

УДК 622.673

© В.П. Неплях, 2017

**В.И. ДВОРНИКОВ**

д-р техн. наук

НИИГМ им. М.М. Федорова, г. Донецк

**В.П. НЕПЛЯХ**

канд. техн. наук, заведующий сектором

НИИГМ им. М.М. Федорова, г. Донецк

e-mail: neplyah2017@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ НАКЛОННОГО СТВОЛА ШАХТЫ НА ИСТИРАНИЕ КАНАТОВ

*Статья посвящена проблеме истирания канатов в ходе эксплуатации подъемных установок. В качестве способа снижения истирания канатов предлагаются расчеты профилирования рельсового пути в верхней части горной выработки.*

Ключевые слова: ПОДЪЕМНЫЕ УСТАНОВКИ, ИСТИРАНИЕ КАНАТА, ПРОФИЛЬ СТВОЛА, УГОЛ НАКЛОНА

Извечной проблемой эксплуатации подъемных установок в наклонном стволе является интенсивное истирание канатов. Нередко их срок службы исчисляется считанными месяцами, а если учесть, что длины наклонных стволов составляют порядка 1000 м (имеются стволы длиной до 2000 м), то издержки на закупку новых канатов выливаются для производителей в довольно внушительную сумму [1].

Применяемые в настоящее время способы уменьшения истирания канатов носят, если можно так сказать, пассивный характер: навешиваются канаты с повышенным диаметром внешних проволок, в том числе канаты из пластически обжатых прядей, используются путевые ролики и др. Но все эти меры не в состоянии устранить основной фактор – канат практически по всей своей длине лежит на почве в силу свойств гибкой нити в гравитационном поле Земли.

На рисунке 1 показано, как мог бы вести себя канат при подъеме сосуда вдоль прямоли-

нейного наклонного пути (пунктирная линия на рисунке), если вообразить, что посередине между рельсами вырыта плоская траншея для свободного размещения каната (кстати, это можно было бы рассматривать как один из пассивных способов борьбы с истиранием, если бы не то обстоятельство, что в таком случае глубина траншеи в средней части доходит до нескольких десятков метров).

На рисунке 1  $H$  и  $B$  – вертикальное и горизонтальное расстояния от точки подвеса сосуда в начальном положении до оси подъемной машины (или копрового шкива);  $\varphi$  – угол наклона ствола;  $\alpha_0$  – угол наклона каната в начальном положении сосуда,  $L_0$  – его начальная длина;  $P_0$  – реакция натяжения каната у сцепного устройства;  $mg$  – вес сосуда;  $N$  – суммарная нормальная реакция рельсов наклонного пути;  $F_T$  – суммарная сила трения качения ходовых колес по рельсам;  $\alpha$  и  $P$  – текущий угол наклона каната и его натяжение в произвольной точке;  $qg$  – вес единицы длины каната (для сокращения записи здесь принято  $q=q_r$ );

