Проф. С. К. Конюхов.

Шахтный подъем по системе Копэ.

Подъемное устройство по системе Копэ в общих чертах можно описать так: на главном валу машины насаживается наглухо главный или ведущий желобчатый шкив и на этот шкив накидывается подъемный металлический канат, охватывающий шкив наполовину или более половины окружности. Два свободных конца каната отводятся в сторону на некоторую высоту и перекидываются через два направляющих шкива. Направляющие шкивы располагаются либо так, что их оси лежат в одной горизонтальной плоскости, либо так, что их средние плоскости лежат в одной плоскости с средней плоскостью ведущего шкива. Последнее расположение направляющих шкивов благоприятнее для работы каната, ибо в этом случае угол девиации каната равен нулю, и таким образом устраняется возможность перегиба каната и истиранее его о режущую кромку желоба.

К свободным концам каната подвешиваются подъемные клети, а к укрепленному дну последних прикрепляется уравновешивающий нижний канат. Все это устройство схематически представлено на рисунки 1, где средние плоскости шкивов расположены в одной плоскости.

А главный или ведущий шкив

В и B_1 два направляющих шкива

С и C_1 груженая и порожняя клети

9-D-10 уравновешивающий нижний хвостовый канат 7-1-2-5-6-4-3 рабочий верхний головной канат.

Придерживаясь общей принятой терминологии, обозначим через L мертвый груз или тару (вес клети и вес вагонеток); через S обозначим вес каната головного, а через S_1 хвостового, а через N полезный поднимаемый груз. Все веса берутся в килограммах, а длины и площади в метрах и квадратных метрах, если не делается соответствующих оговорок. Подъем полезного груза в системе Копэ совершается исключительно за счет трения, которое возникает под влиянием движущихся грузов между канатом и поверхностью огибаемого им ведущего шкива.

Вот эта зависимость подъема груза от коэффициента трения между канатом и поверхностью ведущаго шкива и является основной причиной некоторой неуверенности в надежной работоспособности всего устройства.

Отсюда и возникает первая задача теоретического характера, сводящаяся к должному обоснованию этой надежности подъема, путем выявления природы коэффициента трения и его числовой величины.

Точное решение поставленной задачи представляет громадный интерес с теоретической точки зрения, но еще большое значение решение этой задачи представлено для практики рудничного дела. Однако не следует закрывать глаз на то, что выполнение этой задачи до чрезвычайности трудно, а потому приходится ограничиваться приближенным решением. Эту цель и преследует настоящая статья.

Прежде всего заметим, что при работе подъема по системе Копэ приходится поднимать только полезный груз N, ибо вес каната и мертвого груза у поднимающейся клети взаимно уравновешиваются такими весами у клети опускающейся. Таким образом, полагается $S = S_1$.

Если обозначить через R радиус ведущего шкива, то момент сопротивления при подъеме будет оставаться все время постоянными.

$$M = NR \text{ kg.mt.}$$

В действительности величина этого момента в течение всего подъема будет постоянно меняться и если можно говорить о постоянстве момента сопротивления, то только в тех пределах, когда установливается постоянная скорость перемещения, так называемая максимальная скорость, при которой момент сопротивления достигает максимальной величины, а этот момент и должен привлекать наше внимание, так как при помощи его ведется рассчет мощности машины. Пусть у нас имеется неподвижный шкив (чер. 2), к которому в точке A прикреплен канат весом Sa. К этому канату прикреплена клеть, вес которой с вагонетками будет La, а в вагонетках лежит полезный груз N.

При описанном условии в точке A грузового каната возникает статическое напряжение, равномерно распределенное по поперечному сечению каната и равное сумме действующих весов $= Sa + La + N$.

Если привести рассматриваемую систему в движение, заставляя вращаться шкив по направлению стрелки, то, полагая ускорение равным p mt/sec², а ускорение от силы тяжести $g = $ mt/sce², получим дополнительную нагрузку каната

$$\frac{(Sa + La + N)\,p}{g}\text{ kg}$$

Но этим дело не кончается, так как переход от состояния покоя к движению сопровождается возникновением сопротивления подъему, которое растет с ростом скорости и охватывает потери на трение направляющих клети о проводники, сопротивление от жестокости каната и т. д.

Суммарная величина этих сопротивлений выражается различными авторами различно.

