

## ОБ УПРУГОМ И ПЛАСТИЧЕСКОМ УДЛИНЕНИИ ПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ

Н. И. КЛЫКОВ

(Представлено научным семинаром электромеханических кафедр горного факультета)

На рудничных подъемах получили распространение стальные проволочные канаты. Материал проволок каната обладает упруго-пластическими свойствами. Кроме того, под действием растягивающих нагрузок в канате происходит некоторое взаимное перемещение проволок, канат получает дополнительное пластическое удлинение — „вытяжку“, в результате которой с течением времени необходимо производить регулирование длины каната. Правильное решение вопроса регулирования длины каната связано с необходимостью в определении численных значений величин упругой и пластической деформации каната. Значения этих величин следует учитывать и при решении других задач: установления критерия прочности каната в производственных условиях, более точное определение длины навешиваемого каната и т. д.

В работе производится анализ основных факторов, влияющих на величину пластической и упругой деформации каната.

Общий вид диаграммы растяжения отдельных стальных проволок каната представлен на рис. 1. До точки  $A$  на диаграмме, соответствующей пределу упругости, материал подчиняется закону Гука. Участок  $OAA_1$  является зоной упругих деформаций. Вправо от линии  $AA_1$  находится зона упруго-пластических деформаций материала.

Как показывают наблюдения, необтянутый подъемный канат наряду с упругим удлинением получает пластическое удлинение при напряжениях, значительно меньших предела упругости материала проволок. Это объясняется конструктивными особенностями подъемного каната. Следовательно, с достаточной точностью можно считать, что необтянутый канат работает в зоне упруго-пластических деформаций.

Условно фактическую диаграмму растяжения каната с достаточной для практических целей точностью можно заменить полигональной,

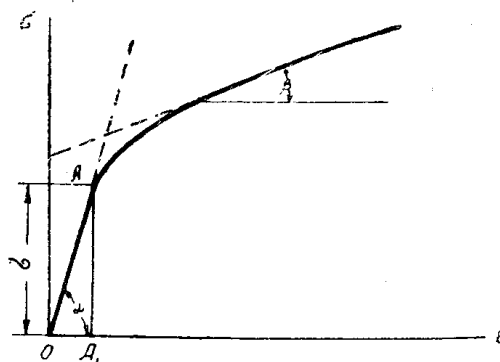


Рис. 1. Диаграмма растяжения материала каната.

состоящей из двух наклонных участков (рис. 2). Ввиду того, что необтянутый канат работает в зоне упруго-пластических деформаций, начало координат переносим в точку  $O_1$ . По вертикальной оси откладываем приведенные напряжения, по горизонтальной—значения относительных деформаций каната. Обозначим на диаграмме через  $\alpha$  и  $\beta$  углы наклона линий к горизонтальной оси—соответственно для упругой и упруго-пластических зон. Величину  $E'_k = \text{tg } \beta$  назовем модулем общей деформации каната, в отличие от модуля упругости каната  $E_k = \text{tg } \alpha$  [1, стр. 308, 312].

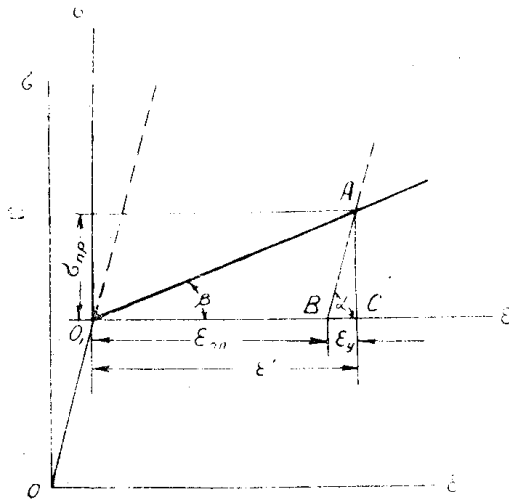


Рис. 2. Спрявленная диаграмма растяжения каната.

На рудничных подъемных установках чаще всего производится навеска новых, еще необтянутых канатов. Начальное пластическое удлинение каната соответствует периоду навески и первоначальной регулировки длины каната. Этот период по сравнению со сроком эксплуатации каната незначителен, поэтому фактор времени в расчет не принимается.

