования к дышлу ГЗУ необходимо приложить усилие, равное по величине усилию сопротивления копанью и противоположно направленное (горизонтальная составляющая натяжения каната  $H$  в т. А). Таким образом, решение задачи сводится к решению уравнений статики

$$\sum_{i=1} F_{xi} = 0; \quad \sum_{i=1} F_{yi} = 0, \quad (6)$$

где  $F_{xi}$  и  $F_{yi}$  – соответственно проекции сил на оси абсцисс и ординат.

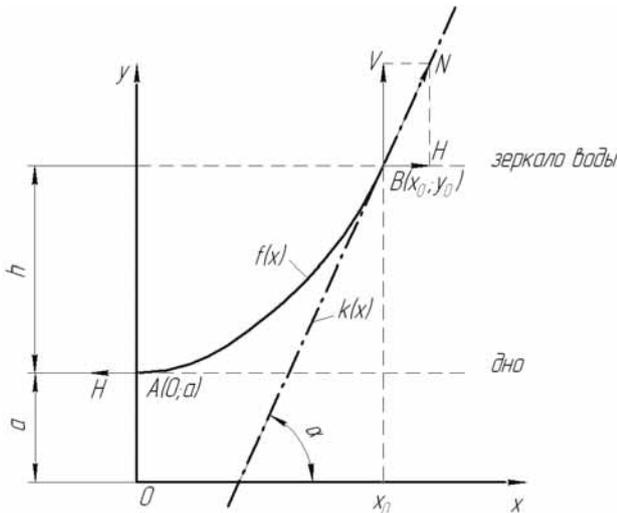


Рис. 2. Расчетная модель для определения усилия натяжения каната в воде

Поскольку натяжение обусловлено только весом каната, направленного вертикально, то, согласно (6), горизонтальная составляющая усилия натяжения каната является величиной постоянной в любой точке кривой  $AB$  и равна  $H$ .

Уравнение цепной линии, описывающей провисание каната в воде

$$f(x) = a \operatorname{ch} \frac{x}{a}. \quad (7)$$

Уравнение (7) было выведено аналитически Иоганном Бернулли и описывает линию, форму которой принимает гибкая однородная нерастяжимая тяжелая нить или цепь с закрепленными концами в однородном гравитационном поле.

Уравнение касательной в т.  $B(x_0; y_0)$  имеет вид

$$k(x) = y_0 + \operatorname{sh} \left( \frac{x_0}{a} \right) \cdot x + \operatorname{sh} \left( \frac{x_0}{a} \right) \cdot x_0. \quad (8)$$

Тангенс угла наклона между касательной в т.  $B$  и осью абсцисс, равный коэффициенту перед  $x$  в уравнении (8)

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sh} \left( \frac{x_0}{a} \right). \quad (9)$$

Тангенс угла наклона между вектором усилия натяжения каната и горизонтальной составляющей

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V}{H}. \quad (10)$$

Длина дуги  $AB$

$$S_{AB} = \sqrt{y_0^2 - a^2}. \quad (11)$$

Объем каната

$$Q = \frac{m_{\text{кан}}}{\rho_k}, \quad (12)$$

где  $m_{\text{кан}}$  – масса каната;  $\rho_k$  – плотность каната.

Масса каната определяется как

$$m_{\text{кан}} = g_s \cdot S_{AB}, \quad (13)$$

где  $g_s$  – погонный вес каната.

Вес каната в воде

$$P_{\text{кан}} = Q \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_v), \quad (14)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения.

