Записки Ленинградского ордена Ленина
и ордена Трудового Красного Знамени горного института,
том XXXIII, вып. 3, 1956 г.

НОВЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОБОЛОЧЕК БАРАБАНОВ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Канд. техн. наук Г. В. Верстаков

В настоящей статье излагается предлагаемый автором технический метод расчета оболочек барабанов шахтных подъемных машин, разработанный в диссертации. *

Аналитическое решение вопросов расчета и конструирования оболочек барабанов шахтных подъемных машин было предложено Б. Л. Давыдовым [2]. Однако этот общий метод не получил применения в технических расчетах как громоздкий и вместе с тем приближенный, не дающий конкретных расчетных формул.

Б. А. Морозовым разработаны общий и на его базе технический методы расчета оболочек барабанов шахтных подъемных машин [3, 4, 5]. Его техническим методом продолжительное время пользовался Ново-Краматорский завод им. И. В. Сталина. Практика завода и сделанная нами проверка показывают, что расчеты оболочек барабанов шахтных подъемных машин по техническому методу Б. А. Морозова дают завышения прогибов оболочки в среднем на 13% и напряжений на 300 *кг/см*^{2}.

Использование Ново-Краматорским заводом имени Сталина метода расчета прочности корпуса подводной лодки Ю. А. Шиманского [6] для расчета оболочек барабанов шахтных подъемных машин дает примерно те же результаты, что и по методу Б. А. Морозова.

Выше отмеченные недостатки в значительной степени ликвидированы в предлагаемом техническом методе расчета оболочек барабанов шахтных подъемных машин, построенном на базе общей теории цилиндрической оболочки с использованием проверенных практикой или экспериментами предложений Б. Л. Давыдова и В. А. Морозова в части определения нагрузки на оболочку барабана.

I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ОБОЛОЧКУ БАРАБАНА

Основной нагрузкой, действующей на оболочку барабана шахтной подъемной машины, является давление от навитого каната. Проф. Б. Л. Давыдовым [2] доказано, что напряжения в оболочке, вы-

* Г. В. Верстаков. Исследование рудничного подъема с двухслойной навивкой каната на барабан. Автореферат диссертации. Ленинградский горный институт, 1953.

званные изгибом и кручением последней от действия натяжения каната, как правило, чрезвычайно невелики и ими можно пренебречь.

Для учета влияния уменьшения давления каната на оболочку вследствие ее прогиба воспользуемся экспериментально проверенным методом Б. А. Морозова [4], по которому средние удельные давления каната на оболочку определяются по формулам:

при однослойной навивке каната

$$P_1 = \frac{S_1}{Rt} C;$$

при двухслойной навивке каната

$$P_2 = \frac{1}{R\,t} \left(S_1 + \frac{S_2}{1+\lambda} \right) C;$$

при трехслойной навивке каната

$$P_3 = \frac{1}{R\,t} \left[S_1 + \frac{2S_2 + 3\,\lambda\, S_3}{(1+\lambda)(1+2\lambda)} \right] C;$$

где S_1, S_2, и S_3 — соответственно статические натяжения каната при одно-,двух- и трехслойной навивке;

R — радиус навивки каната (равен половине стандартного диаметра барабана);

t — шаг навивки каната на барабан;

$\lambda = \frac{F_k}{F} \frac{E_k}{E}$ — коэффициент, в котором

F — площадь поперечного сечения каната;

E_k и E — соответственно модули упругости каната и оболочки;

$F = \delta t$ — площадь меридиального сечения оболочки на длине шага навивки t (δ — толщина оболочки);

$C = \frac{1}{1 + 0{,}64 \frac{E_k}{E} \frac{F_k}{\sqrt{R\,t^2}} \sum\limits_{i=1}^{i=n} \eta(\beta, x_i)}$ — коэффициент уменьшения натяжения в навитом канате вследствие прогибов оболочки, в котором

$\sum\limits_{i=1}^{i=n} \eta(\beta, x_i)$ — сумма специальных функций с основанием $\beta = \frac{1{,}285}{\sqrt{R\,\delta}}$.

Вывод этих формул (включая и случаи четырех-, пяти-и шестислойной навивки каната) сделан Б. А. Морозовым.

С целью облегчения определения удельного давления P каната на оболочку нами построены на основе вышеприведенных формул графики для нахождения коэффициентов C и λ для стандартных барабанов шахтных подъемных машин при возможных условиях их работы.

При определении статического натяжения S каната необходимо иметь в виду следующее.

В основу заводских расчетов должен быть положен уравновешенный вертикальный подъем, который определяет наибольшую возможную нагрузку на оболочку барабана. Тогда статическое натяжение

каната при навивании любого слоя будет равно (пренебрегая сопротивлениями в стволе):

$$S_1 = S_2 = \ldots S_i = Q_n + Q_м + P_k H',$$

где Q_n — вес полезного груза в подъемном сосуде;
$Q_м$ — мертвый вес подъемного сосуда;
P_k — вес погонного метра каната;
H' — наибольшая длина отвеса каната.

В случае проверочных расчетов оболочек барабанов шахтных подъемных машин при неуравновешенной системе подъема статическое натяжение каната в зависимости от пройденного подъемным сосудом пути может быть определено по формуле:

$$S_i = Q_n + Q_м + P_k (H' x'),$$

где x' — пройденный подъемным сосудом путь.

Для практических расчетов в этих случаях можно пользоваться средними статическими натяжениями каната, которые равны:
в первом слое каната

$$S_1 = \frac{S_0' + S_1' + S_2'}{3};$$

во втором слое каната

$$S_2 = \frac{S_0'' + S_1'' + S_2''}{3};$$

в третьем слое каната

$$S_3 = \frac{S_0''' + S_1''' + S_2'''}{3};$$

где S_0', S_0'' и S_0''' — соответственно статические натяжения каната в момент начала навивки первого, второго и третьего слоев, которые вычисляются при соответствующем значении x' для рассматриваемого момента;
S_1', S_1'' и S_1''' — то же, когда половина ширины барабана занята витками первого, второго и третьего слоев каната,
S_2', S_2'' и S_2''' — то же в момент конца навивки первого, второго и третьего слоев каната.

