Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIV, вып. 1, 1957 г.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ ВИБРАЦИОННОГО УГОЛЬНОГО СТРУГА

В. А. Перетолчин

Колебательные явления в настоящее время широко используются во всех областях техники. Первыми попытками применения колебаний для разрушения угольного массива являются резонансный и вибрационный струги.

Повседневный опыт свидетельствует об эффективности ударного приложения нагрузки для разрушения хрупких материалов. Уголь же по природе своей является относительно хрупким, и применение ударного скалывания его при выемке вполне естественно.

При работе любой угледобывающей машины имеет место определенная степень динамичности процесса воздействия на угольный массив, но в этом случае динамичность процесса воздействия является не результатом заданного режима работы, а обусловлена явлениями разрушения угля как аморфной массы. То же наблюдается при работе статического угольного струга. В динамических стругах, наоборот, задается такой режим работы, при котором происходит периодическое накопление кинетической энергии и отдача ее в виде ударов по массиву.

Появление динамических угольных стругов связано с попыткой расширения области применения стругов на пласты средней и выше средней крепости. Применение статических стругов, как показал опыт работы, ограничено, так как разрушение угля связано со значительными и резкими колебаниями тяговых усилий и потребляемой мощности. При повышенной крепости угля, наличии породных прослойков и твердых включений работа статического струга становится практически невозможной.

Представителем динамических стругов является вибрационный. Ударное воздействие на массив в этом случае осуществляется за счет колебания всего корпуса. Под действием внутренних неуравновешенных масс струг, преодолевая натяжение каната и трение, отходит от забоя и при обратном движении наносит удар. Энергия ударов при этом определяется величиной кинетической энергии, приобретаемой стругом.

Колебание всего корпуса обеспечивает отсутствие каких-либо статически действующих ножей и определяет, вследствие неподвижности ножей относительно корпуса, надежность конструкции исполнительного органа. Кроме того, при этом легко достигается регулирование высоты снимаемой стружки, а передача энергии ударов происходит через места наибольшего сопротивления со стороны угольного массива.

Экспериментальные исследования в области создания вибрационных стругов ограничиваются пока испытанием одного опытного образца

струга ВХ-1. Вследствие отсутствия каких-либо теоретических работ в этом направлении выбор основных параметров динамических стругов производился Гипроуглемашем путем экспериментирования с моделями [6]. Как показали испытания струга ВХ-1 в ДОНУГИ, на таком принципе возможно создание достаточно эффективной угледобывающей машины и для установления наиболее выгодных параметров такого струга необходимы дальнейшие исследования.

В теоретических же исследованиях еще не решен окончательно вопрос о возможности применения вибрационного струга [1—3].

Так, например, П. С. Кучеров в основу анализа работы струга положил не ударный режим, а статический, так как рассматривал воздействие на массив в зоне упругих деформаций без исчезновения контакта струга с массивом. Такой режим работы вибрационного струга мало отличается от работы статического струга. Принятые из этой предпосылки условия и полученные уравнения не отражают наиболее эффективных режимов работы и поэтому не могут являться доказательством неэффективности вибрационного струга.

В работе Б. Н. Любимова рассмотрены установившиеся режимы колебания струга и влияние натяжения каната на работу струга без учета трения и упругости каната [3]. Это исследование имеет важное значение для разработки теории работы вибрационных стругов и может служить одной из предпосылок создания проекта эффективного вибрационного струга.

Для продолжения работ по созданию вибрационных стругов, безусловно, необходимо теоретически обосновать возможность их применения, установить влияние основных параметров струга на его работу (для правильного выбора этих параметров при конструировании), выяснить влияние трения на работу струга, величину натяжения каната и его упругость и т. д. Исследование этих вопросов позволит получить исходные данные для конструирования вибрационных стругов и предопределит возможное достижение их эффективности.

В соответствии с этим нами исследованы основные вопросы динамики вибрационного струга [5]: влияние параметров возбуждающего устройства на колебание струга, неустановившийся и установившийся режим движения струга, влияние сил трения на параметры движения, влияние натяжения каната и его упругости на работу струга. Кроме того, установлены зависимости, определяющие параметры движения струга и выбор натяжения каната с учетом силы трения.