Поскольку вертикальная составляющая натяжения каната в т.  $A$  равна нулю, то можно записать

$$V = P_{\text{кан}}. \quad (15)$$

Таким образом, подставляя в равенство (15) зависимости (11)-(14), получим выражения для определения вертикальной составляющей натяжения каната

$$V = \frac{(\rho - \rho_v) \cdot g_s \cdot \sqrt{y_0^2 - a^2} \cdot g}{\rho}. \quad (16)$$

Из выражения (10), подставив (9), получим

$$V = H \cdot \operatorname{tg} \alpha = H \cdot \operatorname{sh} \left( \frac{x_0}{a} \right). \quad (17)$$

Приравнивая правые части уравнений (16) и (17), получим тождество

$$\frac{(\rho - \rho_v) \cdot g_s \cdot \sqrt{y_0^2 - a^2} \cdot g}{\rho} = H \cdot \operatorname{sh} \left( \frac{x_0}{a} \right). \quad (18)$$

Из рис. 2 очевидно, что

$$y_0 - a = h. \quad (19)$$

По выражению (7)

$$f(x_0) = y_0 = a \operatorname{ch} \frac{x_0}{a}. \quad (20)$$

Решая систему из уравнений (18), (19), (20) и подставляя значения исходных данных, находим значения  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $a$ , которые позволяют определить длину каната (11), необходимую для создания тягового усилия  $H$  (рис. 2).

**Исследование динамики системы “ГЗУ – канат – судно”. Расчетная модель. Постановка задачи.** Судно движется с постоянной скоростью  $V_C$ , причем  $V_C$  не превышает 1,5–2 узла (2,78–3,7 км/ч). Грунтозаборное устройство осуществляет забор горной массы на глубине 400–2200 м, при этом длина каната в воде постоянна, барабан глубоководной лебедки застопорен.

**Анализ исходной задачи.** Канат постоянной длины можно представить как упругий элемент (рис. 3), ГЗУ – как материальную точку, к которой приложены усилия сопротивления копанию, судно – как материальную точку  $C$  бесконечной массы, движущуюся с постоянной скоростью  $V_C$ . Для упрощения решения задачи используем систему относительно судна, совместим начало координат системы отсчета с т.  $C$  и представим в дальнейшем данную колебательную систему как одномассную.

**Определение жесткости упругого элемента.** Поскольку тяговое усилие  $F_{тяг}$  равно горизонтальной составляющей натяжения каната  $H$ , которая, в свою очередь, зависит от координаты  $x_0$  (рис. 2), очевидно, что при изменении значения  $x$  изменится и  $F_{тяг}$ . Таким образом, можем определить условную жесткость каната  $C_{кан}$

$$C_{кан} = \frac{\Delta F_{тяг}}{\Delta x}, \quad (21)$$

где  $\Delta F_{тяг}$  – изменение тягового усилия при изменении  $\Delta x$  на заданной глубине при постоянной длине каната.

$$\Delta F_{тяг} = F_2 - F_1, \quad (22)$$

где  $F_1, F_2$  – соответственно, значения горизонтальной составляющей натяжения каната при абсциссе  $x_1$  и  $x_2$  (при заданной глубине ведения работ, причем значения абсцисс должны быть близкими к тем, которые обеспечивают требуемое тяговое усилие по выражению (5) для более точной линеаризации жесткости каната в искомом диапазоне колебаний).

**Исследование динамики ГЗУ.** К ГЗУ приложены усилия сопротивления: усилие резания  $F_{рез}$ , сила трения  $T$  и усилие гидродинамического сопротивления  $F_{зд}$ , которое для малых скоростей перемещения можно считать пропорциональным первой степени скорости движения. Силу трения считаем для заполненного горной массой ГЗУ, поскольку путь заполнения грунтозаборного устройства намного меньше общего пути драгирования (в десятки раз).

Таким образом, требуется решить задачу с рассмотрением следующей модели (рис. 4), причем упругий элемент работает только на растяжение (канат не воспринимает сжимающие нагрузки).

Силу гидродинамического сопротивления  $F_{зд}$  раскладываем на две составляющие –  $F_{зд}(V_C)$ , постоянную по величине и по направлению, и  $F_{зд}(\dot{x})$ , изменяющуюся и по величине, и по направлению.