По аналогичным формулам средние статические натяжения каната при неуравновешенном подъеме могут быть определены и для четырех-, пяти- и шестислойной навивки каната.

II. РАСЧЕТ ОБОЛОЧКИ БАРАБАНА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ НА ПРОЧНОСТЬ

1. Решение дифференциального уравнения оболочки

Общая теория цилиндрической оболочки дает следующее дифференциальное уравнение для решения круглой цилиндрической оболочки, нагруженной симметрично относительно своей оси,

$$\frac{d^4y}{dx^4} + 4\beta^4 y = \frac{Z}{D}, \qquad (1)$$

где Z — интенсивность нагрузки;

$$\beta^4 = \frac{E\,\delta^3}{4\,r^2\,D} = \frac{3(1-\mu^2)}{r^2\,\delta^2};$$

$D = \frac{E\cdot\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ — жесткость оболочки при изгибе;

r — средний радиус оболочки;

μ — коэффициент Пуассона.

Остальные обозначения указаны ранее. Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$Y = e^{\beta x}(C_1\cos\beta x + C_2\sin\beta x + e^{\beta x}(C_3\cos\beta x + C_4\sin\beta x) + f(x), \tag{2}$$

где $C_1 \ldots C_4$ — постоянные интегрирования;

$f(x)$ — частное решение уравнения (1).

Постоянные интегрирования для оболочки барабана подъемной машины определяются ниже—из условия неподвижной заделки концов оболочки на лобовинах барабана потому, что оболочка так или иначе крепится к этим лобовинам. Таким образом, предлагается пренебрегать деформациями лобовин барабана, вследствие их малой величины по отношению к деформациям оболочки.

В счет компенсации этого можно не учитывать влияния футеровки барабана на увеличение прочности оболочки. При этом однако учитывается влияние футеровки на увеличение среднего радиуса оболочки следующим соотношением:

$$r = R - \frac{d-\delta}{2},$$

где d — диаметр каната.

Равномерная загрузка оболочки. Частным решением уравнения (1) для случая равномерной нагрузки ($Z = P$) будет

$$f(x) = \frac{P}{4\,\beta^4 D} = \frac{Pr^2}{E\delta}.$$

Вводя вместо показательных функций гиперболические, мы сможем тогда написать общее решение (2) следующим образом:

$$Y = \frac{Pr^2}{E\delta} + C_1\sin\beta x\,\operatorname{sh}\beta x + C_2\sin\beta x\,\operatorname{ch}\beta x + C_3\cos\beta x\,\operatorname{ch}\beta x\; C_4\cos\beta x\,\operatorname{ch}\beta x. \tag{3}$$

Если начало координат поместить, как показано на рис. 1, по середине длины оболочки, то выражение (3) будет четной функцией x, и тогда $C_2 = C_3 = 0$.

Постоянные C_1 и C_4 подбираем таким образом, чтобы удовлетворялись условия на концах:

$$Y\left(x = \pm\frac{l}{2}\right) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{dy}{dx}\left(x = \pm\frac{l}{2}\right) = 0,$$

где l — длина оболочки.

Подставив в эти соотношения (3), найдем

$$\frac{P r^2}{E \delta} + C_1 \sin\alpha \operatorname{sh}\alpha + C_4 \cos\alpha \operatorname{ch}\alpha = 0,$$

$$C_1 (\sin\alpha \operatorname{ch}\alpha + \cos\alpha \operatorname{sh}\alpha) + C_4 (\cos\alpha \operatorname{sh}\alpha - \sin\alpha \operatorname{ch}\alpha) = 0,$$

где ради упрощения положено

$$\frac{\beta l}{2} = \alpha.$$

Из этих уравнений получаем

$$C_1 = -\frac{P r^2}{E \delta}\left[\frac{\cos\alpha \operatorname{sh}\alpha - \sin\alpha \operatorname{ch}\alpha}{\sin\alpha \operatorname{sh}\alpha (\cos\alpha \operatorname{sh}\alpha \sin\alpha \operatorname{ch}\alpha) - \cos\alpha \operatorname{ch}\alpha (\sin\alpha \operatorname{ch}\alpha + \cos\alpha \operatorname{sh}\alpha)}\right] =$$

$$= -\frac{P r^2}{E \delta} K_1,$$

$$C_4 = \frac{P r^2}{E \delta}\left[\frac{\cos\alpha \cdot \operatorname{sh}\alpha + \sin\alpha \cdot \operatorname{ch}\alpha}{\sin\alpha \operatorname{sh}\alpha (\cos\alpha \operatorname{sh}\alpha - \sin\alpha \operatorname{ch}\alpha) - \cos\alpha \operatorname{ch}\alpha (\sin\alpha \operatorname{ch}\alpha + \cos\alpha \operatorname{sh}\alpha)}\right] =$$

$$= \frac{Pr^2}{E\delta} K_2.$$

Здесь K_1 и K_2 соответственно равны первому и второму выражениям в квадратных скобках. Сделав преобразования в квадратных скобках, получим

$$K_1 = -\frac{\cos\alpha \operatorname{sh}\alpha - \sin\alpha \operatorname{ch}\alpha}{\sin\alpha \cos\alpha + \operatorname{ch}\alpha \operatorname{sh}\alpha}, \qquad (4)$$

$$K_2 = -\frac{\cos\alpha \operatorname{sh}\alpha + \sin\alpha \operatorname{ch}\alpha}{\sin\alpha \cos\alpha + \operatorname{ch}\alpha \operatorname{sh}\alpha}. \qquad (5)$$