В соответствии с рис. 2 величина относительной начальной пластической деформации

$$\varepsilon_{\text{нач}} = \frac{S}{\Sigma F} \left( \frac{1}{E'_k} - \frac{1}{E_k} \right), \quad (1)$$

где  $S$ —наибольшее растягивающее усилие, кг;

$\Sigma F$ —площадь сечения всех проволок каната,  $\text{см}^2$ .

Растягивающее усилие с учетом концевой нагрузки, собственного веса каната, шахтных сопротивлений, возможной перегрузки сосудов и динамических нагрузок

$$S = Q_0 + p \frac{H_0}{2} + \frac{k' Q_0}{n+1} + \frac{k_n Q_0}{n+1} + \left( Q_0 + \frac{p H_0}{2} \right) \frac{j_c}{g} \cdot \frac{j_m}{j_c}, \quad (2)$$

где  $Q_0$ —концевая нагрузка, кг;

$p$ —вес 1 м длины каната, кг м;

$H_0$ —наибольшая длина отвеса каната, м;

$k'$ —коэффициент шахтных сопротивлений для одной ветви;

$n$ —отношение собственного веса подъемного сосуда к весу полезного груза;

$k_n$ —коэффициент перегрузки сосуда;

$j_c$ —среднее ускорение,  $\text{м/сек}^2$ ;

$j_m$ —максимальное ускорение, зависящее от характера пуска двигателя,  $\text{м/сек}^2$ ;

$g$ —ускорение силы тяжести,  $\text{м/сек}^2$ ;

Расчет каната производится по формуле [2, стр. 48]

$$p = \frac{Q_0}{\frac{\sigma_{\text{пч}} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - H_0}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{пр}}$ —предел прочности каната, кг/мм<sup>2</sup>;  
 $m$ —занас прочности каната;  
 $\gamma_0$ —фиктивный вес 1 м<sup>3</sup> каната, кг/м<sup>3</sup>  
Из (3) расчетная концевая нагрузка составит

$$Q_0 = p \left( \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - H_0 \right). \quad (4)$$

Подставив значение расчетной концевой нагрузки (4) в выражение (2), получим

$$S = p \left[ \frac{J_m + g}{g} \left( \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - \frac{H_0}{2} \right) + \frac{k' + k_n}{n + 1} \left( \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - H_0 \right) \right]. \quad (5)$$

Модуль упругости каната [3, стр. 16]

$$E_k = 0,86 \cdot 10^6 \left( \frac{\Sigma F}{p} \right)^4. \quad (6)$$

Значение модуля общей деформации, определенное экспериментальным путем, составляет в среднем

$$E'_k \approx 0,6 E_k. \quad (7)$$

Подставив значения наибольшего растягивающего усилия (5), модуля упругости каната (6) и приведенного модуля деформации (7) в выражение (1), получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{пл.п}} = & 0,8 \cdot 10^{-6} \left( \frac{p}{\Sigma F} \right)^5 \left[ \frac{J_m + g}{d} \left( \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - \frac{H_0}{2} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{k' + k_n}{n + 1} \left( \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - H_0 \right) \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

Таким образом, величина относительного начального пластического удлинения каната зависит в основном от характеристики каната, высоты подъема и характера пуска подъемного двигателя.

Значение относительной начальной пластической деформации каната для скиповых подъемов с контакторным пуском асинхронного двигателя и средней высоте подъема составляет (рис. 3)

$$\varepsilon_{\text{пл.п}} \approx 0,002. \quad (9)$$

При эксплуатации подъемного каната всякому изменению концевой нагрузки соответствует определенное значение упругой деформации (линии *AB* на рис. 2).

При решении вопросов, связанных с регулированием длины каната, существенное значение имеет величина упругой деформации каната перед посадкой подъемного сосуда под загрузку. Величина относительной упругой деформации каната в этом случае составит

$$\varepsilon_y = \frac{k Q_0}{\Sigma F \cdot E_k}, \quad (10)$$

где  $k$ —коэффициент концевой нагрузки.