1. Определение параметров свободных колебаний струга

Под свободными колебаниями струга понимается установившееся колебательное движение без сопротивления, т. е. при отсутствии действия внешних сил в направлении движения. Параметры движения тогда будут определяться выбранным возбуждающим устройством. Параметрами движения являются частота и амплитуда колебаний, максимальная величина скорости колебания и действующие на корпус струга силы. Наличие внешних сил (силы трения, натяжения каната и сопротивления движению со стороны массива угля) будет накладывать дополнительные изменения на движение, но не изменит влияния выбранного возбуждающего устройства на это движение.

Рассмотрим движение струга при симметричном возбуждении, которое осуществляется с помощью двух неуравновешенных грузов (рис. 1). Одинаковые массы M_1 и M_2 вращаются в противоположных направлениях с постоянной угловой скоростью ω. Вследствие такого движения

неуравновешенных масс корпус струга, масса которого M, приходит в колебательное движение.

По характеру работы струг обладает одной степенью свободы. В направлении движения на корпус струга будет действовать возбуждающая сила неуравновешенных грузов, максимальная величина которой

$$P_0 = P_1 + P_2 = M_1 r\omega^2 + M_2 r\omega^2 = 2M_1 r\omega^2, \qquad (1)$$

где r — расстояние центра тяжести неуравновешенной массы от оси вращения.

Вследствие участия неуравновешенных масс в переносном движении корпуса появится реакция

$$2Q = -M_1\ddot{x}_c - M_2\ddot{x}_c = -2M_1\ddot{x}_c,$$

где $\ddot{x}_c$ — ускорение центра тяжести корпуса, равное ускорению любой точки корпуса.

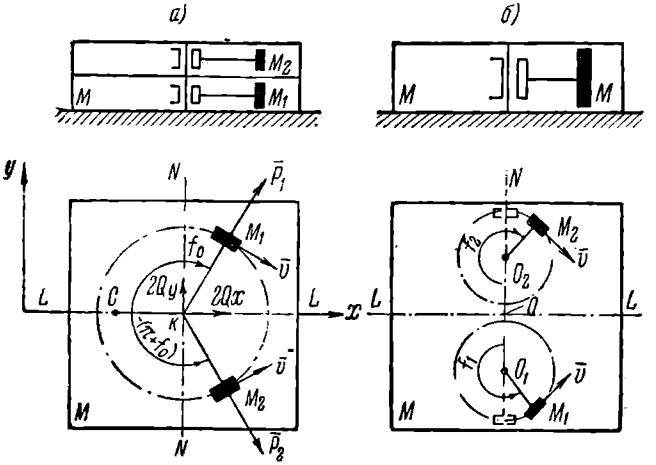


Рис. 1. Схемы симметричного возбуждающего устройства:

а — соосное вращение неуравновешенных масс; *б* — вращение неуравновешенных масс в одной плоскости

Дифференциальное уравнение движения корпуса струга

$$M\ddot{x}_c = 2M_1 r\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) - 2M_1\ddot{x}_c$$

или

$$x_c = \frac{2M_1}{2M_1 + M} r\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Дважды интегрируя это уравнение при начальных условиях

$$t = 0; \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{2}; \quad x_{c_0} = 0; \quad x_{c_0} = -\frac{2M_1}{2M_1 + M} r,$$

получим

$$\left.\begin{aligned} \ddot{x}_c &= \frac{2M_1}{2M_1+M} r\omega^2 \cos \omega t \\ x_c &= \frac{2M_1}{2M_1+M} r\omega \sin \omega t \\ x_c &= -\frac{2M_1}{2M_1M} r \cos \omega t \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Уравнения (2) характеризуют движение струга при свободных колебаниях без наложения дополнительного равномерного движения.