Профессор фон Гауэр считает это сопротивление подъему постоянным

$$R = 0{,}04\ (N + La + Sa)$$

Профессор Грабак кладет

$$R = 0{,}05\ (N + La + Sa)$$

Фон Рейхе допускает, что

$$R = 0{,}04\ (N + La + Sa) + 0{,}06\, f\, v^2,$$

где f площадь сечения клети в направлении, перпендикулярном к направлению движения, а V—скорость клети (максимальная).

В последние годы перед войной одновременно над выяснением величины R занимались Гавличек и Рутс.

По Гавличеку

$$R = 0{,}012\ (N + La + Sa) + 4\, f\, v^{1{,}275}$$

где f и v имеют те же значения, что и у Рейхе.

По Рутсу

$$R = 0{,}015\ N + 0{,}60\, f (w^2 + v^2), \text{ если } w < v$$

$$R = 0{,}015\ N + 1{,}20\, f w . v, \text{ если } w \geq v.$$

Здесь w—скорость вентилиценного потока в подъемном стволе шахты, а v—скорость хода клетей в месте их встречи.

Не трудно видеть уже из короткой справки, что конечные выводы будут разниться один от другого, в зависимости от того, на какой формуле для R остановиться. Однако характер общих выводов все же сохранит направление. Чтобы не усложнить слишком выкладок, остановимся на формуле, данной фон Гауэром.

Тогда напряжение нашего каната получит такой вид.

$$S = N + S_a + L_a + (N + L_a + S_a)\ (0{,}1\ p + 0{,}04)\ klg$$

Здесь положено $g = 10$ вместо 9,81.

Оставляя по-прежнему закрепление каната в точке A (чер. 3), перекинем канат через направляющий шкив и подвесим к свободному концу пустую клеть т. е. без полезного груза N. Тогда нагрузка каната в точке B будет.

$$S_b + L_b$$

Если заставить вращаться шкив в напривлении стрелки, то опять появятся дополнительные сопротивления, но так как клеть теперь опускается, то эти дополнительные сопротивления будут тормозить движение, как бы уменьшать вес спускающейся клети.

В таком случае напряжение каната в точке B будет.

$$S_1 = S_b + L_b - (S_b + L_b)\ (0{,}1\ p + 0{,}04)$$

В момент перехода от равнозамедленного движения к движению установившемуся с постоянною скоростью наступает неблагоприятный момент для движения опускающейся клети.

Чтобы сохранилось натяжение опускающегося конца каната, необходимо, чтобы $S_1 \geqq 0$ или

$$S_b + L_b \geqq, (S_b + L_b)\ (0{,}1\ p + 0{,}04)$$

Оттуда $p = 9{,}6$ (точнее 9,78).

Эта величина p и представляет критическое успорение для системы Копэ.

Совместим теперь оба шкива, отбросим закрепление в точке A и подвесим снизу клети уравновешивающий хвостовой канат C. Тогда и получится простейшая схема под'ема Копэ. Роль закрепления каната в точке A будет в этом случае играть трение, возникающее между канатом и ободом шкива под влиянием нагрузки на оба конца каната.

Можно положить, что

$$S = S_1 + P$$

С другой стороны, еще Эйлер показал, что.

$$S = S_1\, e^{\frac{f.s}{r}}$$

Где f — коэффициент трения, s — длина дуги, охватываемой канатом по шкиву, а r — радиус шкива. Если отнести дугу обхвата к радиусу $r = 1$, то получится.

$$S = S_1\, e^{f\alpha}$$

Тогда для величины P получим такое выражение.

$$P = S_1\ (e^{f\alpha} - 1)$$

Если положить $f = 0{,}28$' то получим такие числовые величины для $e^{f\alpha}$.

$$\alpha = 0{,}4\pi - 0{,}6\pi - 0{,}8\pi - \pi - 1{,}2\pi - 1{,}4\pi - 1{,}6\pi - 1{,}8\pi - 2\pi$$

$$e^{f\alpha} = 1{,}42 - 1{,}69 - 2{,}02 - 2{,}41 - 2{,}87 - 3{,}43 - 4{,}09 - 4{,}87$$