При спуске груза коэффициент концевой нагрузки равен единице. При посадке порожнего сосуда

$$k = \frac{n + a}{n + 1}, \quad (11)$$

где  $a$ —коэффициент загрузки сосуда в движении (учитывается только при применении автоматически загружающихся скипов).

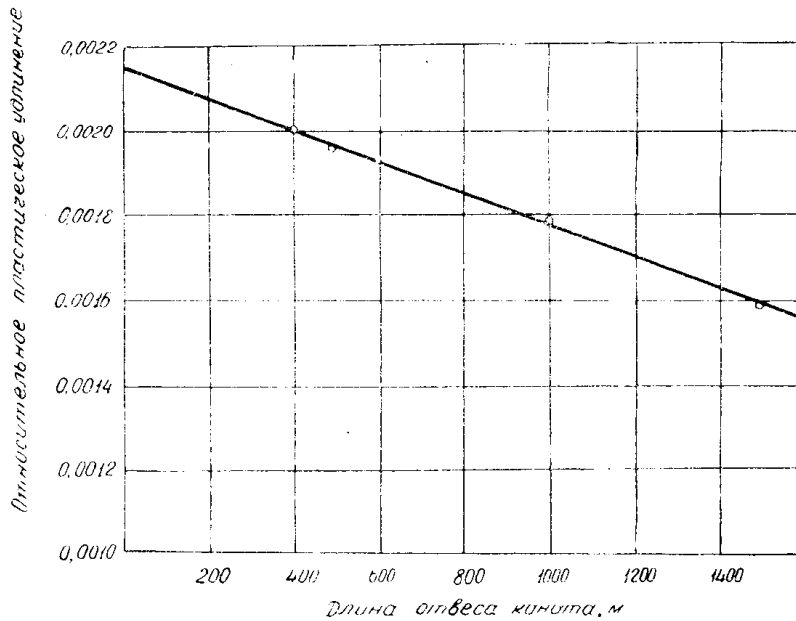


Рис. 3. Начальное пластическое удлинение каната.

Подставив в выражение (10) значение расчетной концевой нагрузки (4) и модуля упругости каната (6), получим

$$\varepsilon_y = 1,16 \cdot 10^{-6} \frac{n + a}{n + 1} \left( \frac{p}{\Sigma F} \right)^2 \left( \frac{\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^6}{\gamma_m} - H_0 \right). \quad (12)$$

Таким образом, величина относительной упругой деформации каната перед посадкой подъемного сосуда на нижнюю приемную площадку зависит от характеристики каната и высоты подъема. Влияние собственного веса каната при расчете не учитывалось, так как в условиях эксплуатации разгрузка каната от действия собственного веса не происходит.

Абсолютная упругая деформация каната в этом случае

$$\Delta L_y = \varepsilon_y H_0. \quad (13)$$

**Пример.** Определить величину относительной и абсолютной упругой деформации каната перед посадкой сосуда, если подъемная установка имеет: высоту подъема 390 м; диаметр каната 39 мм; скипы шеститонные с секторным затвором.

**Решение.** Принимаем длину отвеса каната равной 400 м; коэффициент загрузки скипа в движении 0,1; отношение веса сосуда к по-

лезному весу груза 0,805 [2, стр. 32]; вес 1 м длины каната 5,312 кг/м [2, стр. 52], площадь сечения всех проволок 5,6562 см<sup>2</sup>; предел прочности каната 180 кг/мм<sup>2</sup>; фиктивный вес каната 9200 кг/м<sup>3</sup>; расчетный запас прочности каната 6,5.

Относительная упругая деформация каната

$$\epsilon_y = 1,16 \cdot 10^{-6} \frac{0,805 + 0,1}{0,805 + 1} \left( \frac{5,312}{5,6562} \right)^5 \left( \frac{180 \cdot 10^6}{9200 \cdot 6,5} - 400 \right) = 0,0011.$$

Абсолютная величина упругой деформации  $\Delta l_y = 0,0011 \cdot 400 = 0,44$  м.

Величина относительной пластической деформации каната в период эксплуатации зависит в основном от двух факторов: наибольшего растягивающего усилия и времени эксплуатации

$$\epsilon_{пл.э} = \frac{0,9 S t^{0,163}}{\Sigma F \cdot E'_k}, \quad (14)$$

где  $t$  — время эксплуатации каната с момента навески, мес.