Введем обозначение массы

$$m = \frac{M}{2M_1}.$$

Тогда по уравнению (2) параметры свободных колебаний

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = n; \qquad (3)$$

$$A_0 = \frac{2M_1}{2M_1+M} r = \frac{1}{1+m} r; \qquad (4)$$

$$v_0 = \frac{2M_1}{2M_1+M} r\omega = \frac{1}{1+m} r\omega = A_0\omega; \qquad (5)$$

$$R_0 = \frac{2M_1M}{2M_1+M} r\omega^2 = \frac{M}{2M_1+M} P_0 = \frac{1}{1+\frac{1}{m}} P_0, \qquad (6)$$

где n — число оборотов неуравновешенных грузов в 1 сек.;
ν, A_0, v_0, R_0 — соответственно, частота и амплитуда колебаний, скорость и действующая на корпус струга сила.

Таким образом, частота свободных колебаний струга соответствует числу оборотов грузов в 1 сек. Амплитуда колебания не зависит от угловой скорости вращения неуравновешенных масс. Величина соотношения масс m определяет уменьшение параметров движения, вследствие переносного движения неуравновешенных грузов. Скорость колебания струга, в конечном счете, зависит от выбранной амплитуды колебания и угловой скорости вращения.

2. Влияние натяжения каната на работу струга

Вследствие неподвижности объекта разрушения необходима подача колеблющегося корпуса на забой. Для этого с успехом может быть использован тяговый канат. Отметим, что назначение каната в статическом и вибрационном стругах существенно различно.

В статическом струге тяговый канат должен обеспечивать усилия, достаточные для разрушения угольного массива, т. е. при работе струга ему принадлежит активная роль. Натяжение каната будет изменяться в зависимости от изменения сопротивления угля разрушению. Скорость же наматывания каната на барабан должна быть примерно постоянной, так как это обеспечит снижение тягового усилия в легко разрушаемых местах и увеличение его при разрушении крепких мест.

При работе вибрационного струга тяговый канат должен обеспечивать наиболее эффективное использование вибрации корпуса для разру-

шения угля, т. е. в этом случае ему принадлежит вспомогательная роль. Соответственно и скорость наматывания каната на барабан должна отвечать условию эффективного использования вибраций корпуса.

Для выяснения влияния натяжения каната на работу струга рассмотрим воздействие его, пренебрегая трением, на неупругий неразрушаемый массив. Это позволит лучше уяснить роль натяжения каната. При проверке эффективности струга в стендовых условиях приближенная схема такой работы может быть получена, если заменить трение скольжения трением качения.

Пренебрегая изменением натяжения каната от колебания струга, дифференциальное уравнение движения с момента отхода струга от забоя (рис. 2),

$$M\ddot{x}_c = P_0 \sin(\omega t + \varphi_0) - N - 2M_1\ddot{x}_c$$

или

$$\ddot{x}_c = \frac{1}{2M_1 + M}\,[P_0 \sin(\omega t + \varphi_0) - N].$$

Обозначим

$$b = \frac{N}{P_0} \tag{7}$$

$$\gamma = \omega t. \tag{8}$$

Принимая во внимание равенство (1), получим

$$\ddot{x}_c = \frac{2M_1}{2M_1 + M}\, r\omega^2\,[\sin(\gamma + \varphi_0) - b]. \tag{9}$$

Начальная фаза колебания φ_0 определяется из условия начала отхода струга от забоя. Отход струга от забоя начнется, когда возбуждающая сила[1], изменяясь от нуля ($\varphi = 0$, рис. 2), достигнет величины силы натяжения каната N ($\varphi = \varphi_0$), т. е. когда действующая на корпус струга сила Q будет равна нулю

$$t = 0; \quad Q = M\ddot{x}_c = 0.$$

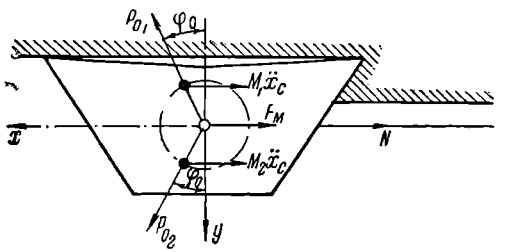


Рис. 2. Схема действующих на корпус струга сил в момент отхода от забоя

Тогда по уравнению (9)

$$\sin\varphi_0 = b; \tag{10}$$

$$\cos\varphi_0 = \sqrt{1 - b^2}, \tag{10'}$$

а уравнение (9) примет вид

$$\ddot{x}_c = \frac{2M_1}{2M_1 + M}\, r\omega^2\,(\sqrt{1 - b^2}\sin\gamma + b\cos\gamma - b).$$

---

[1] Возбуждающая сила представляет собой сумму проекций сил на ось x, возникающих при движении неуравновешенных масс M_1 и M_2.