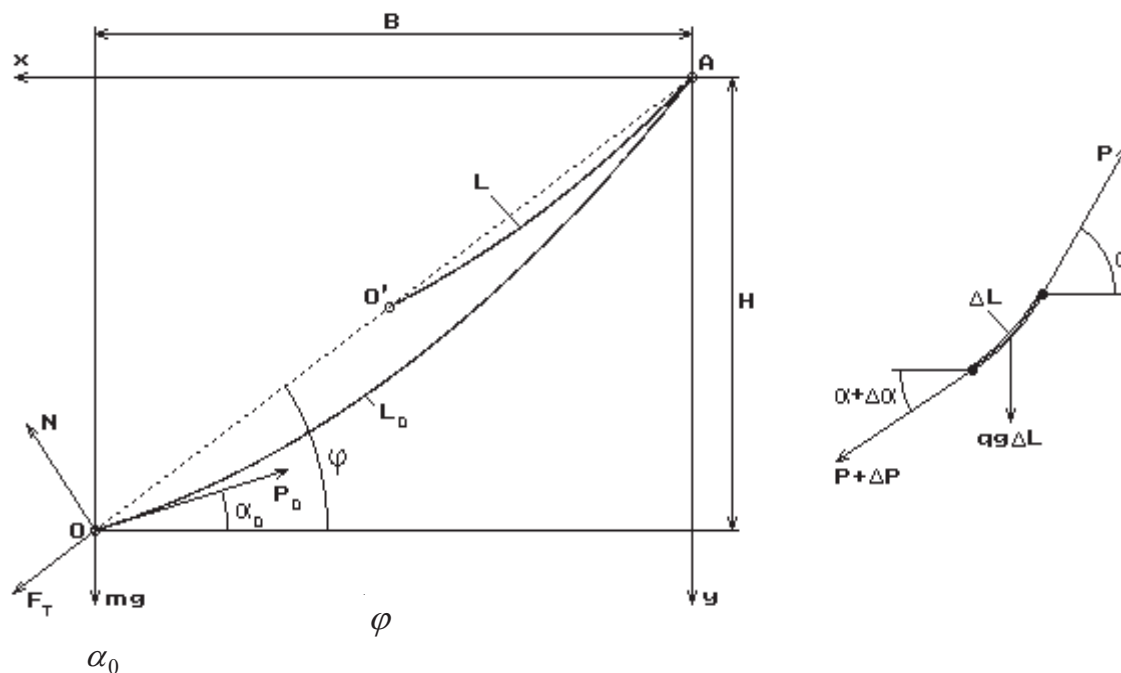


Рисунок 1 – К выводу уравнений статической формы провисающего каната

$x, y$  – принятая координатная система отсчета;  $O'$  – некоторое промежуточное положение сосуда в стволе, при котором длина каната равна  $L$  (вначале предполагается, что путь является прямолинейным).

На рисунке 1 справа изображена схема действующих сил на элементарный отрезок каната длиной  $\Delta L$ , где  $\Delta P$  и  $\Delta\alpha$  – соответственно приращение усилия в конце рассматриваемого отрезка и приращение его угла наклона (указанные приращения являются алгебраическими величинами). При помощи приведенной схемы условия равновесия отрезка в проекциях всех сил на оси  $x, y$  запишем в виде

$$(P + \Delta P) \cos(\alpha + \Delta\alpha) - P \cos \alpha = 0,$$

$$(P + \Delta P) \sin(\alpha + \Delta\alpha) - P \sin \alpha = -qg\Delta L.$$

При  $\Delta L \rightarrow 0$  в результате необходимых преобразований данные выражения сводятся к дифференциальным уравнениям вида

$$\frac{dP}{dL} \cos \alpha - P \frac{d\alpha}{dL} \sin \alpha = 0,$$

$$\frac{dP}{dL} \sin \alpha + P \frac{d\alpha}{dL} \cos \alpha = -qg,$$

откуда следует, что

$$\frac{d}{dL} (P \cos \alpha) = 0, \quad \frac{d}{dL} (P \sin \alpha) = -qg,$$

следовательно, общие решения этих уравнений выглядят следующим образом:

$$P \cos \alpha = C_1, \quad P \sin \alpha = C_2 - qgL, \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования.

Из (1) получим

$$\operatorname{tg} \alpha = (C_2 - qgL) / C_1. \quad (2)$$

В частности, при помощи (1) с подстановкой  $L=L_0$  находим

$$P_0 \cos \alpha_0 = C_1, \quad P_0 \sin \alpha_0 = C_2 - qgL_0. \quad (3)$$

Из (1) виден физический смысл констант  $C_1$  и  $C_2$  – это проекции натяжения каната на оси  $x$  и  $y$  непосредственно у копрового шкива, то есть при  $L=0$ . В то же время, как следует из (3),  $C_1$  и  $C_2 - qgL_0$  – это проекции натяжения каната на оси  $x$  и  $y$  непосредственно у подъемного сосуда, то есть при  $L=L_0$ . Значит, горизонтальная составляющая натяжений каната во всех его точках остается постоянной [2].