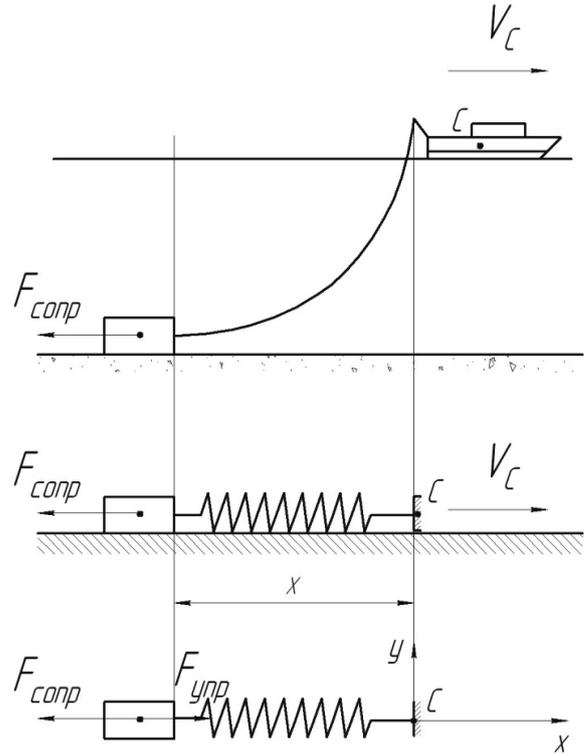


Рис. 3. Расчетная модель системы “ГЗУ-канат-судно”

Для решения данной задачи, используя основные формы дифференциальных уравнений движения материальной точки, составим дифференциальное уравнение движения

$$M \cdot \ddot{x} = T + F_{гд}(V_C) + F_{рез} - F_{упр} - F_{гд}(\dot{x}), \quad (23)$$

где  $M$  – масса заполненного ГЗУ;  $T$  – усилие трения днища заполненного ГЗУ об ил.

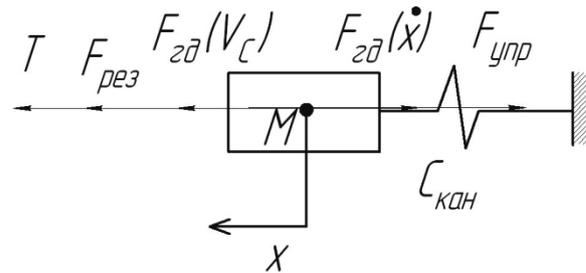


Рис. 4. Одномассная колебательная система

Учитывая, что  $T$  и  $F_{рез}$  – величины постоянные, полагая для малых скоростей

$$F_{гд}(V_C) = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_v \cdot S \cdot V_C^2 \approx \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_v \cdot S \cdot V_{абс}^2 = \beta \cdot V_C;$$

$$F_{гд}(\dot{x}) = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_v \cdot S \cdot \dot{x} = \beta \cdot \dot{x}, \quad (24)$$

где  $V_C$  – скорость движения судна.

Для учета того, что упругий элемент работает только на растяжение, используем функцию Хевисайда  $H(x)$ , которая возвращает в 0 отрицательные значения  $x$  при определении силы упругости. Запишем выражение для определения силы упругости в следующем виде

$$F_{\text{упр}} = C_{\text{кан}} \cdot x \cdot H(x), \quad (25)$$

где  $H(x) = 1$  при  $x > 0$  и  $H(x) = 0$  при  $x < 0$ .