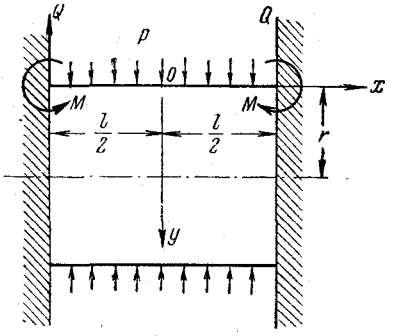


Рис. 1. Расчетная схема оболочки

Тогда уравнение упругой линии оболочки будет:

$$Y_x = \frac{P r^2}{E \delta}\left[1 - K_1 \sin\beta x \operatorname{sh}\beta x + K_2 \cos\beta x \operatorname{ch}\beta x\right] \qquad (6)$$

Определим теперь изгибающий момент и перерезывающую силу на единицу длины окружности среднего радиуса оболочки. Дифференцируя дважды выражение (6) и умножая результат на D, находим изгибающий момент:

$$M_x = -D \frac{d^2 y_x}{dx^2} = \frac{E \cdot \delta^3}{12(1-\mu^2)} 2\beta (K_1 \cos\beta x \operatorname{ch}\beta x +$$

$$+ K_2 \sin\beta x \operatorname{sh}\beta x).$$

Сокращая на E и δ и, имея в виду, что

$$\beta^2 = \sqrt{\frac{3(1-\mu^2)}{r^2 \delta^2}},$$

окончательно имеем:

$$M_x = \frac{P}{2\beta^2} (K_1 \cos\beta x \operatorname{ch}\beta x + K_2 \sin\beta x \operatorname{sh}\beta x) \qquad (7)$$

Дифференцируя трижды выражение (6) и умножая результат на D, находим перерезывающую силу

$$Q_x = -D \frac{d^3 y_x}{dx^3} = \frac{P}{2\beta} [(K_2 - K_1) \sin\beta x \operatorname{ch}\beta x +$$

$$+ (K_2 + K_1) \cos\beta x \operatorname{sh}\beta x]. \qquad (8)$$

Частичная загрузка оболочки. Чтобы рассчитать оболочку барабана при частичной загрузке ее длины, надо найти соответствующее частное решение уравнения (1). Это вызовет необходимость определения соответствующих значений постоянных интегрирования для каждого конкретного случая. В целях упрощения расчет такой оболочки при одно- и двухслойной навивке каната можно вести приближенным методом.

Для этого следует удельное давление P каната на оболочку в формулах (6), (7) и (8) заменить средним давлением каната в данной точке, определяемым на участках оболочки между O и $\pm\frac{l}{2}$ по следующим формулам:

при однослойной навивке каната

$$(P_c)_1 = 1{,}4\ P_1\ \frac{a_1 \pm x}{l};$$

при двухслойной навивке каната

$$(P_c)_2 = \frac{1}{R\,t}\left(S_1 + 1{,}2\frac{a_2 \pm x}{l}\ \frac{S_2}{1+\lambda}\right) C;$$

где a_1 и a_2 — часть длины оболочки, занятая витками первого и второго слоев каната;

x — расстояние по образующей оболочки от середины ее длины до точки, на которой определяется прогиб. Если занята витками „отрицательная" половина оболочки, перед x следует брать знак „—", если „положительная" — знак „+", причем само значение x для обеих половин оболочки берется соответствующим по знаку.

Для концов оболочки средние давления в данной точке следует принять равными:

для нагруженного конца оболочки

$$(P_c)_{1H} = P_1;\quad (P_c)_{2H} = P_2;$$

для ненагруженного конца оболочки

$$(P_c)_{1б} = 0{,}5\,P_1;\quad (P_c)_{2б} = \frac{1}{R\,t}\left(S_1 + 0{,}5\ \frac{S^2}{1+\lambda}\right) C.$$

Эти соотношения, как показала проверка, достаточно верны для наиболее часто встречающихся случаев, когда около половины длины оболочки занято витками первого или второго слоев каната. Если же витками каната занято значительно больше половины длины оболочки (или меньше при двухслойной навивке), то расчет следует вести так же, как при равномерной нагрузке.

2. Расчет оболочек, подкрепленных распорными кольцами

Оболочки барабанов шахтных подъемных машин на практике часто усиливают распорными кольцами. Расчет подобных оболочек оказывается задачей весьма громоздкой, если подходить к ней путем точного удовлетворения условий, имеющих место вдоль линии соединения колец с оболочкой.

В настоящее время, однако, при расчете тонких оболочек этим сложным путем не пользуются, прибегая обычно к упрощенному спо-

собу, суть которого заключается в том, что жесткости каждого кольца равномерно распределяются по всей ширине пролета, поддерживаемого кольцом, и прибавляются к соответствующим жесткостям оболочки в кольцевом направлении. При этом оболочка с кольцами в расчете оказывается замененной приближенно ей эквивалентной оболочкой без колец. Следовательно, практически кольца жесткости при расчете оболочек барабанов можно учесть, увеличивая толщину оболочки на величину $\Delta\delta$. Эта величина будет равна $2z_0$, где z_0—расстояние от срединной поверхности оболочки до нейтральной оси профиля, образуемого кольцом и присоединенным к нему пояском оболочки (рис. 2).

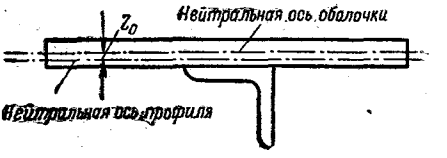


Рис. 2. Схема профиля распорного кольца и присоединенного к нему пояска оболочки

Однако, учитывая, что под кольцами жесткости в оболочке возникают дополнительные напряжения изгиба, положим $\Delta\delta = z_0$. Для определения величины z_0 необходимо найти центр тяжести и положение нейтральной оси профиля. Для этого выберем первоначальную систему координатных осей x_1z_1 (рис. 3).