Не будем входить в тонкости рассматриваемого вопроса и учитывать поправку Рэнкина в натяжении набегающего конца каната (натяжение несколько больше, чем получается по формуле Эплера, вследствие действия центробежной силы), оставим в стороне и поправку французского инженера Кретца на скольжение каната по шкиву. До известной степени эти поправки укладываются в предположение $f \geqq, 0{,}3$. Тогда для величины P при $\alpha = \pi$, получим выражение

$$P = 1{,}566\ S_1$$

Такит образом, полагая $L_a = L_b$ и $S_a = S_b$, получим

$$P = S - S_1 = N + (0{,}1\ p + 0{,}04)\ (N + 2S_a + 2L_a)$$

Отсюда будем иметь

$$p = 10\left[\frac{P - N}{N + 2\,S_a + 2\,L_a} - 0{,}04\right]$$

Чтобы ближе подойти к системе Копэ, обратимся к черт. I. В этой схеме мы видим два дополнительных направляющихся шкива B и B_1, массы которых будут получать ускорение от каната и сопротивление движению которых тоже должно быть преодолено канатом. Эти дополнительные члены вызовут в свою очеред изменение в напряжении канатов, которое можно учесть по уже знакомому нам методу.

Предположим, что приведенный к середине каната вес каждого шкива будет Q. Тогда сила для ускорения каждого шкива будет $Q\frac{p}{g}$, а сопротивление движению $= 0{,}04\,Q$.

Прибавим действие этих дополнительных агентов к найденным нами напряжениям концев каната.

Тогда для поднимающегося конца каната будем иметь

$$S = N + S_a + L_a + (N + L_a + S_a + Q)(0{,}1\,p + 0{,}04)$$

Для опускающегося конца каната.

$$S = S_a + L_a - (S_a + L_a + Q)(0{,}1\,p + 0{,}04)$$

Соответствующая величина ускорения p получит такое выражение.

$$p = 10\left[\frac{P - N}{N + 2\,S_a + 2\,L_a + 2\,Q} - 0{,}04\right]$$

Эта формула является простейшей для подсчета ускорения для всякого подъема. В ней неизвестной является величина Q приведенного веса шкива.

Чтобы выявить эту неизвестность, можно остановиться на средних значения приведенных весов, наблюдающихся в осуществленных установках.

Следующая таблица и дает интересующие нас числа приведенных весов.

Диаметр канатного шкива mtr.	Q для обода.	
	Чугунный.	Литого железа.
3500 mm	1150 kgr	1100 kgr
4000 ›	1550 ›	1400 ›
4500 ›	2050 ›	1850 ›
5000 ›	2450 ›	2250 ›
5500 ›	2750 ›	2500 ›
6000 ›	3050 ›	2750 ›

Обращаясь к последнему выражению для p, не трудно усмотреть, что величина p, характеризующая подъемную способность шкива Копэ, бедет тем больше, чем больше разница $P - N$, а так как $P = S_a + L_a$, то значит, чем больше вес каната и мертвого груза по сравнению с полезным грузом N. Затем величина p будет больше, чем меньше приведенный вес Q.

Первый вывод на практике находит подтверждение в том, что систему Копэ предпочитают ставит при глубоких шахтах.

Второй вывод прямо указывает на то, что выгоднее брать шкивы из литого железа, а не чугунные, хотя разница в этих весах и не такая значительная.

Явно из формулы для p ничего больше извлечь нельзя, но обходными путями можно добиться получения и других интересных ответов.

На практике предпочитают работать со шкивами-большого диаметра, ибо тут замечается увеличение работоспособности шкива. Между тем, величина диаметра шкива не фигурирует в формулах для определения ускорения.

Инженер М. Кауфхольд в Эссене ставит этот вопрос в такой неприемлимой форме для теории, что обойти молчанием его вывод нельзя.

Вот, что он пишет по этому случаю: Hier steht Theorie und Praxis in einem gewissen Widerspruch, denn letztere behauptet auf Grund Wahrnehmungen, dass das nicht Fall sei, vielmehr mit Vergrösserung der Scheibe auch eine Steigerung der Leistung verbunden sei....» и т. д.

