Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В. Плеханова.
1986, т. 108

УДК 622.673

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ И НАТЯЖНЫХ КАНАТОВ В ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВКАХ С ФИКСИРОВАННЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ НАТЯЖНОГО ШКИВА

С.С. НАУМОВ

При отработке месторождений полезных ископаемых, залегающих на больших глубинах, широкое распространение в СССР и за рубежом получили высокопроизводительные компактные многоканатные подъемные установки со шкивом трения. Применение таких установок при отработке мощных месторождений, залегающих на малых глубинах (например, Хибинское месторождение апатита с проектной производительностью рудников до 10–15 млн.т руды в год), резко ограничено условием нескольжения канатов по ведущему шкиву. Использование подъемных установок со шкивом трения в условиях Хибинских и подобных им месторождений возможно только при значительном утяжелении подъемных сосудов и одновременном ограничении грузоподъемности.

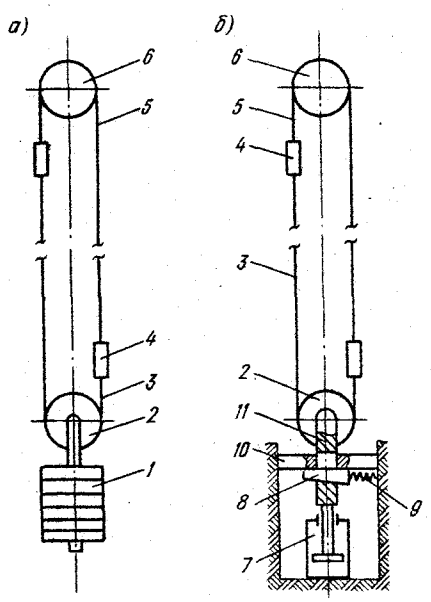


Рис.1. Схемы подъемных установок со шкивом трения и натяжным устройством

Одним из путей повышения натяжения ветвей установки является создание дополнительных усилий в ветвях натяжным устройством. При этом значительно снижается массивность установки, улучшаются ее динамические характеристики и создаются предпосылки для широкого внедрения канатных направляющих. Уже сами натянутые тяговые и натяжные канаты, охватывающие неподвижные ведущий и натяжной шкивы, ограничивают колебания подъемных сосудов в горизонтальной плоскости. Известные технические решения подъемных установок с натяжными устройствами сводятся к двум схемам (рис.1).

На рис.1,а изображена подъемная установка[X], состоящая из ка-

[X] В.А. Кабанов, А.М. Факторович. Пути расширения области применения многоканатного шахтного подъема со шкивами трения. — Изв. вузов, Горный журнал, 1960, № 7.

натоведущего 6 и натяжного 2 шкивов, охватываемых тяговыми 5 и натяжными 3 канатами, закрепленными на подъемных сосудах 4. Натяжной шкив 2 с прикрепленным к нему грузом I может свободно перемещаться вдоль оси подъема. Введем понятие базы подъемной установки, понимая под ней расстояние между осями канатоведущего и натяжного шкивов, тогда представленная на рис.I,а установка является установкой с переменной базой.

На рис.I,б представлена схема подъемной установки по а.с. I020341[x], натяжное устройство которой оснащено гидроцилиндрами 7. Безопасность подъема при неисправностях в гидросистеме обеспечивается клинно-пружинным фиксатором, состоящим из клина 8 и пружины 9. Клин своим основанием опирается на раму I0, а наклонной плоскостью на поверхность в пазе, выполненном в тяге II гидропривода. Такая конструкция натяжного устройства позволяет выбирать удлинение канатов, возникающее вследствие их остаточной деформации, или автоматически включением гидропривода на расчетное усилие в наиболее опасном режиме работы установки или путем периодического контроля дополнительных усилий в натяжных канатах. Так как остаточные деформации канатов в зависимости от их конструкции составляют 0,I2-0,5 %, а обтяжка канатов происходит практически в течение первых нескольких десятков циклов (требуется автоматическое управление работой натяжного устройства), то можно считать, что положение шкива после обтяжки канатов остается неизменным (периодический контроль действующих усилий в натяжных канатах), а установку рассматривать как установку с постоянной базой.

За период подъема (спуска) груза изменяются высота отвеса тяговых и натяжных канатов, значение движущего усилия и соответственно величина упругих деформаций канатов подъемной установки. Если в подъемных установках с переменной базой упругие деформации не оказывают существенного влияния на безопасность ее работы (натяжной шкив свободно перемещается вдоль оси подъема), то в установках с постоянной базой упругие деформации канатов могут значительно влиять на безопасность работы и поэтому их исследование приобретает важное значение.