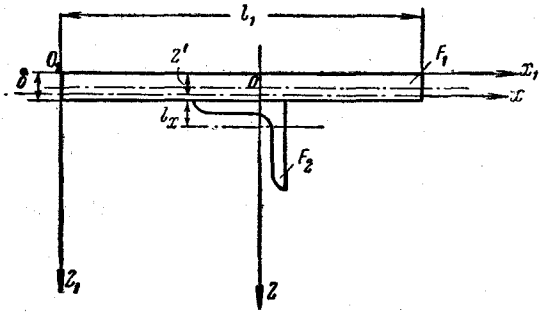


Рис. 3. Схема расположения координатных осей при определении центра тяжести и положения нейтральной оси профиля

Тогда расстояние центра тяжести профиля до оси x_1

$$Z' = \frac{S_x}{F},$$

где S_{x_1} — статический момент площади профиля относительно оси x_1;

F — площадь профиля.

Для подсчета статического момента разобъем площадь профиля на две площади: F_1 — площадь сечения пояска оболочки данной l_1 и толщиной δ; F_2 — площадь поперечного сечения распорного кольца. Теперь площадь профиля будет равна

$$F = F_1 + F_2,$$

а статический момент

$$S_{x_1} = F_1 \frac{\delta}{2} + F_2 (\delta + l_x),$$

где l_x — расстояние от центра тяжести поперечного сечения распорного кольца до его края в направлении к оболочке барабана.

Расстояние же от нейтральной оси оболочки до центра тяжести профиля

$$Z_0 = Z' - \frac{\delta}{2} = \frac{F_1 \frac{\delta}{2} + F_2 (\delta + l_x)}{F_1 + F_2} - \frac{\delta}{2}$$

или

$$\Delta\delta = Z_0 = \frac{F_1\,\delta + 2F_2\,(\delta + lx)}{2\,(F_1 + F_2)} - \delta.$$

Расчетная толщина оболочки в этом случае определяется по формуле:

$$\delta_p = \delta + \Delta\delta = \frac{F_1\,\delta + 2\,F_2\,(\delta + l_x)}{2\,(F_1 + F_2)}. \qquad (9)$$

Мы не затрагиваем вопроса о расчете оболочек с подкосами, так как их установка совершенно не отвечает своей цели [2, стр. 102—106].

3. Определение напряжений в оболочке барабана и условия ее прочности

Наибольшие нормальные напряжения в оболочке от действия изгибающего момента определяются по формуле:

$$\sigma_u = \pm \frac{M_x}{W_0},$$

где $W_0 = \frac{\delta^2}{\sigma\,(1 - \mu^2)}$ — момент сопротивления оболочки.

От действия кольцевых сжимающих сил нормальные напряжения определятся из выражения относительной деформации оболочки по ширине от прогиба y_x

$$e = \frac{\sigma_c}{E} = -\frac{y_x}{r},$$

откуда

$$\sigma_c = -y_x\,\frac{E}{r}.$$

Наибольшие же касательные напряжения от действия перерезывающей силы будут равны

$$\tau = \frac{3}{2}\,\frac{Q_x}{\delta}.$$

Если при определении расчетных напряжений ориентироваться на энергетическую теорию прочности, то условия прочности оболочки выразятся двумя формулами:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_4^2 + \sigma_c^2 - \sigma_4\,\sigma_c} \leqslant [\sigma];\quad \tau \leqslant [\tau], \qquad (10)$$

где $[\tau] = 0{,}6\,[\sigma]$ — касательные допускаемые напряжения;

$[\sigma]$ — нормальные допускаемые напряжения, которые могут быть увеличены по сравнению с принимаемыми в настоящее время до 2000 *кг/см²* для ст. 3 и 2500 *кг/см²* для ст. 5. Такое увеличение допускаемых напряжений возможно в связи со специфическими особенностями работы материала оболочек барабанов шахтных подъемных машин (относительно небольшие значения сил, действующих на оболочку; наличие деревянной футеровки, равномерно распределяющей нагрузку на оболочку и предотвращающей ее механический износ; отсутствие коррозии металла оболочек) и данными практики их эксплуатации.

Как известно, в формулу (10) должны входить главные напряжения, величина которых легко определяется по известным напряжениям

при помощи круга напряжений (круг Мора). Однако нетрудно заметить, что для условий работы оболочек барабанов шахтных подъемных машин с достаточной степенью точности можно пользоваться (при определении расчетных напряжений) вместо главных известными нормальными напряжениями.

Действительно, сжимающие напряжения по величине и знаку всегда равны одному из главных (касательные напряжения на их площадках равны нулю), а изгибающие напряжения вследствие этого разнятся от соответствующих главных напряжений (как показали подсчеты для случаев $\tau = 0 \div 1{,}5\,\sigma_u$) максимально на 3%.

В заключение необходимо отметить, что в общих случаях расчета оболочек барабанов шахтных подъемных машин вполне достаточно знать напряжение хотя бы в пяти местах: при $x = \pm \frac{l}{2}$, $x = \pm \frac{l}{4}$ и $x = 0$ (середина длины оболочки).

Определим для этих случаев прогибы, изгибающие моменты и перерезывающие силы.