Чтобы оправдать теорию он прибегает к такому доводу: углубления между отдельными проволоками каната хотя и заполняются смазкой, но все жена рабочей стороне каната можно отметить почти что каждую проволоку расположенную наклонно к горизонту от свивки в пряди. Эти отдельные наклонные проволоки, соприкасаясь с мягкой футеровкой шкива (обычно деревянной или кожанной), оставляют под влиянием сильной нагрузки на канат углубления в футеровке. И в конце концов получается нечто вроде зубчатого зацепления. Чем меньше кривизна обода шкива, тем больше будет находиться в сцеплении пар таких мелких зубьев. Чтобы сделать эти зубья и впадины на ободе более глубокими, располагают отдельные трости или планки футеровке волокнами поперек к канату, а не вдоль.

Все это совершенно верно. Но никакого противоречия теории с практикой тут не наблюдается.

Начнем с того, что существует хорошо обоснованное соотношение между диаметром отдельных проволок и диаметром шкива: Так для канатов из железной проволоки, у которой $k_z = 6 - 8$ kg/mm², $Д = (1000 - 1200)\ \delta$, где Д—диаметр шкива в mm, а δ—диаметр проволоки. Это соотношение является минимальным и оно обусловлено необходимостью подвергать проволоку изгибу в возможно меньшей мере.

Для стальных проволок это соотношение берется еще больше $Д = (1200 - 1400)\ \delta$, а для проволоки специальной стали $Д = (1400 - 1600)\ \delta$.

Чем глубже шахта, тем толще берется канат и тем больше проволока будет подвергаться перегибу, на что тратится работа. На эту работу будет затрачиваться часть нагрузки, а следовательно, сила трения между шкивом и канатом, равная коэффициенту трения на нагрузку, будет меньше. Вот и все

Относительно коэффицента трения надобно сказать еще следующее. В новых установках оно принимается равным 0,15 — 0,26, но часто его берут 0,3 — 0,4.

Лучше держаться предела $\mu \leq 0{,}3$.

В этом отношении практика могла бы с успехом притти на помощь теории путем введения соответствующей поправки в выборе величины коэффициентов трения на основании разницы ускорений, получаемых по формуле и наблюдаемых в действительности.

Путь к этому согласному действию теории и практики может быть такой.

Пусть p—ускорение, полученное вычислением по формуле, а p_1 — ускорение, наблюдаемое в выполненной установке. Тогда отношение $p_1 : p = \eta$ будет коэффициентом поправки на работоспособность подъемника.

Инженер М. Кауфхольд дает для вычисления p_1 такое выражение

$$p_1 = \eta \cdot 10 \left[\frac{1.566\,(S + L) - N}{3.566\,(S + L + Q) + N} - 0{,}04 \right]$$

Если бы установить на ряде установок величину η, то получено было бы простое и верное средство для определения работоспособности шкива Коере в каждом отдельном случае. При этом устранен был бы произвол при выборе коэффициента трения, а, значит, и принимаемое сопротивление подъему.

При одной установке фигурировали такие числа $N = 4400$, $Q = 2500$, $S = 6200$ и $L = 7000$. Опытом установлено было, что $p_1 = 2{,}04$, а вычисление по формуле дало $p = 2{,}28$. Таким образом, $\eta = 2{,}04 : 2{,}28 = 0.875$.

Вычисления можно облегчить следующим способом.

Если $\mu = 0{,}3$ и $g = 9{,}81 \backsim 10$ mtr, то можно положить

$$e^{\mu\alpha} - 1 = x \text{ и } e^{\mu\alpha} + 1 = Z$$

Тогда получим

$$p = 9{,}81 \left[\frac{x(S + L) - N}{Z(S + L + Q) + N} \right]$$

Построим диаграмму зависимости (фиг. 5) между $Z - 1$ и μ, откладывая по оси абсцисс значение μ, а по оси ординат $e^{\mu\alpha}$. Тогда можно обойтись без вычисления, беря из этой диаграммы значения

$$x = e^{\mu\alpha} - 1 \text{ и } Z = e^{\mu\alpha} + 1.$$

Пример. Пусть $S = 6200$, $L = 7200$ $N = 4000$ и $Q = 2500$.

Если взять $\mu = 0{,}22$, то по диаграмме этому значению μ соответствует $e^{\mu\alpha} = 2$. Следовательно, $x = 1$ и $Z = 3$, а $p = 1{,}37$ mtr.