Предположим, что подъемная установка работает без проскальзывания канатов по ведущему шкиву, а подъемные сосуды, канатоведущий и натяжной шкивы абсолютно жесткие (их деформации относительно малы в сравнении с деформациями канатов). Исследуя упругие деформации канатов, их следует разделить из условия характера проявления усилий, действующих в подъемной установке: а) изменяющиеся по закону Гука от усилий, приложенных к подъемному сосуду, статических (вес подъемных сосудов и груза, сопротивления движению, дополнительные усилия, создаваемые натяжным устройством) и динамических, обусловленных ускорением, замедлением установки; б) изменяющиеся по квадратичной функции – от собственного веса канатов установки и динамических нагрузок, связанных с ними. Расчетная схема подъемной установки представлена на рис.2.

---

[x] А.с. 1020341 (СССР). Подъемная установка / С.С.Наумов. – Опубл. в Б.И. , 1983, № 20.

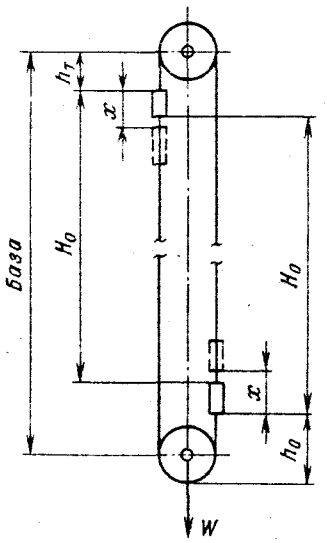


Рис.2. Расчетная схема подъемной установки с канатоведущим и натяжным шкивами

Удлинение канатов по закону Гука определяется по формуле

$$\Delta\ell = S H_i / EFn , \qquad (1)$$

где S – одна из составляющих натяжения ветви установки, Н; H_i – переменная высота отвеса канатов, м; E – модуль упругости каната, Па; F – площадь сечения проволок каната, м^2; n – число канатов в ветви.

Переменная высота отвеса канатов:

поднимающейся ветви

$$H_{i\,п} = H_0 + h_т - x ; \qquad (2)$$

опускающейся ветви

$$H_{i\,оп} = h_т + x , \qquad (3)$$

где H_0 – высота подъема, м; $h_т$ – высота переподъема, м; x – перемещение подъемного сосуда, за x = 0 принимаем нижнее положение груженного сосуда, м.

Удлинение тяговых канатов:

$$\Delta\ell_т^г = \frac{(Q+\beta Q)(H_0+h_т-x)}{E_т F_т n_т} g + \frac{\beta Q (h_т + x)}{E_т F_т n_т} g , \qquad (4)$$

где Q – масса полезного груза, кг; β – коэффициент тары; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $E_т$ – модуль упругости тяговых канатов, Па; $F_т$ – площадь сечения всех проволок тягового каната, м^2; $n_т$ – число тяговых канатов.

После алгебраических преобразований уравнение (4) запишем в виде:

$$\Delta\ell_т^г = \frac{Qg}{E_т F_т n_т}\left[(1+\beta)H_0 + (1+2\beta)h_т\right] - \frac{Qg}{E_т F_т n_т} x . \qquad (5)$$

По аналогии с выражениями (4) и (5) найдем удлинение канатов по остальным видам нагрузки.

Удлинение тяговых канатов от сил сопротивления движению подъемной установки;

$$\Delta\ell_т^с = \pm \frac{Qg}{E_т F_т n_т}\left[k_1 H_0 + (k_1 - k_2) h_т\right] \mp \frac{Qg}{E_т F_т n_т} k x , \qquad (6)$$

где k_1 – коэффициент сопротивления движению грузовой ветви; k_2 – коэффициент сопротивления движению порожней ветви; k – коэффициент сопротивления движению подъемной установки в целом; верхние индексы соответствуют режиму подъема груза, нижние – его спуску.

Удлинение тяговых канатов от дополнительных усилий, создаваемых натяжным устройством:

$$\Delta \ell_{\text{т}}^{\text{ду}} = \frac{H_0 + 2h_{\text{т}}}{E_{\text{т}} F_{\text{т}} n_{\text{т}}} W, \qquad (7)$$

где W – половина усилия, развиваемого натяжным устройством и действующего на одну ветвь, Н.