Если в начальный момент движения $t=0$; $x_{c_0}=0$; $\dot{x}_{c_0}=0$, то дважды интегрируя последнее уравнение и принимая во внимание зависимости (4), (5) и (6), получим

$$\left.\begin{aligned} Q &= R_0(\sqrt{1-b^2}\sin\gamma + b\cos\gamma - b) \\ \dot{x} &= v_0(\sqrt{1-b^2} - \sqrt{1-b^2}\cos\gamma + b\sin\gamma - b\gamma) \\ x_c &= A_0(b - \sqrt{1-b^2}\sin\gamma - b\cos\gamma + \sqrt{1-b^2}\gamma - 0{,}5b\gamma^2) \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

Уравнения (11) характеризуют движение струга с начала его отхода от забоя до момента нанесения удара по забою.

Предельный случай устойчивой работы струга будет при натяжении каната $N_{\min}$ [5], когда в момент удара действующая на корпус сила обращается в нуль. При этом фаза колебания изменяется на 2π

$$\gamma' = 2\pi; \quad x_c = 0.$$

Из уравнения движения в выражениях (11) находим

$$b = \frac{1}{\sqrt{1+\pi^2}} = 0{,}3033 \approx 0{,}3$$

или

$$N_{\min} = 0{,}3P_0. \quad (12)$$

Скорость удара при минимальном натяжении каната

$$v_{\min} = 2\pi b v_0 = 1{,}9v_0. \quad (13)$$

После удара движение струга повторится при тех же начальных условиях.

Если натяжение каната меньше $N_{\min}$, то фаза колебания в момент удара превысит 2π и действующая на корпус струга сила, при последующем отходе, будет изменяться не от нуля. Работа струга в этом случае носит неустойчивый характер, который выражается в наличии переменной скорости ударов или холостых колебаний и уменьшении частоты ударов [5]. В этом отношении полученная Б. Н. Любимовым [4] прямолинейная зависимость скорости удара от величины натяжения каната ($N < N_{\min}$) представляет частный случай, который практически маловероятен.

При увеличении натяжения каната от $N_{\min}$ после каждого удара в движении струга будет наступать пауза, так как фаза колебания при ударе остается меньше 2π, а действующая на корпус струга сила не успевает обратиться в нуль и будет направлена на забой. После паузы движение повторяется при тех же начальных условиях.

Если натяжение каната достигнет величины

$$N = P_0,$$

то ударный режим работы струга становится невозможным, так как становится невозможным отход струга от забоя.

Выясним как будет изменяться скорость удара при изменении натяжения каната от $N_{\min}$ до значения, равного P_0.

Из уравнения движения для момента удара получим

$$b - \sqrt{1-b^2}\sin\gamma' - b\cos\gamma' + \sqrt{1-b^2}\gamma' - 0{,}5b\gamma'^2 = 0. \qquad (14)$$

Определяя отсюда γ', из уравнения скорости находим величину скорости удара при различном натяжении каната (табл. 1).

Таблица 1

$b = \frac{N}{P_0}$	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\frac{\gamma'}{\pi}$	2	1,85	1,72	1,59	1,49	1,27	1,07	0,84	0,58
$\frac{v_{уд}}{v_0}$	1,9	2,09	2,13	2,05	1,97	1,53	1,08	0,6	0,23

По данным табл. 1 построен график изменения скорости удара при различном натяжении каната [1] (рис. 3, кривая $k = \infty$). Как видно из рис. 3, при увеличении натяжения каната от минимального скорость ударов увеличивается и достигает максимума 0,4 P_0

$$\left.\begin{aligned} N_0 &= 0{,}4P_0 \\ v_{max} &= 2{,}13v_0. \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

При дальнейшем увеличении натяжения каната скорость ударов уменьшается. Натяжение каната N_0, при котором имеет место наибольшая скорость ударов, назовем оптимальным натяжением.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Величина натяжения каната имеет важное значение для работы вибрационного струга. От выбора натяжения каната во многом зависит эффективность работы струга.