Константы  $C_1$  и  $C_2$  получим, рассматривая условия равновесия сосуда в проекциях на оси  $x, y$  всех действующих на него сил:

$$N \sin \varphi + F_T \cos \varphi - P_0 \cos \alpha_0 = 0,$$

$$N \cos \varphi - F_T \sin \varphi + P_0 \sin \alpha_0 = mg.$$

А так как  $F_T = fN$ , где  $f$  – коэффициент трения качения колес сосуда по рельсам (см. в связи с этим формулы (2, 8, 9) и (2, 8, 10), то

$$N(\sin \varphi + f \cos \varphi) - P_0 \cos \alpha_0 = 0,$$

$$N(\cos \varphi - f \sin \varphi) + P_0 \sin \alpha_0 = mg.$$

Рассматривая эти соотношения как систему алгебраических уравнений относительно неизвестных  $N$  и  $P_0$ , получим

$$\begin{aligned} N &= mg \frac{\cos \alpha_0}{\cos(\alpha_0 - \varphi) - f \sin(\alpha_0 - \varphi)}, \\ P_0 &= mg \frac{\sin \varphi + f \cos \varphi}{\cos(\alpha_0 - \varphi) + f \sin(\alpha_0 - \varphi)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношение для  $P_0$  из (4) теперь подставим в условия (3), с помощью которых найдем

$$\begin{aligned} C_1 &= mg \frac{(\sin \varphi + f \cos \varphi) \cos \alpha_0}{\cos(\alpha_0 - \varphi) - f \sin(\alpha_0 - \varphi)}, \\ C_2 &= mg \frac{(\sin \varphi + f \cos \varphi) \sin \alpha_0}{\cos(\alpha_0 - \varphi) + f \sin(\alpha_0 - \varphi)} + qgL_0. \end{aligned} \quad (5)$$

В формулах (5) начальный угол  $\alpha_0$  и начальная длина каната  $L_0$  остаются пока неизвестными величинами, но их можно однозначно определить изложенным ниже способом.

В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1, как видно, имеют место дифференциальные равенства  $dx = dL \cos \alpha$ ,  $dy = dL \sin \alpha$ , в силу чего и с использованием (2) текущие координаты провисающего каната определяются выражениями:

$$\begin{aligned} x(L) &= \int_0^L \frac{C_1}{\sqrt{(C_1)^2 + (C_2 - qgL)^2}} dL, \\ y(L) &= \int_0^L \frac{C_2 - qgL}{\sqrt{(C_1)^2 + (C_2 - qgL)^2}} dL. \end{aligned}$$

Элементарное интегрирование в данных выражениях приводит к следующим результатам:

$$\begin{aligned} x(L) &= \frac{C_1}{qg} \ln \left[ \frac{\sqrt{C_1^2 + (C_2 - qgL)^2} + qgL - C_2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2} - C_2} \right], \\ y(L) &= \frac{1}{qg} \left[ \sqrt{C_1^2 + C_2^2} - \sqrt{C_1^2 + (C_2 - qgL)^2} \right], \end{aligned}$$

что представляют собой уравнения *цепной линии* в параметрической форме (в данном случае параметром, или так называемой *лон-*

*гальной* координатой, является текущая длина каната  $L \in [0, L_0]$ ). При подстановке сюда  $L = L_0$  должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} &= \frac{C_1}{qg} \ln \left[ \frac{\sqrt{C_1^2 + (C_2 - qgL_0)^2} + qgL_0 - C_2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2} - C_2} \right], \\ &= \frac{1}{qg} \left[ \sqrt{C_1^2 + C_2^2} - \sqrt{C_1^2 + (C_2 - qgL_0)^2} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $B$  и  $H$  – координаты сосуда в начале движения (см. рисунок 1). Эти условия с учетом определений (5) для констант  $C_1$  и  $C_2$  образуют систему двух трансцендентных уравнений относительно параметров  $\alpha_0$  и  $L_0$ .