Значения коэффициента 0,9 и показателя степени 0,163 определены экспериментально, путем измерения пластического удлинения каната через известные промежутки времени. Растягивающая сила вычислась по выражению (5).

Подставляя в выражение (14) значение растягивающей силы (5) и приведенного модуля деформации (7), получим

$$\epsilon_{пл.э} = 1,75 \cdot 10^{-6} \left( \frac{P}{\Sigma F} \right)^5 t^{0,163} \left[ \frac{j_m + g}{g} \left( \frac{\sigma_{пл} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - \frac{H_0}{2} \right) + \frac{k' - k_n}{n + 1} \left( \frac{\sigma_{пл} \cdot 10^6}{\gamma_0 m} - H_0 \right) \right]. \quad (15)$$

В практических расчетах значение эксплуатационной относительной пластической деформации каната для скиповых подъемных установок шахт средней глубины в зависимости от времени эксплуатации каната с достаточной точностью можно принять (рис. 4)

$$\epsilon_{пл.э} = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,163}. \quad (16)$$

Пример. Определить суммарное пластическое удлинение двух канатов через четыре месяца, если до этого первый канат проработал два месяца, а другой канат — восемь месяцев. Наибольшая длина отвеса каната 400 м; длина струны каната 50 м.

Решение. Абсолютное пластическое удлинение одного каната

$$\Delta l_{пл.1} = 5,6 \cdot 10^{-3} (400 + 50) [(2 + 4)^{0,163} - 2^{0,163}] = 0,55 \text{ м.}$$

Абсолютное пластическое удлинение другого каната

$$\Delta l_{пл.2} = 5,6 \cdot 10^{-3} (400 + 50) [(8 + 4)^{0,163} - 8^{0,163}] = 0,25 \text{ м.}$$

Суммарное пластическое удлинение канатов

$$\Delta l_{пл.} = 0,55 + 0,25 = 0,8 \text{ м.}$$

В приведенных расчетах принимался необтянутый канат. В случае предварительной вытяжки каната известной силой  $S_n$  величины на-

начальной и эксплуатационной пластической деформации должны распределяться с учетом этой силы. Если сила предварительной вытяжки каната меньше наибольшего эксплуатационного растягивающего усилия, то величина относительной начальной пластической деформации

$$\varepsilon_{\text{пл.н}} = \frac{S - S_B}{\Sigma F \cdot E'_K}, \quad (17)$$

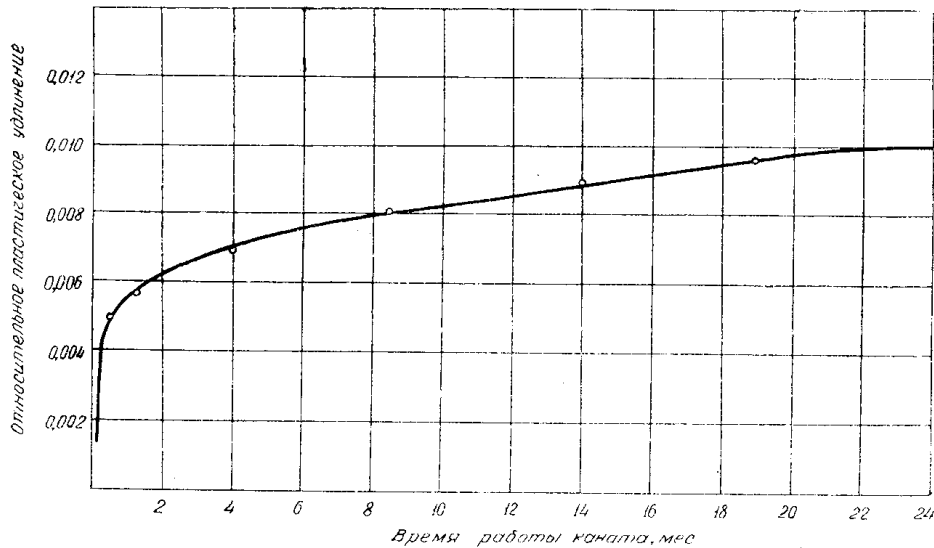


Рис. 4. Эксплуатационное пластическое удлинение каната.