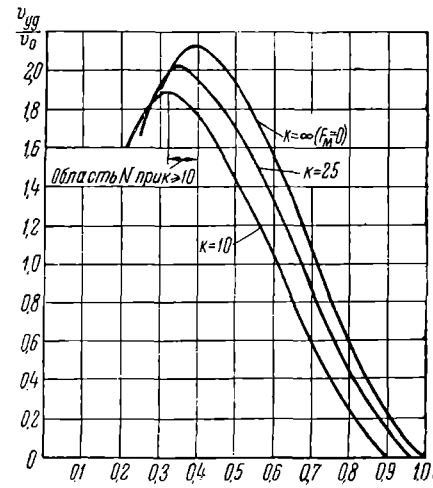


Рис. 3. Зависимость изменения скорости удара при наличии трения от величины натяжения каната

2. Наличие каната в значительной степени повышает эксплуатационные возможности струга, которые определяются параметрами свободных колебаний. Это обусловлено тем, что при правильно выбранном натяжении каната полезно используемый запас кинетической энергии может быть увеличен в несколько раз по сравнению с максимальной величиной кинетической энергии при свободных колебаниях. Так, при оптимальном натяжении каната энергия ударов может в 4,5 раза превысить максимальную величину энергии свободных колебаний.

3. Для работы вибрационного струга необходимо относительно постоянное натяжение каната. Колебание натяжения каната возможно

[1] Подобная зависимость впервые установлена графическим методом Б. И. Любимовым [4] и приведена здесь для сравнения с аналогичными зависимостями при наличии трения.

в определенных пределах, обеспечивающих достаточно высокую энергию удара. Так, при колебании натяжения каната от 0,3 P_0 до 0,51 P_0 (рис. 3) скорость ударов остается не меньше 1,9 v_0, а энергия ударов увеличивается не менее чем в 2,6 раза. Наиболее рациональный режим работы струга будет при натяжении каната, близком к оптимальному. Соответственно, скорость наматывания каната на барабан должна удовлетворять условию обеспечения примерно постоянного тягового усилия.

4. Натяжение каната не должно быть меньше минимального, иначе работа струга будет неустойчивой, а эффективность воздействия снизится за счет уменьшения скорости и частоты ударов.

3. Влияние силы трения на работу струга. Выбор натяжения каната

Вследствие трения естественно снизится эффективность ударов струга по забою за счет уменьшения скорости ударов. Необходимо выяснить, в какой мере трение влияет на работу струга и при каком натяжении каната работа его будет оптимальной.

Схема действующих на корпус струга сил в момент начала движения показана на рис. 2. Пренебрегая изменением натяжения каната, вызванного колебанием корпуса, дифференциальное уравнение движения можно записать

$$M\ddot{x}_c = P_0 \sin(\gamma + \varphi_0) - N - F_{\max} - 2M_1\ddot{x}_c$$

или

$$M\ddot{x}_c = R_0\left[\sin(\gamma - \varphi_0) - \frac{N}{P_0} - \frac{F_{\max}}{P_0}\right], \tag{16}$$

где R_0 — определяется равенством (6);

$F_{\max}$ — максимальная величина силы трения, действующей на струг

$$F_{\max} = (2M_1 + M)fg, \tag{17}$$

где f — коэффициент трения[1].

Обозначим

$$\frac{P_0}{F_{\max}} = k; \quad \frac{F_{\max}}{P_0} = \frac{1}{k} = k', \tag{18}$$

тогда, принимая во внимание обозначение (7), уравнение (16) примет вид

$$\ddot{x}_c = \frac{R_0}{M}\left[\sin(\gamma + \varphi_0) - (b + k')\right].$$

Начальные условия движения

$$t = 0; \quad x_{c_0} = 0; \quad \dot{x}_{c_0} = 0; \quad Q_0 = M\ddot{x}_{c_0} = 0,$$

а начальная фаза

$$\sin\varphi_0 = (b + k'); \tag{19}$$

$$\cos\varphi_0 = \sqrt{1 - (b + k')^2}. \tag{20}$$

[1] Боковыми силами трения пренебрегаем.