Это, скажем так, формальный подход. В действительности же местонахождение сосуда на наклонной плоскости с заданным углом наклона  $\varphi$  определяется уравнениями равновесия, и поэтому заранее нельзя считать координаты  $B$  и  $H$  известными. Известной и вполне определенной величиной можно считать только начальную длину каната  $L_0$ , а одну из координат  $B$  и  $H$  требуется определить. Но в силу схемы, приведенной на рисунке 1,  $H = B \tan \varphi$ , то есть фактически два соотношения системы (6) эквивалентны одному уравнению

$$\begin{aligned} &\frac{\sqrt{C_1^2 + C_2^2} - \sqrt{C_1^2 + (C_2 - qgL_0)^2}}{C_1} = \\ &\ln \left[ \frac{\sqrt{C_1^2 + (C_2 - qgL_0)^2} + qgL_0 - C_2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2} - C_2} \right] \varphi, \end{aligned} \quad (7)$$

из которого и определяется угол  $\alpha_0$ . В результате определения угла  $\alpha_0$  при заданной начальной длине каната  $L_0$ , координаты  $B$  и  $H$  найдем при помощи системы (6).

Теперь обратимся к вопросу построения переменного профиля пути. Одним из очевидных и «напрашивающихся» способов построения такого профиля является требование равенства угла наклона трассы  $\varphi$  углу наклона оси каната у прицепного устройства  $\alpha_0$  во всех точках ствола (то есть при условии  $\varphi = \alpha_0$ ), благодаря чему формулы (5) приобретут вид:

$$\begin{aligned} C_1 &= mg(\sin \alpha'_0 + f \cos \alpha'_0) \cos \alpha'_0, \\ C_2 &= mg(\sin \alpha'_0 + f \cos \alpha'_0) \sin \alpha'_0 + qgL'_0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\alpha_0$  и  $L_0$  означены «штрихами», чтобы отличать их от соответствующих величин, которые они принимают в начале движения. Тогда (2) для тангенса угла наклона запишем как

$$\alpha(L) = \frac{mg(\text{н} \alpha'_0 + f \alpha'_0) \text{н} \alpha'_0 + qg(L'_0 - L)}{mg(\text{н} \alpha'_0 + f \alpha'_0) \alpha'_0} \quad (9)$$

В данном представлении  $L'_0 = L_0 - L_H$ , где  $L_H$  – это навитая на барабан длина каната от начала движения снизу вверх, если считать, что  $L_0$  – начальная длина каната, как было ранее обусловлено. Заметим, что в (2, 8, 9) при каждом «новом» значении  $L_H$  параметр  $\alpha'_0$  вычисляется как корень трансцендентного уравнения (7) с учетом представлений (8).

Таким образом, переменный профиль ствола в принятой концепции с использованием дифференциальных равенств  $dX = dL \cos \alpha'_0$ ,  $dY = dL \sin \alpha'_0$  определяется как

$$= \int_0^{L'_0} L \alpha'_0, \quad = \int_0^{L'_0} L \text{н} \alpha'_0. \quad (10)$$

Следует сказать, что изложенный здесь подход к определению профиля ствола оказывается неприемлемым, так как в начале движения сосуда канат все же «ложится» на почву. Это обстоятельство строго доказывается, но в данном случае ограничимся так называемым численным экспериментом, результаты которого представлены на рисунке 2. Здесь кривая 1 – это линия свободного провиса каната при нахождении сосуда в точке  $O$ , в которой угол наклона рельсового пути равен углу наклона каната. Кривая 2 является

линией переменного профиля, построенного по принятому правилу. Как видно, в данном случае канат практически по всей своей длине располагается по почве выработки, хотя по мере продвижения сосуда вверх зона контакта постепенно уменьшается, исчезая вовсе при перемещении сосуда примерно на четверть длины ствола.

Тем не менее описанный принцип можно взять за основу применительно для начальной точки ствола (точка, в которой определяется первоначальный угол наклона), и затем профиль пути принять эквидистантным линии свободного провисания каната (кривая 1 на рисунке 2). Разумеется, в этом случае на всем пути движения сосуда, за исключением точки, угол наклона каната у прицепного устройства будет несколько превышать угол наклона криволинейного профиля ствола, но этим расхождением можно пренебречь.