Удлинение натяжных канатов от дополнительных усилий, создаваемых натяжным устройством:

$$\Delta \ell_{\text{н}}^{\text{ду}} = \frac{H_0 + 2h_{\text{п}}}{E_{\text{н}} F_{\text{н}} n_{\text{н}}} W, \qquad (8)$$

где $h_{\text{п}}$ – высота петли натяжных канатов, м; $E_{\text{н}}$ – модуль упругости натяжного каната, Па; $F_{\text{н}}$ – площадь сечения всех проволок натяжного каната, м^2; $n_{\text{н}}$ – число натяжных канатов.

Принимая во внимание принятое за начало координат нижнее положение груженого сосуда, учитывая равнонаправленность ускорения при подъеме груза и замедления при спуске и рассматривая режим спуска груза в ретроспективе, динамическое натяжение тяговых канатов без учета собственной массы в указанных режимах:

$$\Delta \ell_{\text{т}}^{\text{д}} = \frac{Qa}{E_{\text{т}} F_{\text{т}} n_{\text{т}}} \left(H_0 + \beta H_0 + h_{\text{т}}\right) - \frac{Qa}{E_{\text{т}} F_{\text{т}} n_{\text{т}}} \left(1 + 2\beta\right) x, \qquad (9)$$

где a – ускорение (замедление) подъемной установки, м/с^2.

Закон удлинения стержня под собственным весом определяется выражением

$$\Delta \ell_{\text{с}} = S_{\text{с}} \ell^2 / 2EF, \qquad (10)$$

где $S_{\text{с}}$ – вес единицы стержня, Н/м; ℓ – длина стержня, м.

Используя выражения (11), (2) и (3), найдем удлинение тяговых канатов:

$$\Delta \ell_{\text{т}}^{\text{К}} = \frac{pg}{2E_{\text{т}} F_{\text{т}}} \left[\left(H_0 + h_{\text{т}} - x\right)^2 + \left(h_{\text{т}} + x\right)^2\right], \qquad (11)$$

где p – масса 1 м каната, кг.

Аналогично находим удлинение натяжных канатов:

$$\Delta \ell_{\text{н}}^{\text{К}} = \frac{qg}{2E_{\text{н}} F_{\text{н}}} \left[\left(H_0 + h_{\text{т}} - x\right)^2 + \left(h_{\text{т}} + x\right)^2\right], \qquad (12)$$

где q – масса 1 м натяжного каната, кг.

После сложения выражений (11) и (12) и алгебраических преобразований найдем:

$$\Delta \ell_{\Sigma}^{\text{К}} = \frac{\left(H_0 + h_{\text{т}}\right)^2 + h_{\text{т}}^2}{2E_{\text{т}} F_{\text{т}}} pg + \frac{\left(H_0 + h_{\text{п}}\right)^2 + h_{\text{п}}^2}{2E_{\text{н}} F_{\text{н}}} qg - x\left(H_0 - x\right)\left(\frac{pg}{E_{\text{т}} F_{\text{т}}} + \frac{qg}{E_{\text{н}} F_{\text{н}}}\right). \qquad (13)$$

Динамическое натяжение канатов необходимо рассматривать так же, как натяжение их под собственным весом, как если бы имело место изменение ускорения свободного падения, тогда удлинение канатов от динамической составляющей определяется уравнением:

$$\Delta\ell_{\Sigma}^{кд}=\left(\frac{H_0+2h_т}{2E_т F_т}\,p-\frac{H_0+2h_п}{2E_н F_н}\,q\right)aH_0-\left(\frac{H_0+2h_т}{E_т F_т}+\frac{H_0+2h_п}{E_н F_н}\right)ax\,. \qquad (14)$$

Путем сложения отдельных удлинений канатов от различных нагрузок после алгебраических преобразований найдем общее уравнение упругих деформаций канатов подъемной установки:

$$\Delta\ell_{\Sigma}=\left\{\frac{Qg}{E_т F_т n_т}\left[H_0\left(1+\beta\pm k_1\right)+h_т\left(1+2\beta\pm k_1\mp k_2\right)\right]g+\left[\frac{\left(H_0+h_т\right)^2+h_т^2}{2E_т F_т}\,p+\frac{\left(H_0+h_п\right)^2+h_п^2}{2E_н F_н}\,q\right]g+\right.$$

$$+\frac{Qa}{E_т F_т n_т}\left(H_0+\beta H_0+h_т\right)+\left[\frac{H_0+2h_т}{2E_т F_т}-\frac{H_0+2h_п}{2E_н F_н}\right]aH_0+\left(\frac{H_0+2h_т}{E_т F_т n_т}+\frac{H_0+2h_п}{E_н F_н n_н}\right)W\Bigg\}-\Bigg\{\left[\frac{Q(1\pm k)}{E_т F_т n_т}+\Bigg.$$

$$\left.+\frac{pH_0}{E_т F_т}+\frac{qH_0}{E_н F_н}\right]g+\left[\frac{Q(1+2\beta)}{E_т F_т n_т}+\frac{p\left(H_0+2h_т\right)}{E_т F_т}+\frac{q\left(H_0+2h_п\right)}{E_н F_н}\right]a\Bigg\}x+\left(\frac{pg}{E_т F_т}+\frac{qg}{E_н F_н}\right)x^2, \qquad (15)$$

где верхние индексы соответствуют режиму ускорения при подъеме груза, нижние – замедлению при его спуске.

