

**Література**

1 Андреев А.Ф., Бирюкова С.М., Требин И.С. Эколого-экономический подход к оценке эффективности проектных решений объектов газовой промышленности // Основные направления в решении проблемы экологического риска топливно-энергетического комплекса. – М., 1994. – С. 18-22.  
 2 Ходжа-Багирова А.З. Программные средства для расчета эколого-экономических показателей. // Основные направления в решении проблемы экологического риска топливно-энергетического комплекса. – М., 1994. – С. 222-235.  
 3 Лапин Е.В. Экологический менеджмент на промышленном предприятии: Дис... канд. экон. наук: 08.08.01. – Сумы, 1997. –181 с.

4 Семененко Т.А. Формирование экономических основ осуществления экологического аудита промышленных предприятий: Дис... канд. экон. наук: 05.14.04. – Сумы, 1998. – 179 с.  
 5 Виговська Г.П. Основні методичні принципи попередньої оцінки економічної ефективності використання відходів у ринкових умовах // Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов: Труды Международной научно-технической конференции (12-16 июня 2000 г.). У 3-х томах. – Харьков: ЧП «Сергеев». – Том 2. – 2000. – С. 306-311.  
 6 Охрана окружающей среды: модели социально-экономического прогноза / Под редакцией Ю.В. Овсиенко. – М.: Экономика, 1982. – 224 с.  
 7 Орфанова М.Мих., Орфанова М.Мик., Пустогов В.И. Оптимізація варіантів поводження з відходами методом визначення області еколого-економічного оптимуму // Екологія. – 2005. – № 1 (3). – С. 66-70.

УДК 622.243.2

**ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ГЕОФІЗИЧНОМУ КАБЕЛІ ПРИ ПІДЙМАННІ КОНТЕЙНЕРА З АПАРАТУРОЮ ІЗ СВЕРДЛОВИНИ**

<sup>1</sup> **Б.Д.Малько**, <sup>2</sup> **В.В.Гладун**

<sup>1</sup> ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42480  
 e-mail: ndingt@nung.edu.ua

<sup>2</sup> Полтавське управління геофізичних робіт, 36007, Полтава, Заводська 16,  
 тел. (0532) 567336, факс (0532) 568621

*Рассмотрены два случая подъема контейнера с аппаратурой на геофизическом кабеле с возможными его остановками. На основании аналитических исследований получены уравнения движения и натяжения кабеля, что позволяет разработать методы предупреждения обрыва кабеля во время подъема контейнера с учетом его внезапных остановок.*

*In the paper two cases of data container elevation on logging cable with it possible stops are considered. Base on analytical investigations the equations of cable motion and tightness are obtained. These equations allow developing methods of cable breakdown preventing by container elevation taking into account it sudden stops.*

Опускання і підймання контейнера з виміральною апаратурою при геофізичних дослідженнях свердловин виконується за допомогою кабеля, який намотується на барабан лебідки (рис. 1). Барабан 1 обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ . Діаметр барабана  $d$ . Початкова довжина кабеля 2 дорівнює  $l$ . Швидкість набігання кабеля 2 на барабан

$$V = \omega \cdot \frac{d}{2}$$

В процесі підймання мають місце раптові зупинки контейнера 3. Причиною цього може бути прихоплення контейнера в каверну або його прихоплення породою. При цьому кабель продовжує намотуватись на барабан. Це спричиняє його розтяг. Після того як розтяг кабеля досягнув значення  $y_1$ , а його натяг став рівним

$$F_H = C \cdot y_1 \tag{1}$$

контейнер виривається з каверни або прихоплення.

Жорсткість  $C$  кабеля визначається за формулою

$$C = \frac{E \cdot A}{l}, \tag{2}$$

де:  $E$  – модуль пружності кабеля;  
 $A$  – площа поперечного перерізу;  
 $l$  – довжина кабеля.

Час  $t_H$ , протягом якого відбувається натяг кабеля, дорівнює:

$$t_H = \frac{2 \cdot y_1}{\omega \cdot d}$$

Після відриву починається рух контейнера вгору. Розглянемо два випадки руху.