Теоретические исследования формы провисания каната в наклонном стволе (траншее) подтверждаются результатами численного моделирования на ЭВМ с помощью диалоговой программы, разработанной авторами этой статьи. Анализ расчетов [3] для реальных подъемных установок доказывает хорошую сходимость результатов. Профилирование рельсового пути в верхней части горной выработки позволяет снизить истирание каната о почву и уменьшить динамические нагрузки в канатах за счет свободного провисания каната и образования дополнительной жесткости (податливости) при его нагружении.

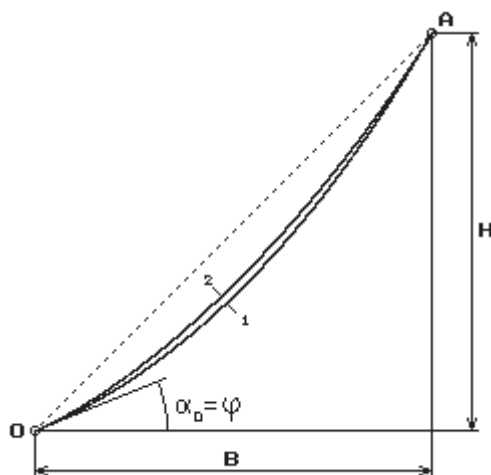


Рисунок 2 – К расчету переменного профиля наклонного пути

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неплях В.П. Исследование работоспособности и повышение эффективности эксплуатации канатов подъемных установок шахтных наклонных стволов / Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Свердловск: Горный институт им. В.В. Вахрушева, 1982.
2. Патент на полезную модель SU 1705219 СССР. Энергосберегающий подъемник Непляха-Дворникова / Неплях В.П., Дворников В.И., заявл. 09.02.1990; опубл. 15.01.1992; Бюл. № 2.
3. Дворников В.И., Неплях В.П. Некоторые вопросы создания и исследования энергосберегающей системы рудничного наклонного подъема // Сборник научных трудов НИИГМ им. М.М. Федорова. – Вып. 3. – Донецк, 1993.

UDC 622.673

© V.P. Nepliyakh, 2017

**V.I. Dvornikov**

Doctor of Technical Sciences

M.M. Fedorova NIIGM, Donetsk

**V.P. Nepliyakh**

Candidate of Technical Sciences, Head of Department

M.M. Fedorova NIIGM, Donetsk

e-mail: nepliyah2017@yandex.ru

### THE IMPACT OF INCLINED SHAFT ON WIRE ROPE ABRASION

*The paper presents the problem of wire rope abrasion during the work of lifting equipment. The calculation of rail track profiling in the upper part of the mine workings is offered as the method of reducing wire rope abrasion.*

Key words: UNDERGROUND EQUIPMENT, ROPE ABRASION, INCLINED SHAFT, ANGLE OF HADE

### REFERENCES

1. Nepliyakh V.P. Issledovanie rabotosposobnosti i povyshenie effektivnosti jekspluatatsii kanatov podemnyh ustanovok shahtnyh naklonnyh stvolov (Research of working capacity and increase in efficiency of the work of hoisting units in inclined shaft) / Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Sverdlovsk: Gornyj institut im. V.V. Vahrusheva, 1982.
2. Patent na poleznuju model SU 1705219 SSSR. Jenergosberegajushhij pod'emnik Nepljaha-Dvornikova (Energy-saving lifting equipment of Nepliyakha-Dvornikova) / Nepliyah V.P., Dvornikov V.I., zayavl. 09.02.1990; opubl. 15.01.1992; Bjul. № 2.
3. Dvornikov V.I., Nepliyah V.P. Nekotorye voprosy sozdaniya i issledovaniya jenergosberegajushhej sistemy rudnichnogo naklonnogo pod'ema (Some issues of creating and researching an energy-saving mine pit system) // Sbornik nauchnyh trudov NIIGM im. M.M. Fedorova. Donetsk, 1993. Iss. 3.