Большой интерес и значение представляет подсчет дополнительных напряжений, которым подвергается канат от действия мгновенных сил. Подсчет показывает, что эти напряжения занимают такое важное место, что их по всей справедливости нужно назвать не дополнительными, а главными напряжениями.

В основу такого подсчета кладутся такие гипотезы:

1. Пропорциональность удлинения каната величине действующей силы т. е. законе Гука.

2. Превращение всей кинетической энергии в момент наибольшей деформации в потенциальную энергию растяжения.

3. Волновая теория и др.

Необоснованность приложения к изучению деформации каната первой гипотезы доказывается тем, что закон Гука приложим к телам, в которых возникают малые деформации, а в канате эти деформации отнюдь не малые.

Неприложимость второй гипотезы к изучению разбираемого явления можно мотивировать тем, что при внезапных силах или остановке каната в нем появляются упругие волны, энергия которых и потенциальная и кинетическая.

Вот почему и напряжения, вычисляемые по этой теории, получаются большими, чем по волновой теории. Исключение представляют лишь те участки, где проявляется интерференция волн. Тогда волновая теория дает напряжения избыточные.

Если положить в основу волновой теории закон Гука, то, как показал профессор Динник, можно решить задачу о вычислении напряжения каната очень просто.

Применим этот метод к рассчету дополнительных напряжений в канате при посадке клети на кулаки. Будем рассматривать хвостовый уравновешивающий канат.

Если шахта значительной глубины, то можно смело положить, что работа деформации исключительно сосредоточивается на канате.

Пусть верхняя клеть села на кулаки со скоростью V. Тогда верхний конец каната останавливается вместе с клетью, а нижний конец продолжает двигаться с той же скоростью, какою обладает вся подвижная система до посадки клети на кулаки. В результате в канате возникают, начиная сверху, растягивающие напряжения, распространяющиеся вдоль каната со скоростью звука.

Доказывается это следующим образом.

Положим, что на конец бруска AD действует сжимающая сила P (чер. 6). Это действие силы передается по длине бруска от слоя к слою, и, по существу говоря, является не чем иным, как движением. А если это так, то тут на лицо условие для приложения законов Динамики. Проще всего тут можно приложить закон количества движения, который формулируется так: количество движения равняется импульсу силы

$$MV = P.t$$

Если скорость передачи сжатия обозначить через k, то по истечении времени t сжатие передается на участок $kt = AB$. С этого момента часть бруска ABCD, сжатая до предела силой P, будет двигаться, как неизменяемое тело, все точки которого обладают одной скоростью V, определить которую не представляет никакого труда. В самом деле, в течение безконечно малаго промежутка времени dt сжатие передается от плоскости BC к плоскосто ET. Называя длину BE через ds, получим

$$V = \frac{ds}{dt}$$

В левой части закона количества движения осталась неопределенной только масса M. Найдем ее.

Если обозначить поперечное сечение бруска через ω, то объем ABCD будет

$$\omega . k . t .$$

Называя плотносcь тела бруска через δ, получим его вес

$$\omega . k . t . \delta,$$

а деля этот вес на ускорение силы тяжести g, узнаем и массу

$$M = \frac{\omega . kt\delta}{g}$$

Для безконечно малой массы, заключающейся в объеме BCEF, можно написать

$$dM = \frac{\omega k dt . \delta}{g}$$

По известной формуле ссротивления материалов для безконечно малого сжатия ds можно написать такое выражение