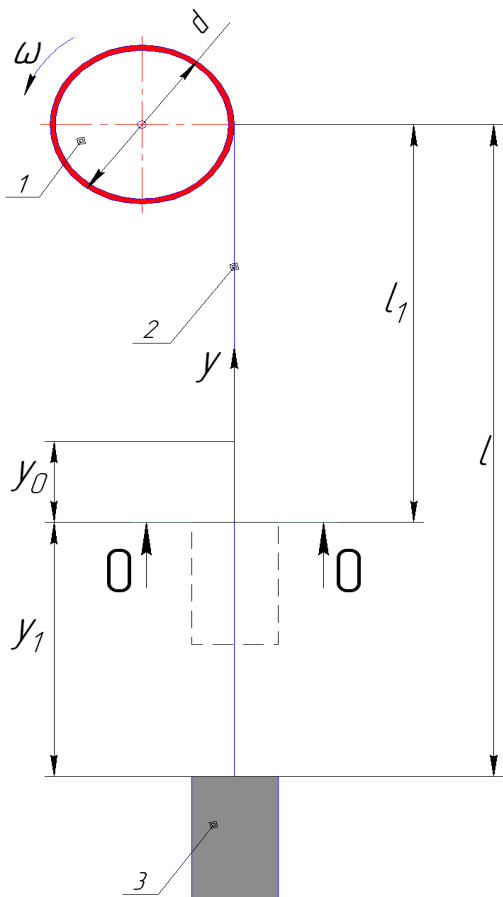


Рисунок 1 – Схема підймання контейнера із свердловини

Перший – простіший, без урахування опору рідини, яка знаходиться у свердловині.

Другий – з урахуванням в'язкого тертя при русі контейнера в глинистому розчині.

В першому випадку рівняння руху контейнера після відриву має вигляд

$$m \cdot \ddot{y} + C \cdot y = 0, \tag{3}$$

де  $m$  – зведена маса контейнера  $m_3$  і кабеля  $m_2$ :

$$m = m_3 + \lambda \cdot m_2 .$$

Тут  $\lambda$  коефіцієнт зведення маси кабеля [1], який залежить від співвідношення  $m_3/m_2$ .

Маса кабеля залежить від його довжини:

$$m_2 = \frac{q_2}{g} \cdot l ,$$

де

$q_2$  – вага 1 м кабеля. Графік зміни коефіцієнта  $\lambda$  побудований за даними [1] зображено на рис. 2.

Розв'язок рівняння (3) має вигляд

$$y = C_1 \cdot \sin p \cdot t + C_2 \cdot \cos p \cdot t$$

де  $p = \sqrt{\frac{C}{m}}$ .

Постійні інтегрування  $C_1, C_2$  знаходимо з початкових умов. При  $t = 0$   $y = -y_1, \dot{y} = 0$ , одержимо  $C_1 = 0, C_2 = -y_1$  і розв'язок рівняння (3) матиме вигляд

$$y = -y_1 \cdot \cos p \cdot t . \tag{4}$$

Час першого етапу руху за який контейнер пройде шлях  $y = y_1$  дорівнює:

$$t_1 = \frac{\pi}{p} . \tag{5}$$

Контейнер продовжить рух в межах початкової статичної деформації  $y_0$ , яка створена вагою контейнера і кабеля:

$$y_0 = \frac{1}{C} \cdot (m_3 \cdot g + 0.5 \cdot q \cdot l)$$

Час другого етапу руху за який контейнер подолає шлях  $y = y_0$  дорівнює:

$$t_2 = \frac{1}{p} \cdot \arccos\left(-\frac{y_0}{y_1}\right) - t_1 . \tag{6}$$

Швидкість контейнера наприкінці другого етапу

$$V_2 = y_1 \cdot p \cdot \sin[p \cdot (t_1 + t_2)] . \tag{7}$$

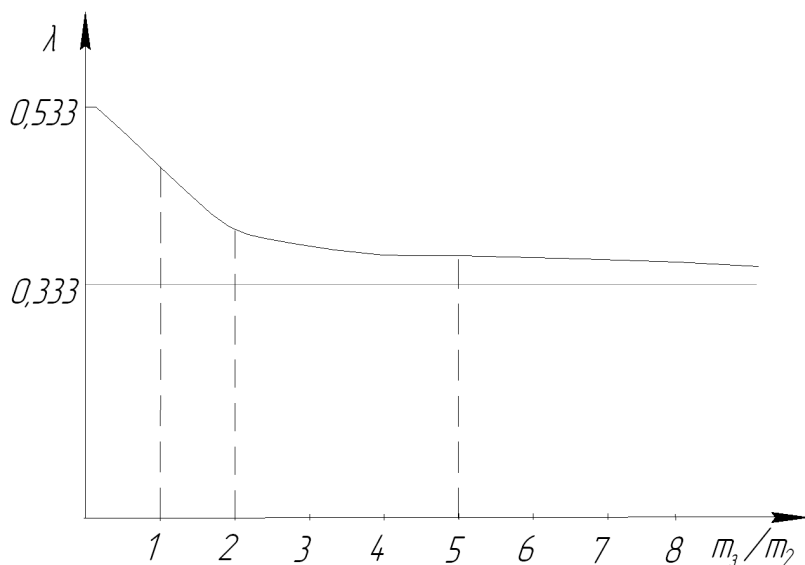


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта зведення маси кабелю від відношення  $m_3/m_2$

Якщо швидкість  $V_2$  контейнера більша від швидкості  $V = \omega \cdot \frac{d}{2}$  підймання кабеля бараба-

ном, то контейнер, починаючи з часу  $t_2$  почне вільний рух угору. Це пояснюється тим, що кабель має пружні властивості тільки в одному напрямку – на розтяг, і не має їх на стиск.

Рух контейнера на цьому етапі описується рівняннями

$$y = V_2 \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2},$$

$$V = V_2 - g \cdot t$$

Час цього етапу

$$t_3 = \frac{V}{g}.$$

Шлях контейнера

$$y_3 = \frac{V_2}{2 \cdot g}.$$

Отже, загальний час руху контейнера угору, здійсненого за рахунок вивільнення енергії пружної деформації кабеля:

$$t_c = t_1 + t_2 + t_3. \quad (8)$$

Шлях контейнера:

$$h = y_1 + y_2 + y_3. \quad (9)$$

Довжина кабеля, що намотається на барабан за час  $t_c$ .

$$h_k = \omega \cdot \frac{d}{2} \cdot t_c. \quad (10)$$

Якщо  $h > h_k$ , то після зупинки у верхньому положенні, яке відповідає координаті  $y=h$ , почнеться рух контейнера вниз до тих пір, поки кабель одержить певний натяг. Час падіння  $t_4$  до початку натягу кабеля визначимо з рівняння:

$$h - \omega \cdot \frac{d}{2} \cdot (t_c + t_4) = \frac{g \cdot t_4^2}{2}.$$

Розв'язок цього рівняння дає:

$$t_4 = \frac{\omega \cdot d}{2 \cdot g} + \sqrt{\left(\frac{\omega \cdot d}{2 \cdot g}\right)^2 + \frac{2}{g} \cdot \left(h - \frac{\omega \cdot d}{2}\right)}. \quad (11)$$

Швидкість контейнера в момент початку натягу кабеля:

$$V_n = g \cdot t_4.$$

Починаючи з цього часу контейнер при своєму русі починає сприймати сили пружності кабеля.

Рівняння руху буде аналогічне попередньому:

$$y = C_3 \cdot \sin p \cdot t + C_4 \cdot \cos p \cdot t.$$

Постійні інтегрування визначаються з нових початкових умов. Відлік часу розпочнемо з моменту, коли знову починають діяти сили пружності кабеля, тобто при  $t=0$   $y=y_0$ ,

$\dot{y} = -V_n$ , маємо  $C_4 = y_0$ ,  $C_3 = \frac{-V_n}{p}$ , і рівняння руху набуде вигляду

$$y = -\frac{V_n}{p} \cdot \sin p \cdot t + y_0 \cdot \cos p \cdot t \quad (12)$$