Для концов оболочки при $x = \pm \frac{l}{2}$:

$$y_1 = 0,$$

$$M_1 = \frac{P}{2\cdot\beta^2}(K_1 \cos\alpha \operatorname{ch}\alpha + K_2 \sin\alpha \operatorname{sh}\alpha) = \frac{P}{2\beta^2}\,\chi_1(\alpha),$$

$$Q_1 = \frac{P}{2\beta}[(K_2 - K_1)\sin\alpha \operatorname{ch}\alpha + (K_2 + K_1)\cos\alpha \operatorname{sh}\alpha] = \frac{P}{2\beta}\,\chi_2(\alpha) \qquad (11)$$

При $x = \pm \frac{l}{4}$:

$$Y_2 = \frac{Pr^2}{E\delta}\left(1 - K_1 \sin\frac{\alpha}{2}\operatorname{sh}\frac{\alpha}{2} + K_2 \cos\frac{\alpha}{2}\operatorname{ch}\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{Pr^2}{E\cdot\delta}\,\chi_3(\alpha),$$

$$M_2 = \frac{P}{2\beta^2}\left(K_1 \cos\frac{\alpha}{2}\operatorname{ch}\frac{\alpha}{2} + K_2 \sin\frac{\alpha}{2}\operatorname{sh}\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{P}{2\beta^2}\,\chi_4(\alpha),$$

$$Q_2 = \frac{P}{2\beta}\left[(K_2 - K_1)\sin\frac{\alpha}{2}\operatorname{ch}\frac{\alpha}{2} + (K_2 + K_1)\cos\frac{\alpha}{2}\operatorname{sh}\frac{\alpha}{2}\right] = \frac{P}{2\beta}\,\chi_5(\alpha). \qquad (12)$$

Наконец, для середины длины оболочки при $x = 0$:

$$Y_0 = \frac{Pr^2}{E\delta}(1 + K_2) = \frac{Pr^2}{E\delta}\,\chi_6(\alpha),$$

$$M_0 = \frac{P}{2\beta^2}\,K_1, \qquad (13)$$

$$Q_0 = 0.$$

Для облегчения вычисления прогибов, изгибающих моментов и перерезывающих сил в табл. 1 приведены значения коэффициентов K_1, K_2, $\chi_1(\alpha) - \chi_6(\alpha)$ при встречающихся для оболочек барабанов шахтных подъемных машин значений α от 0,2 до 6.

Значения коэффициентов k_1, k_2, $\chi_1(\alpha) - \chi_6(\alpha)$ Таблица 1

α	K_1	K_2	$\chi_1(\alpha)$	$\chi_2(\alpha)$	$\chi_3(\alpha)$	$\chi_4(\alpha)$	$\chi_5(\alpha)$	$\chi_6(\alpha)$
0,2	0,0130	—0,998	—0,0268	—0,3953	0,005	0,00299	—0,1985	0,002
0,3	0,0295	—0,997	—0,060	—0,5993	0,0014	0,00711	—0,2922	0,003
0,4	0,0524	—0,996	—0,1065	—0,796	0,003	0,0126	—0,398	0,004
0,5	0,0805	—0,9945	—0,1683	—0,9955	0,0024	0,0175	—0,3134	0,0055
0,6	0,1173	—0,979	—0,237	—1,187	0,0113	0,0277	—0,631	0,021
0,7	0,1575	—0,960	—0,3175	—1,3675	0,0247	0,039	—0,680	0,040
0,8	0,196	—0,931	—0,408	—1,537	0,0428	0,036	—0,753	0,069
0,9	0,2475	—0,895	—0,498	—1,695	0,0584	0,065	—0,826	0,105
1,0	0,2923	—0,854	—0,60	—1,845	0,082	0,0767	—0,875	0,146
1,1	0,334	—0,793	—0,692	—1,951	0,1165	0,089	—0,906	0,207
1,2	0,372	—0,742	—0,798	—2,082	0,139	0,098	—0,9395	0,258
1,3	0,4025	—0,655	—0,8544	—2,125	0,195	0,113	—0,920	0,345
1,4	0,420	—0,5725	—0,9187	—2,1495	0,2443	0,124	—0,8892	0,4275
1,5	0,431	—0,491	—0,9714	—2,169	0,293	0,1328	—0,8501	0,509
1,6	0,265	—0,251	—0,6139	—1,331	0,597	0,087	—0,4863	0,749
1,7	0,426	—0,376	—1,1411	—2,259	0,252	0,118	—0,8025	0,624
1,8	0,4115	—0,2654	—1,050	—2,1357	0,4325	0,154	—0,5595	0,7346
1,9	0,395	—0,194	—1,036	—2,1325	0,479	0,169	—0,5825	0,806
2,0	0,371	—0,144	—1,058	—2,1025	0,512	0,1676	—0,5255	0,856
2,1	0,3445	—0,0952	—1,050	—2,075	0,5603	0,1708	—0,455	0,9048
2,2	0,319	—0,0542	—1,053	—2,075	0,5793	0,2204	—0,4625	0,9458
2,3	0,289	—0,0193	—1,041	—2,042	0,6121	0,180	—0,3306	0,9807
2,4	0,2601	0,00903	—1,0347	—2,030	0,64092	0,1835	—0,278	1,00903
2,5	0,233	0,0322	—1,0277	—2,020	0,6652	0,188	—0,3512	1,0322
2,6	0,206	0,050	—1,0235	—1,912	0,6893	0,1901	—0,2855	1,050
2,7	0,1798	0,0638	—1,011	—2,00	0,7138	0,1928	—0,1367	1,0638
2,8	0,1556	0,0733	—1,0095	—1,9875	0,68122	0,1948	—0,1003	1,0733
2,9	0,1333	0,0805	—1,006	—1,9952	0,7552	0,1972	—0,0664	1,0805
3,0	0,1134	0,0834	—1,008	—1,9853	0,77335	0,19584	—0,0408	1,0834
3,1	0,0937	0,086	—1,0032	—1,98856	0,7722	0,1983	—0,0105	1,086
3,2	0,0754	0,0849	—0,9855	—1,9368	0,80011	0,21427	0,01335	1,0849
3,3	0,061	0,0844	—0,9953	—1,995	0,8293	0,1981	0,0341	1,0844
3,4	0,0474	0,0814	—0,994	—1,990	0,8462	0,19575	0,0518	1,0814
3,5	0,0353	0,0776	—0,998	—1,996	0,8628	0,1933	0,0678	1,0776
3,6	0,0247	0,073	—0,995	—1,991	0,8779	0,19155	0,0807	1,073
3,7	0,0153	0,0685	—1,015	—1,986	0,8899	0,18744	0,0910	1,0685
3,8	0,00797	0,0627	—0,9985	—1,995	0,9327	0,18548	0,2084	1,0627
3,9	0,00149	0,0572	—0,9977	—1,9985	0,91933	0,18113	0,1112	1,0572
4,0	—0,00399	0,0529	—1,0315	—2,048	0,93018	0,18025	0,1202	1,0529
4,1	—0,0081	0,0461	—1,00	—1,998	0,94346	0,17075	0,1230	1,0461
4,2	—0,01121	0,04065	—0,997	—1,9746	0,9535	0,1644	0,12485	1,04065
4,3	—0,01397	0,03555	—0,994	—1,987	0,96465	0,15993	0,1314	1,03555
4,4	—0,01585	0,0310	—1,012	—2,008	0,9735	0,1541	0,1334	1,0310
4,5	—0,017	0,0264	—1,00	—1,9994	0,9825	0,1473	0,1333	1,0264
4,6	—0,01773	0,0222	—0,9991	—1,9648	0,99085	0,1411	0,1353	1,0222
4,7	—0,018	0,0184	—0,9977	—2,0003	0,9991	0,1331	0,13554	1,0184
4,8	—0,01765	0,01493	—0,9978	—1,98442	1,004	0,12815	0,1334	1,01493
4,9	—0,01745	0,01187	—1,0015	—2,004	1,0107	0,1221	0,1338	1,01187
5,0	—0,0168	0,0091	—1,0003	—2,002	1,0161	0,11545	0,1324	1,0091
5,1	—0,0159	0,00668	—1,065	—2,001	1,0208	0,10873	0,12975	1,00668
5,2	—0,0149	0,00457	—0,9975	—1,995	1,0249	0,10225	0,1272	1,00457
5,3	—0,01377	0,002815	—0,9936	—1,9865	1,02813	0,09535	0,11765	1,002815
5,4	—0,0127	0,001273	—0,9939	—1,9945	1,03161	0,08992	0,1211	1,001273
5,5	—0,0115	0,00003	—0,9924	—1,9775	1,0338	0,08359	0,11695	1,00003
5,6	—0,01041	0,001065	—1,1840	—1,960	1,02033	0,08392	0,10375	1,001065
5,7	—0,0092	—0,0019	—0,9994	—1,997	1,0388	0,0301	0,11032	0,9981
5,8	—0,0082	—0,00256	—0,999	—2,00	1,04045	0,06695	0,1067	0,99744
5,9	—0,00712	—0,00325	—0,981	—2,019	1,0435	0,061	0,10406	0,99675
6,0	—0,00336	—0,00484	—0,5465	—1,0864	1,0659	0,0307	0,05366	0,99816