Таким образом, дифференциальное уравнение движения запишется в следующем виде

$$M \cdot \ddot{x} = T + \beta \cdot V_C + F_{\text{рез}} - C_{\text{кан}} \cdot x \cdot H(x) - \beta \cdot \dot{x}. \quad (26)$$

Перенеся все члены при  $x$  в левую часть, раскрыв скобки и разделив каждый член уравнения на  $M$ , получим выражение

$$\ddot{x} + \frac{\beta}{M} \cdot \dot{x} + \frac{C_{\text{кан}}}{M} \cdot x \cdot H(x) = \frac{1}{M} \cdot (T + \beta \cdot V_C + F_{\text{рез}}),$$

или

$$\ddot{x} + 2n \cdot \dot{x} + k^2 \cdot x \cdot H(x) = G, \quad (27)$$

$$\text{где } 2n = \frac{\beta}{M}, k^2 = \frac{C_{\text{кан}}}{M}, G = \frac{1}{M} \cdot (T + \beta \cdot V_C + F_{\text{рез}}),$$

Решение уравнения будет отображать зависимости

-  $x(t)$  – перемещение ГЗУ относительно судна, как функция времени;

-  $\dot{x}(t)$  – скорость перемещения ГЗУ относительно судна, как функция времени, причем для определения абсолютной скорости ГЗУ в момент времени  $t_i$  необходимо прибавить к значению  $\dot{x}(t_i)$  значение скорости судна  $V_C$ ;

-  $\ddot{x}(t)$  – ускорение перемещения ГЗУ, как функция времени. Поскольку судно движется равномерно, значение ускорения в любой момент времени  $\ddot{x}(t_i)$  является абсолютным.

**Пример силового анализа и расчета динамики при заданных параметрах ГЗУ и условиях ведения работ. Исходные данные.** Силовой анализ и расчет динамики ГЗУ проводим для исходных данных, приведенных в таблице.

**Силовой расчет.** Усилие резания, согласно выражению (1), составит (принимая  $Q = 1$ ) Н

$$F_{\text{рез}} = 1 \cdot 0,2 \cdot \left[ 500 \cdot \frac{\cos 30^\circ + 1}{\sin 30^\circ} + \frac{3}{2} \cdot 500 \times \frac{3 \cos 30^\circ + 1}{\sin 30^\circ} \cdot 1 + (1250 - 1020) \cdot 9,81 \cdot \frac{0,2^2}{2} \right] = 1460.$$

Силу трения  $T$  заполненного грунтозаборного устройства об ил определяем по формуле (3), принимая  $K = 0,9$ , Н

$$T = 0,9 \cdot 9300 = 8370.$$

Сила гидродинамического сопротивления определяется по формуле (4),  $C_f = 1,33$  при обтекании прямоугольной призмы, Н

$$F_{\text{гд}} = \frac{1}{2} \cdot 1,33 \cdot 1020 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 271.$$

Таким образом, при  $V_{\text{ГЗУ}} = \text{const}$ , требуемое тяговое усилие составит, Н

$$F_{\text{тяг}} = 1460 + 8370 + 271 = 10101.$$

Таблица

Исходные данные к силовому анализу и расчету динамики грунтозаборного устройства

Параметр	Условное обозначение	Числовое значение
<b>1. Параметры ГЗУ</b>		
ширина режущей кромки, м	b	1
высота корпуса, м	a	0,5
угол резания, градусов	$\alpha$	30
масса заполненного ГЗУ, кг	M	2000
вес заполненного ГЗУ в воде, Н	$G_{\text{ГЗУ}}$	9300
погонный вес подъемного каната, кг/м	$\rho_{\text{пк}}$	0,764
плотность материала каната, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{кан}}$	7800
<b>2. Условия ведения работ</b>		
глубина, м	$H_M$	2000
глубина резания, м	h	0,2
граничное напряжение сцепления грунта, Па	$\tau_0$	500
плотность грунта, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	1250
скорость перемещения судна, м/с	$V_C$	0,8

**Исследование динамики ГЗУ. Определение длины каната для создания необходимого тягового усилия.** Решая систему из уравнений (18)-(20) для  $h = H_M = 2000$  м и  $H = F_{\text{тяг}} = 10101$  Н, с учетом исходных данных, находим значения  $x_0 = 2279$  м,  $y_0 = 3550$ ,  $a = 1550$  м.