$$ds = V dt = \frac{P . k dt}{E\omega}$$

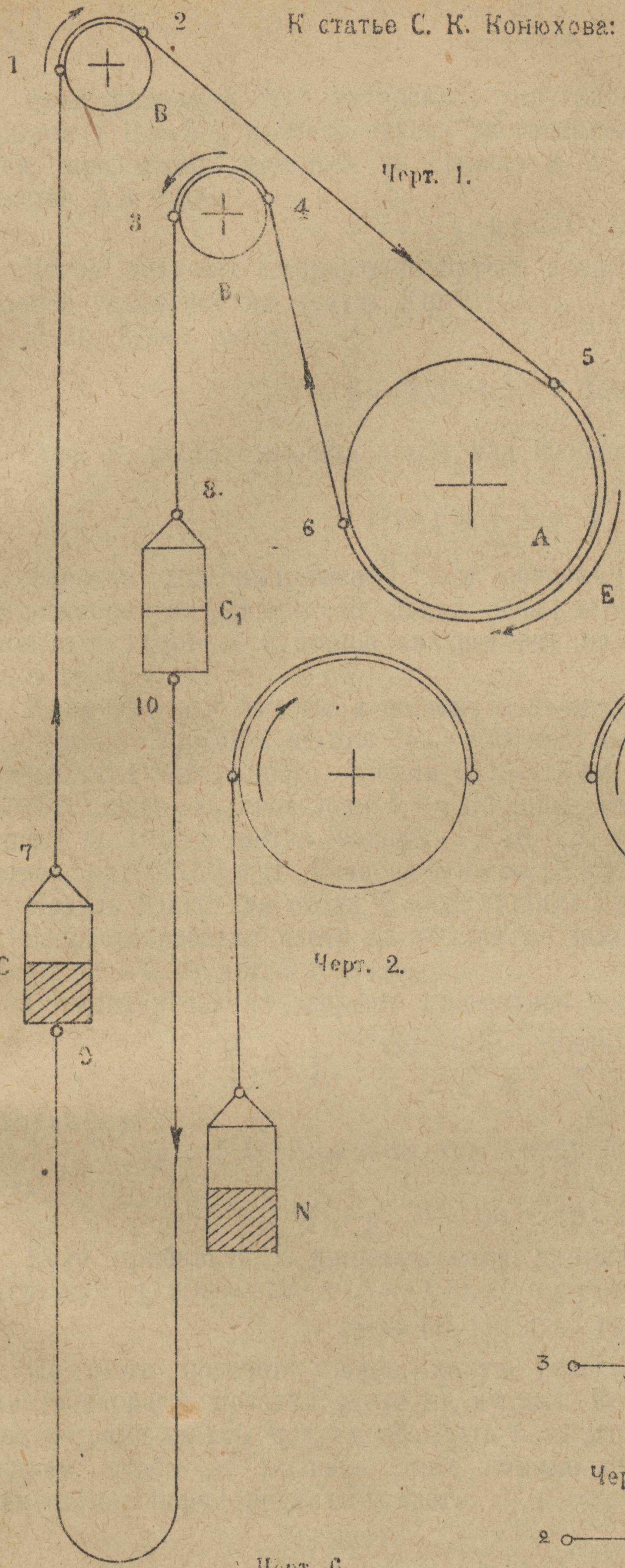
$$\text{Откуда } V = \frac{Pk}{E\omega}$$

Имея теперь все данные, напишем закон количества движения

$$P dt = \frac{\omega . k dt \delta}{g} \cdot \frac{Pk}{E\omega}; \; k = \sqrt{\frac{Eg}{\delta}}$$

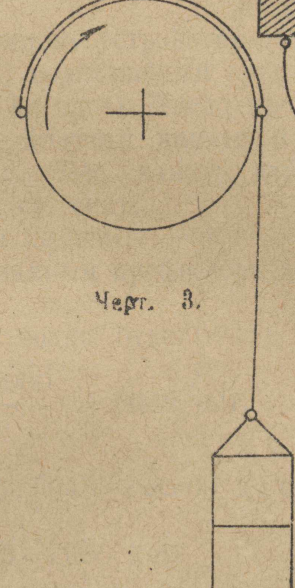
Таким образом в свое время получено было выражение для скорости распространения упругих деформаций в твердых телах знаменитым Ньютоном, неувядаемой славе которого поется теперь отходная физиками.

В акустике дается совершенно такое же выражение для определения скорости распространения звука в стержнях или проволоках.

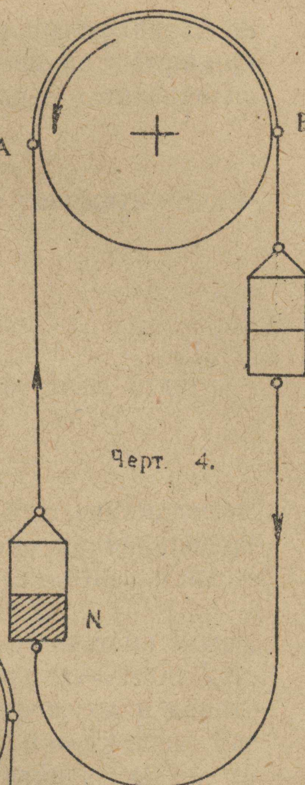


Черт. 1.