4. Порядок расчета оболочек барабанов шахтных подъемных машин по предлагаемому методу

1. Толщина оболочки может быть определена по допускаемому напряжению сжатия

$$\sigma_c = R_z \approx \frac{S}{t\delta'} C'$$

откуда

$$\delta' \approx \frac{S}{R_z t} C'.$$

Здесь R_z — для ст. 3 может быть принято 1400 *кг/см²*, а для ст. 5—1500 *кг/см²*.

Коэффициент уменьшения натяжения в навитом канате C' предварительно может быть принят равным 0,8. По δ' необходимо выбрать стандартную толщину оболочки и по графикам рис. 4 — действительный коэффициент уменьшения натяжения в навитом канате C.

В зависимости от характера загрузки оболочки давление P на нее определяется по формулам:

при однослойной навивке с равномерной нагрузкой

$$P_1 = \frac{S_1}{R\,t} C;$$

то же с частичной загрузкой длины оболочки:

$$(P_c)_1 = 1{,}4\ P_1 \frac{a_1 \pm x}{l};$$

при двухслойной навивке с равномерной нагрузкой

$$P_2 = \frac{1}{Rt} \left[S_1 + \frac{S_2}{1+\lambda}\right] C;$$

то же с частичной загрузкой оболочки вторым слоем каната:

$$(P_c)_2 = \frac{1}{Rt} \left[S_1 + 1{,}2 \frac{a_2 \pm x}{l} \frac{S_2}{1+\lambda} \right] C.$$

Здесь C_i и x берутся в соответствии с соображениями, изложенными выше, а коэффициент λ определяется по графикам рис. 5.

В случае применения колец жесткости (когда толщина оболочки принимается меньше толщины δ, определенной по допускаемому напряжению сжатия (их размеры и число могут быть определены, например, по методу Б. А. Морозова [4]) поперечное сечение кольца жесткости находится по формуле:

$$F_{кол} = 1{,}56\ \delta \sqrt{R\,\delta} \frac{\alpha'}{1-\alpha'},$$

где $\alpha' = 0{,}4 \div 0{,}6$ — коэффициент, характеризующий жесткость кольца.

Ширина и высота кольца из условия осевой и радиальной устойчивости определяются по формулам:

$$h = \sqrt[3]{\frac{P_{кр.} R^2}{0{,}18\ E}}; \quad H = \sqrt[3]{\frac{YP_{кр.} R^3}{E\ h}};$$

где $P_{кр.} = 1{,}56\ P \sqrt{R\,\delta}\ \alpha'\ K_к$, причем запас устойчивости кольца $K_к = 2{,}5$.