а величина относительной эксплуатационной деформации определится из выражений (14), (15) или (16).

Если сила предварительной вытяжки каната равна или больше эксплуатационного растягивающего усилия, то начального пластического удлинения каната не происходит, а относительная эксплуатационная пластическая деформация определяется из выражения

$$\varepsilon_{\text{пл.э}} = \frac{0,9}{\Sigma F \cdot E'_K} [S(t^{0,163} + 1) - S_B]. \quad (18)$$

В работе подъемной установки возможны экстренные нагрузки, при которых канат получает дополнительное удлинение

$$\varepsilon_{\text{пл.экс}} = \frac{S_{\text{экс}} - S}{\Sigma F} \left( \frac{1}{E'_K} - \frac{1}{E_K} \right). \quad (19)$$

Если канат был предварительно вытянут силой, превышающей величину эксплуатационного растягивающего усилия, то величина относительной экстренной пластической деформации каната составит

$$\varepsilon_{\text{пл.экс}} = \frac{S_{\text{экс}} - S_B}{\Sigma F} \left( \frac{1}{E'_K} - \frac{1}{E_K} \right). \quad (20)$$

Для определения величины относительной экстренной деформации каната необходимо, очевидно, знать величину экстренного усилия,

которое в некоторых случаях может быть определено расчетным путем, например при срабатывании предохранительного тормоза.

Правилами безопасности [4, стр. 152, § 828] величина экстренного удлинения каната ограничена значением 0,5% от длины участка каната, участвовавшего в экстренном напряжении. По нашему мнению, это указание не имеет достаточного обоснования. В одних случаях величина 0,5% будет чрезмерной, например, для канатов, проработавших продолжительное время, в других случаях она окажется заниженной, например для недавно навешенных канатов.

Согласно рис. 2 каждой величине общей относительной деформации каната соответствует определенное значение приведенного напряжения

$$\sigma_{пр} = \varepsilon \cdot E'_k. \quad (21)$$

Значение величины общей относительной деформации каната

$$\varepsilon = \varepsilon_{пл.п} + \varepsilon_{пл.э} + \varepsilon_{пл.экс} + \varepsilon_y. \quad (22)$$

При определении максимального значения приведенного напряжения величину относительной упругой деформации каната необходимо принимать наибольшей

$$\varepsilon_y = \frac{S}{\Sigma F E_k}. \quad (23)$$

Если ввести понятие приведенного запаса прочности каната

$$n_{пр} = \frac{\sigma_{пл}}{\sigma_{пр}} \quad (24)$$

и величину его для конкретных условий указать в Правилах безопасности, то критерием прочности каната можно будет считать его общую относительную деформацию

$$\varepsilon \ll \frac{\sigma_{пл}}{n_{пр} \cdot E'_k}. \quad (25)$$

### Выводы

При определении упругой и пластической деформации каната необходимо прежде всего учитывать величины, характеризующие конструкцию каната, а также технические и эксплуатационные показатели установки.

Общая относительная деформация каната характеризует его напряжение и работоспособность. При введении контроля прочности каната по его общей относительной деформации необходимо тщательно учитывать удлинение каната в процессе эксплуатации. Для этой цели в книге о состоянии канатов нужно регистрировать величины начального пластического удлинения, экстренного удлинения и т. д.

Приведенные формулы могут быть использованы для определения длины навешиваемого каната, при решении вопросов регулирования длины каната и т. д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов Н. И. Теория упругости и пластичности. Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953.
  2. Правицкий Н. К. Рудничные подъемные установки. Metallurgizdat, 1956.
  3. Флоринский Ф. В. Динамика шахтного подъемного каната. Углетехиздат, 1955.
  4. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах. Углетехиздат, 1959.
-



### ЗАМЕЧЕНИЯ К ПЕЧАТКАМ

| Стр. | Строка или формула | Напечатано                           | Должно быть                          |
|------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 5    | формула (8)        | $d$                                  | $g$                                  |
| 80   | 13 стр. снизу      | творце                               | творце                               |
| 85   | формула (1)        | $+ \frac{100}{\gamma_m} (f_m - k_c)$ | $+ \frac{100}{\gamma_m} (f_m + k_c)$ |