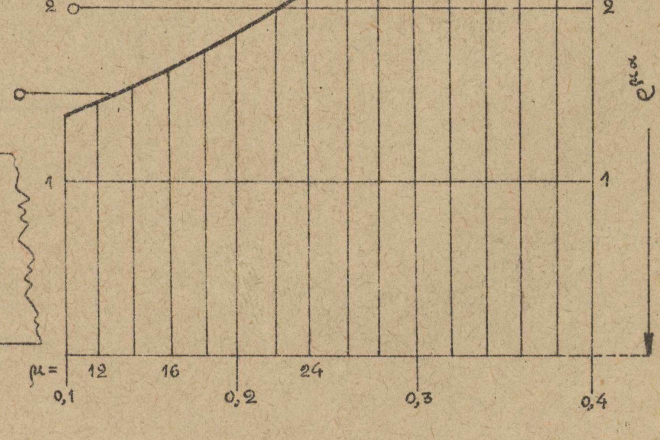
Черт. 2.



Черт. 3.

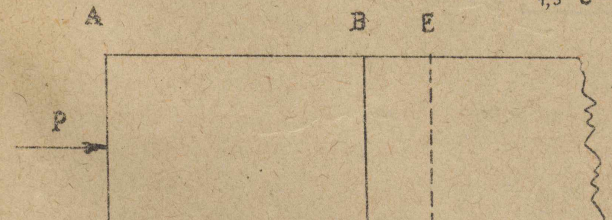


Черт. 4.



Черт. 5.

Черт. 6.



Если положить, что за время t упругая деформация распространится на участок $AB = kt$, а часть бруска за сечением BC вправо еще не доформируется, продолжая двигаться со скоростью V, то относительное удлинение на участке AB будет

$$Vt : kt = V : k$$

Чтобы получить напряжение бруска в части AB, нужно умножить относительное удлинение на модуль Юнга.

Итак, будем иметь

$$p = EV : k = V \sqrt{\frac{E\delta}{g}}$$

Сила F, растягивающая канат или вообще деформируемое тело, будет

$$F = p\omega = V\omega \sqrt{\frac{E\delta}{g}}$$

Формула для напряжений дает основание к выводу, что данамическое напряженпе не зависит от длины деформируемого тела. Оно прямо пропорционально скорости и корню квадратному из величины модуля Юнга и плотности тела.

Применим эти выводы к нашему подъемному устройству по системе Коере.

Пример: Глубина шахты $H = 800$ mm, поднимаемый груз $Q = 1200$ kgv. Канат стальной равного сечения ($kz = 15\ kg/mm^2$). Число проволок в канате $n = 36$. Диаметр проволоки $\delta = 2{,}5$ mm. Диаметр каната $d = 24$ mm. Вес одного погонного метра каната $= 1{,}76$ kg. Вес каната длиною $400 + 25$ метров, будет 750 kgv. Сечение $\omega = \infty 15$ кв. сент.

Модуль Юнга для стали $E = 2.000.000\ kg./cm^2$.

Скорость посадки клети на кулаки по данным профессора М. М. Федорова $V = 0{,}20 - 0{,}30$ метра в секунду.

В таких условиях скорость продольной волны будет

$$k = \sqrt{\frac{1000 \,.\, 9{,}81 \,.\, 20000}{7 \,.\, 7}} = 5048 \text{ mtr.}$$

Напряженпе

$$p = EV : k = 2000.000 \times 0{,}25 : 5048. = \infty 60\ kg/cm^2.$$

Сила

$$F = p \,.\, \omega = 60 \times 15 = 900 \text{ kgg.}$$

Если прибавить к динамическому напряжению каната еще статическую нагрузку $= (1200 + 750) : 15 = 130$, то получим полное напряжение на кв. сент.

$$P = 60 + 130 = 190 \text{ kgg.}$$

Из этого подсчета видно, какую большую роль играет в напряжении каната скорость посадки клети на кулаки. Вот почему машинист при подъемной машине шахты должен обладать большой опытностью в управлении движением, чтобы не вызвать, даже помимо своей воли, катастрофы, а в лучшем случае порчи подхватов клети.