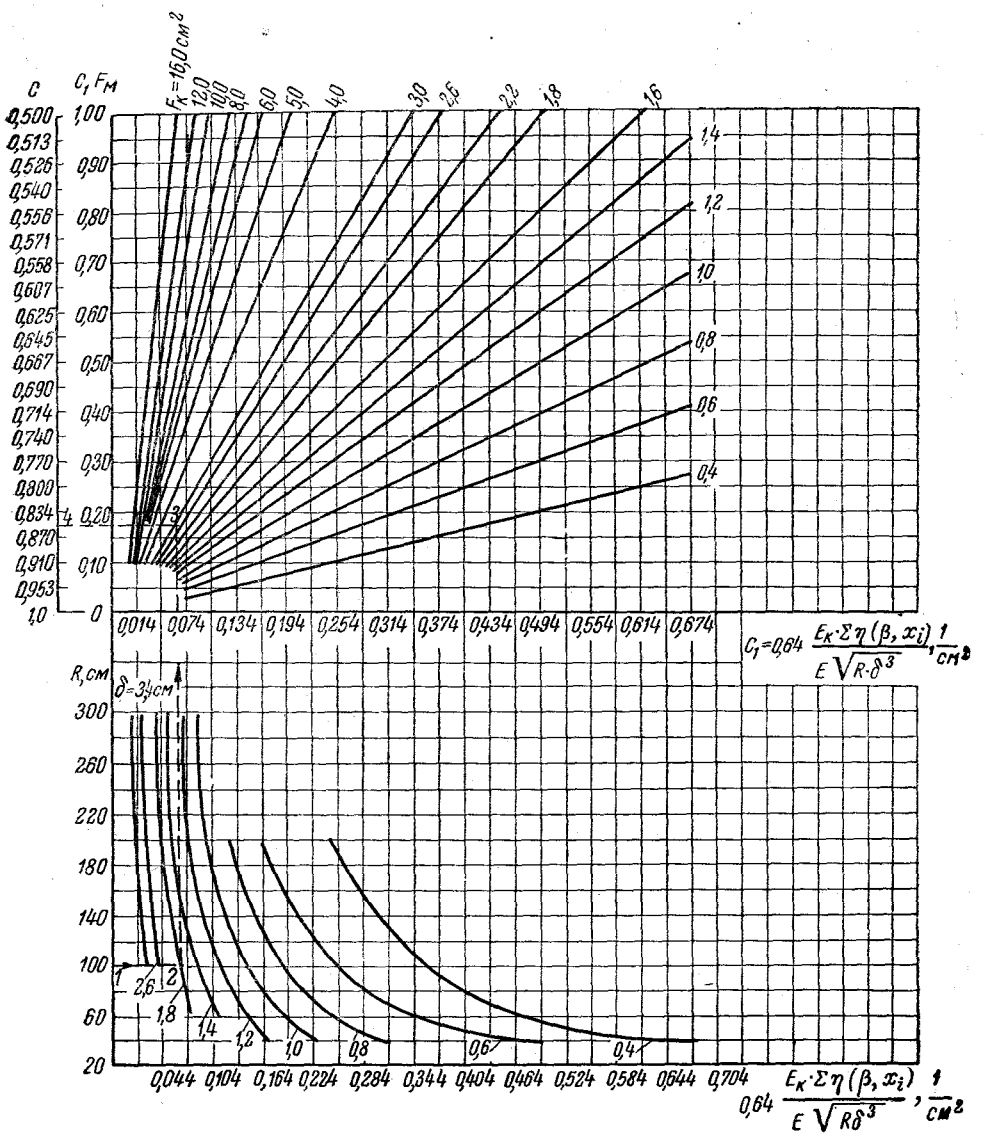


Рис. 4. Графики для определения коэффициента уменьшения натяжения C в навитом канате в зависимости от радиуса навивки каната R, толщины оболочки δ и площади поперечного сечения каната $F_к$ при $E_к = 1{,}5 \cdot 10^6$ *кг/см²* и $E = 2 \cdot 10^6$ *кг/см²*. При определении суммы функций $\sum_{i=n}^{i=n} \eta(\beta, x_i)$ приращения x_i приняты равными среднему шагу навивки каната возможному для данного барабана

Найденная таким образом площадь кольца $F_{кол} = hH$ не должна отличаться от площади, определенной первоначально, более чем на 5—10%. В противном случае необходимо задаться новым значением α' и повторить расчет сначала.

Для создания необходимой устойчивости оболочки расстояние между кольцами жесткости должно быть не более

$$l_1 = 1{,}5\ 10^6\ \frac{\delta^{2,5}}{R^{1,5}\ P\ K_{об}},$$

где $K_{об} = 2$ — запас устойчивости оболочки.

Наименьшее число колец жесткости равно:

$$n = \frac{l}{l_1} - 1.$$

Тогда расчетная толщина оболочки будет определяться по формуле (9):

$$\delta_p = \frac{F_1\delta + 2\ F_2\ (\delta + lx)}{2\ (F_1 + F_2)},$$

причем необходимо иметь в виду, что δ_p должно быть равно или больше δ'.

2. Прогибы, изгибающие моменты и перерезывающие силы определяются по формулам (11), (12), (13).

Для концов оболочки при $x = \pm \frac{l}{2}$.

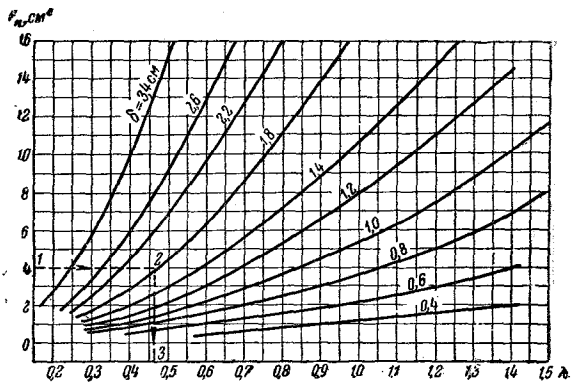


Рис. 5. Графики для определения коэффициента λ в зависимости от площади поперечного сечения каната и толщины оболочки δ (шаг навивки каната t принят равным диаметру каната d плюс 3 мм)

$$Y = 0;\ M_1 = \frac{P}{2\beta^2}\chi_1(\alpha);\quad Q = \frac{P}{2\beta}\ \chi_2(\alpha).$$

При $x = \pm \frac{l}{4}$.

$$y_2 = \frac{P\ r^2}{E\ \delta}\ \chi_3(\alpha);$$

$$M_2 = \frac{P}{2\beta^2}\ \chi_4(\alpha);\quad Q_2 = \frac{P}{2\beta}\ \chi_5(\alpha).$$

Для середины длины оболочки при $x = 0$:

$$Y_0 = \frac{P\ r^2}{E\ \delta}\ \chi_6(\alpha);$$

$$M_0 = \frac{P}{2\beta^2}\ K_1;$$

$$Q_0 = 0.$$

В этих формулах:

$$\alpha = \frac{\beta\ l}{2},$$

причем β определяется по графикам рис. 6

$$r = R - \frac{d + \delta}{2},$$

где d—диаметр каната.