або

$$y = A \cdot \sin(p \cdot t + \alpha),$$

$$\text{де: } A = \sqrt{\frac{V_n^2}{p^2} + y_0^2}, \quad \alpha = \text{arctg}\left(\frac{-y_0 \cdot p}{V_n}\right).$$

Максимальна деформація кабеля буде при

$$\text{tgp} \cdot t_5 = -\frac{V_n}{y_0 \cdot p}$$

або

$$t_5 = \frac{1}{p} \cdot \text{arctg}\left(-\frac{V_n}{y_0 \cdot p}\right)$$

і матиме значення:

$$y_{n,\text{max}} = y_0 \cdot \cos(p \cdot t_5) - \frac{V_n}{p} \cdot \sin(p \cdot t_5)$$

або

$$y_{n,\text{max}} = \cos(p \cdot t_5) \cdot \left(y_0 - \frac{V_n^2}{y_0 \cdot p^2}\right). \quad (13)$$

Далі продовжуються коливання за законом (12).

Натяг кабеля на кожному етапі руху контейнера буде різним. Графік його зміни зображено на рис. 3. Тут

$$F_0 = C \cdot y_0 = m_3 \cdot g + 0.5 \cdot q \cdot l -$$

натяг під дією ваги контейнера і кабеля.

Протягом часу  $t_n$  здійснюється натяг кабеля при нерухомому контейнері. На етапі  $(t_1+t_2)$  натяг зменшується за законом:

$$F_{12} = -C \cdot y_1 \cdot \cos p \cdot t, \quad \langle t_n \leq t \leq t_1 + t_2 \rangle. \quad (14)$$

На етапі  $(t_3+t_4)$  натяг відсутній, оскільки контейнер здійснює вільний рух. На етапі  $t_5$  і далі натяг кабеля є змінним і коливається відносно  $F_0$ :

$$F_5 = F_0 - A \cdot C \cdot \sin(p \cdot t + \alpha). \quad (15)$$

Розглянемо тепер другий випадок руху контейнера з урахуванням дії в'язкого тертя. В цьому випадку рівняння руху контейнера після відриву матиме вигляд:

$$m \cdot \ddot{y} + \mu \cdot \dot{y} + C \cdot y = 0.$$

Тут  $\mu$  – коефіцієнт в'язкого тертя.

Зведемо рівняння до вигляду:

$$\ddot{y} + 2 \cdot n \cdot \dot{y} + p^2 \cdot y = 0, \quad (16)$$

$$\text{де } n = \frac{\mu}{2m}.$$

Запишемо характеристичне рівняння.

$$k^2 + 2 \cdot n \cdot k + p^2 = 0.$$

Корені цього рівняння

$$k_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - p^2}.$$

У випадку, якщо в'язке тертя незначне і  $p > n$ , то корені комплексні різні і розв'язок (16) має вигляд:

$$y = e^{-n \cdot t} \cdot (C_5 \cdot \sin(p_1 \cdot t) + C_6 \cdot \cos(p_1 \cdot t)), \quad (17)$$