По формуле (11) определяем длину каната, требуемую для создания заданного тягового усилия, м

$$L_{\text{кан}} = \sqrt{3550^2 - 1550^2} = 3194.$$

Вертикальная составляющая натяжения каната, согласно выражению (16), Н

$$V = \frac{(7800 - 1020) \cdot 0,764 \cdot 3194 \cdot 9,81}{7800} = 20810.$$

Натяжение каната, Н

$$N = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{10101^2 + 20810^2} = 23130.$$

Расстояние от ГЗУ до судна по горизонтали

$$S = x_0 = 2279 \text{ м.}$$

Кривая, описывающая провисание каната в воде, приведена на рис. 5.

**Определение жесткости упругого элемента.** Для определения жесткости упругого элемента найдем значение горизонтальной составляющей натяжения каната в двух точках:  $H(x_1)$  и  $H(x_2)$ . Считая изменения  $x$  относительно малыми по сравнению с горизонтальной проекцией каната, для линеаризации жесткости упругого элемента определим натяжение в точках  $H(x_0)$  и  $H(x_0+50)$ , Н

$$H_1 = H(x_0) = F_{\text{тяг}}(2279) = 10101.$$

Из (7) для точки  $(x_0 + 50; a + 2000)$  определяем параметр цепной линии  $a$  ( $x_0 = 2279$  м)

$$a + 2000 = a \operatorname{ch} \frac{2329}{a} \rightarrow a = 1610.$$

Для поиска значения  $H_2(x) = H(x_0+50) = F_{\text{тяг}}(2329)$ , Н, при  $L_{\text{кан}} = 3194$  м и глубине моря 2000 м воспользуемся выражениями (9) и (10)

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \operatorname{sh} \left( \frac{2329}{1610} \right) = 2,01;$$

$$H_2 = \frac{V}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{20810}{2,01} = 10350.$$

Таким образом, жесткость упругого элемента будет составлять, Н/м

$$C_{\text{кан}} = \frac{\Delta F_{\text{тяг}}}{\Delta x} = \frac{H_2 - H_1}{\Delta x} = \frac{10350 - 10101}{50} = 4,98.$$