Коэффициенты K_1, K_2, $\chi_1(\alpha)-\chi_6(\alpha)$ определяются при помощи табл. 1 по полученному значению α.

3. Напряжения в оболочке в любом месте определяются по формулам:

от изгиба $\sigma_u = \pm \frac{M_x}{W_0}$;

от сжатия $\sigma_c = -Y_x \frac{E}{r}$;

от перерезывающей силы $-\tau = \frac{3}{2} \frac{Q_x}{\delta}$.

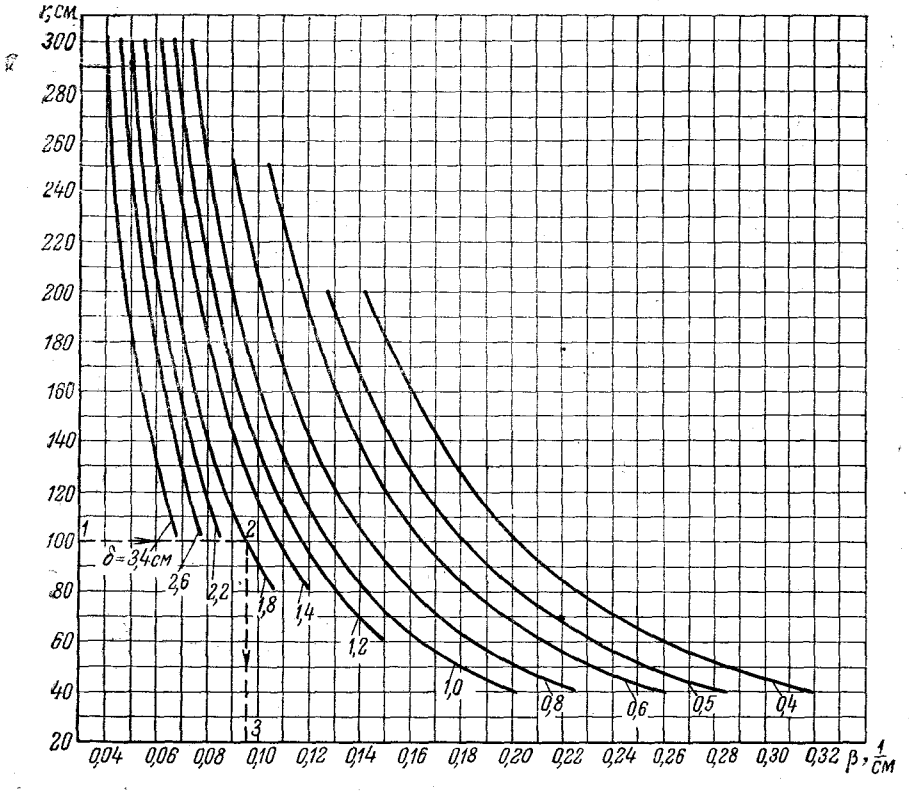


Рис. 6. График для определения коэффициента β в зависимости от среднего радиуса оболочки r и толщины оболочки δ

Момент сопротивления оболочки W_0 определяется табл. 2.

Расчетные (приведенные) нормальные напряжения определяются по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_c^2 - \sigma_u \sigma_c}.$$

Наконец, условия прочности оболочки барабана шахтной подъемной машины выразятся двумя формулами:

$$\sigma \leqslant [\sigma] \quad \text{и} \quad \tau \leqslant [\tau].$$

Таблица 2

Величины моментов сопротивления оболочки W_0 в зависимости от ее толщины δ при $\mu = 0{,}3$

δ (*см*)	W_0 ($см^2$)	δ (*см*)	W_0 ($см^2$)	δ (*см*)	W_0 ($см^2$)	δ (*см*)	W_0 ($см^2$)
0,3	0,01645	1,1	0,2210	1,9	0,6590	2,7	1,335
0,4	0,0293	1,2	0,2635	2,0	0,7325	2,8	1,430
0,5	0,0458	1,3	0,3095	2,1	0,8075	2,9	1,536
0,6	0,0659	1,4	0,3585	2,2	0,8846	3,0	1,645
0,7	0,0898	1,5	0,4120	2,3	0,9680	3,1	1,755
0,8	0,1171	1,6	0,4690	2,4	1,0550	3,2	1,866
0,9	0,1481	1,7	0,5285	2,5	1,1450	3,3	1,988
1,0	0,1830	1,8	0,5940	2,6	1,2380	3,4	2,112

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Гостехиздат, 1945.
2. Давыдов Б. Л. Расчет и конструирование шахтных подъемных машин. Углетехиздат, 1949.
3. Морозов Б. А. Исследование прочности барабанов шахтных подъемных машин. ЦНИИТМАШ, 1947.
4. Морозов Б. А. Исследование прочности барабанов грузоподъемных машин. ЦНИИТМАШ, 1949, книга 27.
5. Морозов Б. А. Исследование прочности шахтных подъемных машин. ЦНИИТМАШ, 1951.
6. Шиманский Ю. А. Расчет прочности корпуса подводной лодки, 1936.

Поступило
15 II 1954 г.