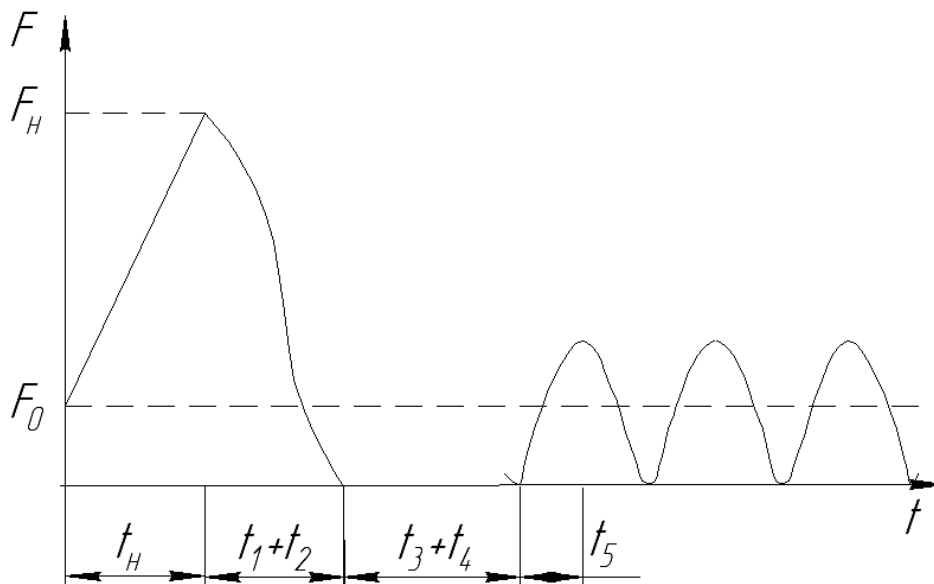


Рисунок 3 — Графік зміни натягу кабелю

де  $p_1 = \sqrt{p^2 - n^2}$ .

З початкових умов знаходимо:

$$C_5 = -\frac{n}{p_1} \cdot y_1, \quad C_6 = -y_1.$$

Зведемо рівняння (17) до вигляду:

$$y = A \cdot e^{-nt} \cdot \sin(p_1 t + \alpha), \quad (18)$$

де:  $A = \sqrt{C_5^2 + C_6^2} = \sqrt{\frac{n_2 \cdot y_1^2}{p^2 - n^2} + y_1^2},$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\sqrt{p^2 - n^2}}{n}\right).$$

З теорії механічних коливань [2] відомо, що сили тертя несуттєво впливають на період коливань і тому можна прийняти час, за який контейнер переміститься угору на відстань  $y_1 + y_0$ , рівним

$$t_{12} = t_1 + t_2 = \frac{1}{p} \cdot \arccos\left(-\frac{y_0}{y_1}\right).$$

Швидкість в кінці цього етапу

$$V_2 = A \cdot e^{-n \cdot t_{12}} \times$$

$$\times [p_1 \cdot \cos(p \cdot t_{12} + \alpha) - n \cdot \sin(p \cdot t_{12} + \alpha)].$$

Як і в попередньому випадку, якщо  $V_2 > V_1$ , то контейнер, починаючи з часу  $t_{12}$ , здійснює вільний рух угору.

Рівняння вільного руху з урахуванням сили в'язкого тертя:

$$m \cdot \ddot{y} = -m \cdot g - \mu \cdot \dot{y}.$$

Після інтегрування отримаємо:

$$m \cdot \dot{y} = C_7 - m \cdot g - \mu \cdot y. \quad (19)$$

З початкових умов при  $t=0, y=0, \dot{y}=V_2$  знаходимо  $C_7 = m \cdot V_2$ .

Перепишемо рівняння (19) у вигляді:

$$\dot{y} + \frac{\mu \cdot y}{m} = V_2 - g \cdot t. \quad (20)$$

Розв'язок цього рівняння, з врахуванням початкових умов, дає:

$$y = \left(\frac{m \cdot V_2}{\mu} + \frac{g \cdot m^2}{\mu^2}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu}{m} \cdot t}\right) - \frac{g \cdot m}{\mu} \cdot t. \quad (21)$$

Швидкість руху:

$$\dot{y} = \left(V_2 + \frac{g \cdot m}{\mu}\right) \cdot e^{-\frac{\mu}{m} \cdot t} - \frac{g \cdot m}{\mu}. \quad (22)$$

Час  $t_3$  до зупинки контейнера у верхньому положенні знаходимо з умови  $\dot{y} = 0$ :

$$t_3 = \frac{\mu}{m} \cdot \ln\left(\frac{\mu \cdot \left(V_2 + \frac{g \cdot m}{\mu}\right)}{g \cdot m}\right). \quad (23)$$

Максимальне переміщення контейнера

$$y_{z\max} = h = \left(\frac{m \cdot V_2}{\mu} + \frac{g \cdot m^2}{\mu^2}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu}{m} \cdot t_3}\right) - \frac{g \cdot m}{\mu} \cdot t_3.$$

Починаючи з цього часу контейнер рухається вниз. Рівняння руху має вигляд:

$$m \cdot \ddot{y} = -m \cdot g + \mu \cdot \dot{y}$$

Інтегруємо це рівняння:

$$m \cdot \dot{y} = -m \cdot g \cdot t + \mu \cdot y + C_8. \quad (24)$$

З початкових умов при  $t=0, y=h, \dot{y}=0$  знаходимо  $C_8 = -\mu \cdot h$ .