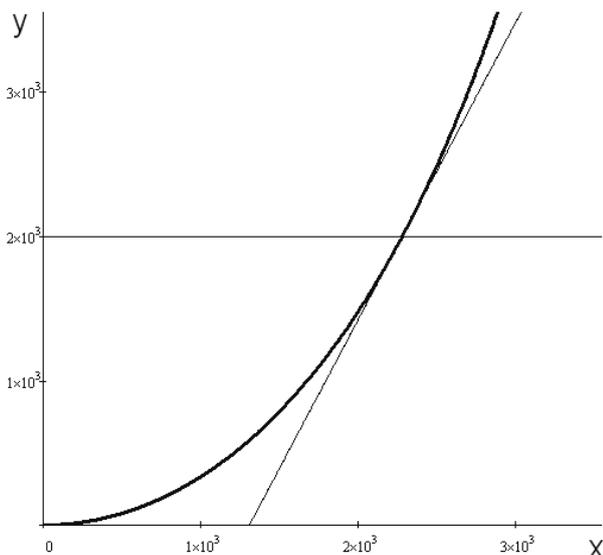


Рис. 5. Линия провисания каната в воде

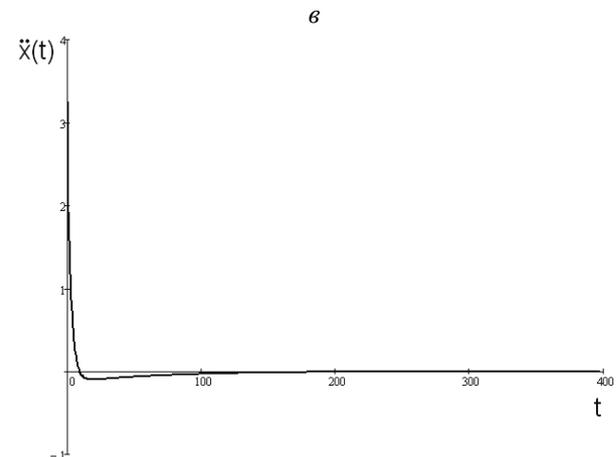
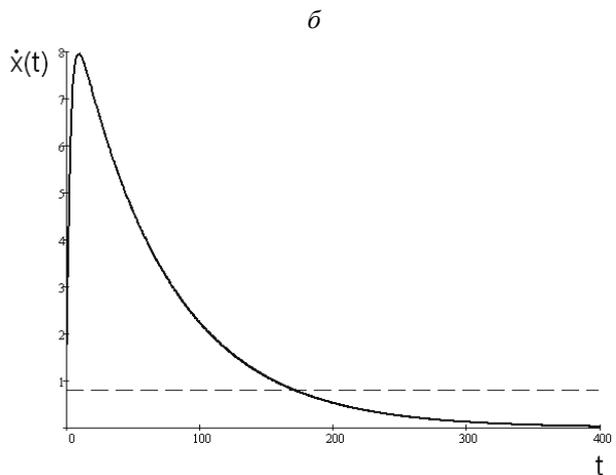
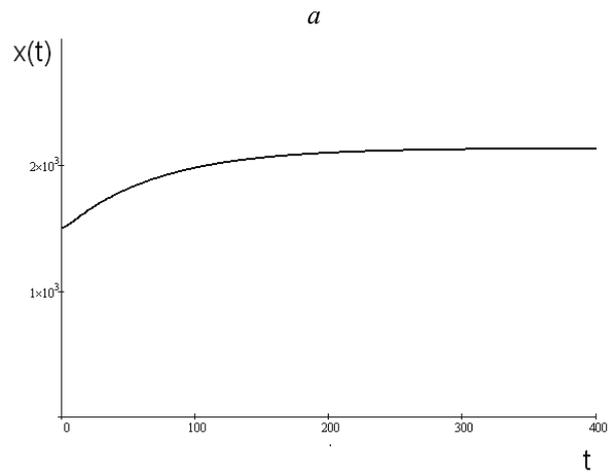


Рис. 6. Кинематические параметры ГЗУ, где  $t[s]$ ,  $x(t)[м]$ : а – график изменения перемещения ГЗУ во времени; б – график изменения скорости ГЗУ во времени; в – график изменения ускорения ГЗУ во времени

**Уравнение движения ГЗУ.** Согласно (27), уравнение движения имеет вид

$$\ddot{x} + 2n \cdot \dot{x} + k^2 \cdot x \cdot H(x) = G,$$

где:

$$2n = \frac{\beta}{G_{ГЗУ}} = \frac{339,15}{\frac{9300}{g}} = 0,36;$$

$$k^2 = \frac{C_{кан}}{G_{ГЗУ}} = \frac{4,98}{\frac{9300}{g}} = 0,005;$$

$$G = \frac{g}{G_{ГЗУ}} \cdot (T + \beta \cdot V + F_{рез}) = \\ = \frac{9,81}{9300} \cdot (8370 + 339,15 \cdot 0,8 + 1460) = 10,66;$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_v \cdot S = \frac{1}{2} \cdot 1,33 \cdot 1020 \cdot 0,5 = 339,15.$$

Поскольку система координат совмещена с судном, начальными условиями будут:

1)  $x(0) = 1500$  м (при времени, равном 0, перемещение равно 1500 м – рассматриваем динамику ГЗУ в диапазоне перемещений, близких к тем, по которым определялась жесткость упругого элемента);

2)  $\dot{x}(0) = 0,8$  м/с (при времени, равном 0, скорость ГЗУ относительно судна равна скорости судна).