При подстановке значения начальной фазы дифференциальное уравнение движения запишется

$$\ddot{x}_c = \frac{R_0}{M}\left[\sqrt{1-(b+k')^2}\sin\gamma + (b+k')\cos\gamma - (b+k)'\right].$$

Дважды интегрируя его, получим

$$\left.\begin{aligned} Q &= R_0\left[\sqrt{1-(b+k')^2}\sin\gamma + (b+k')\cos\gamma - (b+k'\right);\\ \dot{x}_c &= v_0\left[\sqrt{1-(b+k')^2} - \sqrt{1-(b+k')^2}\cos\gamma + \right.\\ &\qquad \left. + (b+k')\sin\gamma - (b+k')\gamma\right];\\ x_c &= A_0\left[(b+k') - \sqrt{1-(b+k')^2}\sin\gamma - (b+k')\cos\gamma + \right.\\ &\qquad \left. + \sqrt{1-(b+k')^2}\gamma - 0{,}5\,(b+k')\gamma^2\right]. \end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

Уравнения (21) характеризуют движение струга при отходе от забоя. Величина фазы колебания γ'' при максимальном отклонении от забоя определяется из условия остановки струга ($x_c = 0$)

$$\sqrt{1-(b+k')^2}\,(1-\cos\gamma'') - (b+k')\,(\gamma'' - \sin\gamma'') = 0. \qquad (22)$$

Максимальное отклонение струга от забоя

$$l = A_0\left[(b+k')\,(1-\cos\gamma'') - 0{,}5\gamma''^2\right) + \sqrt{1-(b+k')^2}\,(\gamma'' - \sin\gamma'')]. \qquad (23)$$

При обратном движении струга на забой сила трения изменит направление, а дифференциальное уравнение примет вид

$$\ddot{x}_c = \frac{R_0}{M}\left[\sin(\gamma+\varphi_0) - (b-k')\right],$$

где γ изменяется от значения γ''

Дважды интегрируя это уравнение в соответствующих пределах, получим

$$\left.\begin{aligned} Q &= R_0\left[\sin(\gamma+\varphi_0) - (b-k')\right];\\ x_c &= v_0\left[\cos(\gamma''+\varphi_0) + (b-k')\,\gamma'' - \cos(\gamma+\varphi_0) - (b-k')\,\gamma\right];\\ x_c &= l + A_0\left\{\sin(\gamma''+\varphi_0) - \gamma''\cos(\gamma''+\varphi_0) - 0{,}5\,(b-k')\,\gamma''^2 - \right.\\ &\quad \left. - \sin(\gamma+\varphi_0) + \left[\cos(\gamma''+\varphi_0) + (b-k')\,\gamma''\right]\gamma - 0{,}5\,(b-k')\,\gamma^2\right\}. \end{aligned}\right\} \qquad (24)$$

Уравнения (24) характеризуют движение струга на забой после максимального отклонения. Так как после удара движение начинается при начальных условиях первого отхода, то уравнений (21) и (24) вполне достаточно для изучения воздействия струга на массив.

Минимальное натяжение каната найдем из условия нанесения удара при максимуме скорости движения, т. е. из условия обращения в нуль действующей на корпус струга силы в момент удара.

Тогда величина фазы колебания γ' в момент начала удара определится выражением действующей на корпус струга силы в уравнениях (24)

$$\sin(\gamma'+\varphi_0) = (b-k') \qquad (25)$$

или

$$\gamma' = \arcsin(b - k') - \varphi_0.$$

Выражая $\arcsin(b - k')$ через главное значение круговой функции и подставляя значение φ_0 из равенства (19), получим

$$\gamma'' = 2\pi + \arcsin(b - k') - \arcsin(b + k'). \qquad (25')$$

Так как к моменту начала удара

$$\gamma = \gamma'; \quad x_c = 0,$$

то по уравнению движения

$$l + A_0\{\sin(\gamma'' + \varphi_0) - \gamma'' \cos(\gamma'' + \varphi_0) - 0{,}5(b - k')\gamma''^2 - \sin(\gamma' + \varphi_0) + \\ + [\cos(\gamma'' + \varphi_0) + (b - k')\gamma'']\gamma' - 0{,}5(b - k')\gamma'^2\} = 0. \qquad (26)$$