Обозначим выражение в первых фигурных скобках через d, во вторых фигурных скобках через c, и в круглых скобках через b, запишем уравнение (15) в каноническом виде:

$$\Delta\ell_{\Sigma}=bx^2-cx+d\,. \qquad (16)$$

Из анализа уравнения (15) следует, что наибольшее удлинение канаты установки испытывают в момент трогания при подъеме груза, при $x=0$, кроме того, этому режиму соответствует и наибольшее удлинение тяговых канатов. Так как суммарное удлинение канатов в установках с фиксированным положением натяжного шкива постоянно, то натяжные канаты будут иметь в указанном режиме наименьшие удлинения и, следовательно, в натяжных канатах будут действовать пропорциональные их удлинению наименьшие дополнительные усилия, развиваемые натяжным устройством. Поэтому определение наиболее опасного режима работы подъемной установки требует дополнительных исследований.

По мере подъема груза усилия, действующие в тяговых канатах, снижаются и поэтому должны были бы уменьшаться удлинения канатов, но в подъемных установках с постоянной базой суммарное удлинение канатов сохраняется постоянным. Следовательно, должны возникнуть дополнительные усилия, их растягивающие. Наибольшего значения дополнительные усилия, развиваемые натяжным устройством, достигают в режиме остановки подъемной машины с порожними сосудами.

Существующие методы расчета прочности каната не учитывают возраста-

ния усилия из-за динамики подъемной установки. Учитывая, что в подъемной установке с постоянной базой суммарное удлинение также постоянно, расчет канатов на прочность необходимо производить по статическим нагрузкам, соответствующим нижнему положению груженого подъемного сосуда.

Предварительное натяжение ветвей установки целесообразно задавать при остановке подъемной установки с порожними сосудами. Расчет предварительного натяжения ветвей необходимо выполнять для обоих наиболее опасных режимов работы подъемной установки; трогания груженого сосуда при подъеме груза и конца замедления при его спуске. Расчет может быть выполнен в следующей последовательности.

I. Из условия нескольжения канатов по ведущему шкиву находим дополнительное усилие W_{min}, создаваемое натяжным устройством для указанных режимов работы подъемной установки: трогания груженого подъемного сосуда при подъеме груза и в конце замедления при спуске его.

2. Определим удлинение канатов $\Delta\ell_{\Sigma}$ подъемной установки для указанных режимов по выражению (I5).

3. Вычислим по уравнению (I5) удлинение канатов установки $\Delta\ell'_{\Sigma}$ без учета дополнительных усилий, создаваемых натяжным устройством, для случая остановки подъемной машины при расположении груженого сосуда внизу, при $x=0;\ k_1=0;\ k_2=0;\ k=0;\ W=0$.

4. Найдем разность указанных удлинений $\Delta\ell_W=\Delta\ell_{\Sigma}-\Delta\ell'_{\Sigma}$ и величину дополнительных усилий, действующих в ветвях установки по формуле:

$$W_1=\Delta\ell_W\Big/\left(\frac{H_0+2h_{\text{т}}}{E_{\text{т}}F_{\text{т}}n_{\text{т}}}+\frac{H_0+2h_{\text{п}}}{E_{\text{н}}F_{\text{н}}n_{\text{н}}}\right). \qquad (I7)$$

5. По известным значениям концевой нагрузки и дополнительного натяжения канатов определим статическую нагрузку в грузовой ветви и проведем расчет канатов на прочность, при этом к натяжным канатам предъявляются такие же требования, как и к тяговым.

6. По пунктам 3 и 4 найдем дополнительные усилия W_2, действующие в ветвях установки при остановке подъемной машины с порожними подъемными сосудами.

7. Определим необходимое предварительное натяжение канатов обеих ветвей установки, которое должно быть создано натяжным устройством, в указанном режиме работы подъемной установки $R=2W_2$.

Предлагаемый метод расчета подъемных установок с натяжным устройством, как и известные методы практических расчетов, не учитывает волнового характера изменения деформаций канатов и является приближенным методом расчета.