Введя вышеприведенные начальные условия, мы положили, что ГЗУ начинает движение относительно донной поверхности при удалении от судна на 1500 м, что приблизительно может соответствовать реальным условиям, поскольку лишь на удалении 1500–2500 м появляется натяжение каната, способное преодолеть суммарное сопротивление копанью донного грунта и привести ГЗУ в движение. При этом, поскольку ГЗУ неподвижно относительно координат, привязанных к Земле, скорость ГЗУ относительно судна равна скорости судна относительно Земли. Определенное выше значение  $x_0$  и  $x_0 + 50$  попадает в указанный диапазон, поэтому жесткость упругого элемента для данного диапазона может быть принята в расчет.

Дифференциальное уравнение движения запишем в виде

$$\ddot{x} + 0,36 \cdot \dot{x} + 0,005 \cdot x \cdot H(x) = 10,66.$$

Решения данного уравнения в интервале времени  $s$ ,  $t \in [0; 400]$  приведены в графическом виде на рис. 6.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что: при заданных в таблице исходных данных, установившееся движение ГЗУ приобретает при удалении от судна на 2130 м; по истечении около 400с от начала движения ГЗУ, его скорость относительно судна стремится к 0 (абсолютная скорость ГЗУ стремится к скорости судна 0,8 м/с). Поскольку на графике  $x(t)$  (рис. 6) видно, что ГЗУ не меняет направления движения относительно судна, его относительная скорость не может превышать 0,8 м/с (поскольку абсолютная скорость ГЗУ после укладки на дно равна 0). Поэтому параметр ускорения необходимо рассматривать в момент времени, когда скорость ГЗУ становится меньше или равной 0,8 м/с –

при  $t = 171$  с с момента начала движения. Максимальное ускорение составляет 0,012 м/с<sup>2</sup>.

**Выводы.** Движение ГЗУ при глубоководном драгировании описывается уравнением движения для затухающих колебаний.

Приведенная методика исследования динамики грунтозаборного устройства при отборе морских донных отложений позволяет: 1) определить усилия, действующие на ГЗУ при грунтозаборе; 2) определить длину вытравки каната для создания тягового усилия, требуемого для осуществления процесса копания грунта; 3) рассчитать удаление ГЗУ от судна при грунтозаборе, что позволяет приблизительно определить затраты времени на выполнение технологических операций; 4) определить кинематические характеристики ГЗУ при работе на дне.

### Список литературы

1. Сукач М.К. Идентифікація робочих процесів глибоководних грунторозробних машин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д.т.н.: спец. 05.05.04 “Машины для земляных та дорожніх робіт”// Михайло Кузьмич Сукач; Київський нац. ун-т будівництва і архітектури. – Київ, 1999. – 33 с., включ. обкл.: іл. – Бібліогр.: с. 27 – 30.
2. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учеб. для вузов. Изд. 5-е перераб. и доп./ Подэрни Р.Ю. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 606.: с ил.
3. Каминер А.А. Гидромеханика в инженерной практике/ А.А. Каминер, О.М. Яхно. – К.: Техніка, 1987. – 175 с.: ил.

Представлено метод аналітичного дослідження динаміки грунтозаборного пристрою при відборі морських донних відкладень при циклічній технології ведення видобувних робіт. Визначено геометричні координати положення грунтозаборного пристрою при драгуванні. Рух грунтозаборного пристрою при заборі донних відкладень описується диференціальним рівнянням другого порядку з урахуванням непружних опорів, рішення якого дозволяє визначити його кінематичні характеристики при роботі на дні.

**Ключові слова:** *грунтозабірний пристрій, приведена жорсткість каната, глибоководний видобуток, динаміка, зусилля копання*

It is presented the method of the analytic research of the dredge's dynamics during the face operations with the marine sediments when the cyclical mining technology is used. Geometrical coordinates of dredge's position during dredging are ascertained. Movement of dredge during ground intake is described by the differential equation of the second degree in view of not elastic resistance. The solution of the equation allows defining its kinematic characteristics during operation at the bottom.

**Keywords:** *dredge, reduced rope's stiffness; deep-sea mining, dynamics; digging force*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.К. Младецьким. Дата надходження рукопису 14.03.11*