Розв'язок рівняння (24) дає:

$$y = h + g \cdot \left(t + \frac{m}{\mu}\right) \cdot \frac{m}{\mu} + C_9 \cdot e^{\frac{\mu}{m} \cdot t}.$$

Швидкість падіння контейнера:

$$\dot{y} = g \cdot \frac{m}{\mu} + C_9 \cdot \frac{\mu}{m} \left( e^{\frac{\mu}{m}t} \right).$$

Використовуючи початкові умови знаходимо:

$$C_9 = -g \cdot \frac{m^2}{\mu^2}$$

Остаточно одержимо:

$$\dot{y} = g \cdot \frac{m}{\mu} \cdot \left( 1 - e^{\frac{\mu}{m}t} \right); \quad (25)$$

$$y = h + g \cdot \left( t + \frac{m}{\mu} \right) \cdot \frac{m}{\mu} + g \cdot \frac{m^2}{\mu^2} \cdot e^{\frac{\mu}{m}t}. \quad (26)$$

Довжина кабеля, яка намотається на барабан лебідки, за час вільного руху контейнера угору  $t_3$  і вниз  $t_4$  дорівнює  $S = \omega \cdot \frac{d}{2} \cdot (t_3 + t_4)$ .

Шлях вільного падіння контейнера до початку натягування кабеля:

$$h_1 = h - S = h - \omega \cdot \frac{d}{2} \cdot (t_3 + t_4).$$

Підставивши  $h_1$  в ліву частину рівняння (26) зведемо його до вигляду:

$$g \cdot \frac{m^2}{\mu^2} \cdot e^{\frac{\mu}{m}t} = \left( g \cdot \frac{m}{\mu} + \omega \cdot \frac{d}{2} \right) \cdot t_4 + \omega \cdot \frac{d}{2} \cdot t_3 + g \cdot \frac{m^2}{\mu^2}.$$

Визначити звідси  $t_4$  можна тільки числовим або графічним методами.

Швидкість контейнера в початковий момент часу натягу кабеля:

$$V_4 = g \cdot \frac{m}{\mu} \cdot \left( 1 - e^{\frac{\mu}{m}t_4} \right).$$

Починаються коливання контейнера за законом, аналогічним (17), тільки з іншими початковими умовами та іншими постійними інтегрування. За рахунок в'язкого тертя ці коливання швидко згаснуть.

Якщо рідина в свердловині досить густа, а жорсткість кабеля, мала то має місце нерівність  $n > p$ .

В цьому випадку відсутні коливання контейнера після відриву. Його рух описується рівнянням

$$y = A \cdot e^{-nt} \cdot sh\left(\sqrt{n^2 - p^2} \cdot t + \alpha\right) \quad (27)$$

і називається аперіодичним.

Умову аперіодичного руху перепишемо у вигляді:

$$\frac{\mu}{2 \cdot m} > \sqrt{\frac{C}{m}},$$

або, після перетворень

$$C < \frac{\mu^2}{4 \cdot m}.$$

З урахуванням (2) одержимо:

$$l > \frac{4 \cdot E \cdot A \cdot m}{\mu^2} = l_a. \quad (28)$$

Отже, якщо довжина кабеля  $l$  перевищує значення  $l_a$ , то рух контейнера після відриву не матиме вільних коливань.

Одержані рівняння руху і натягу кабеля дають можливість розробити методи запобігання обриву кабеля в процесі підймання контейнера з врахуванням його раптових зупинок.

### Література

- 1 Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 296 с.
- 2 Пановко Я.Г. Введение в теория механических колебений. – М.: Наука, 1971. – 240 с.