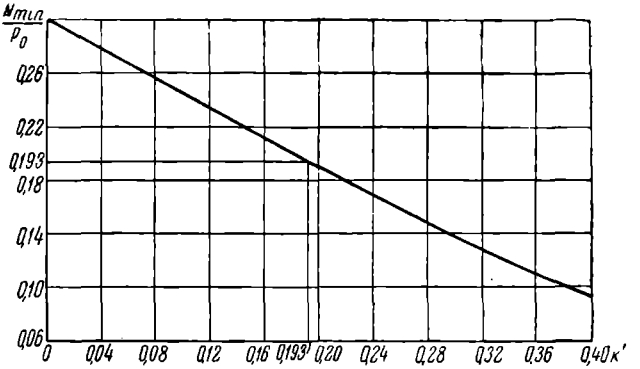


Рис. 4. Изменение величины минимального натяжения каната при наличии трения

Подставляя в это выражение значение l, $\sin(\gamma' + \varphi_0)$, $\sin\varphi_0$ и $\cos\varphi_0$, из равенств (23), (25), (19), (20) после преобразований получим

$$(\gamma'' - \gamma'' \cos\gamma'' + \gamma' \cos\gamma'')\sqrt{1 - (b + k')^2} + b(\gamma'' \sin\gamma'' - \gamma' \sin\gamma'' + \\ + \gamma''\gamma' - 0{,}5\gamma' - \gamma''^2) + k'(2 + \gamma'' \sin\gamma'' - \gamma' \sin\gamma'' - \gamma''\gamma' + 0{,}5\gamma'^2) = 0, \qquad (27)$$

где γ'' определяется уравнением (22), γ' — равенством (25').

Решая уравнение (27) для различных значений k', определим величину минимального натяжения каната при наличии трения. Уравнение (27) решено методом подбора. Для этого предварительно определены фазы колебания γ'' и γ' из соответствующих выражений. Результаты решения сведены в табл. 2, по данным которой построен график рис. 4.

Анализируя полученное, можно сделать следующие выводы.

1. Необходимое минимальное натяжение каната при наличии трения получается меньше 0,3 P_0, т. е. меньше $N_{\min}$, определяемого без учета трения. Чем больше становится соотношение сил $F_{\max}$ и P_0, тем меньше минимальное натяжение каната.

Таблица 2

$k' = \frac{F_{max}}{P_0}$	$\frac{\gamma''}{\pi}$		$b = \frac{N_{min}}{P_0}$	$\frac{v_{уд}}{v_0}$	$\frac{l}{A_0}$
0,04	1,285	1,973	0,2795	1,8315	2,4808
0,06	1,274	1,960	0,2678	1,7944	2,4136
0,08	1,263	1,947	0,2563	1,7533	2,3461
0,10	1,251	1,934	0,2447	1,7164	2,2808
0,12	1,240	1,921	0,2335	1,6770	2,2133
0,14	1,228	1,908	0,2221	1,6385	2,1488
0,16	1,217	1,895	0,2111	1,5947	2,0823
0,18	1,205	1,882	0,2002	1,5552	2,0167
0,20	1,192	1,869	0,1894	1,5136	1,9514
0,22	1,180	1,856	0,1786	1,4730	1,8871
0,24	1,168	1,844	0,1685	1,4114	1,8122
0,26	1,155	1,830	0,1583	1,3530	1,7399
0,28	1,142	1,817	0,1485	1,2454	1,6588
0,30	1,128	1,804	0,1390	1,1356	1,6112
0,32	1,114	1,790	0,1295	1,0215	1,5571
0,34	1,100	1,777	0,1205	1,9039	1,4907
0,36	1,085	1,764	0,1118	1,7773	1,4240
0,38	1,069	1,750	0,1035	1,6450	1,3571
0,40	1,054	1,736	0,0960	1,5081	1,2875

2. При увеличении соотношения сил F_{max} и P_0 от нуля до 0,2 ($k \geqslant 5$) минимальное натяжение каната изменяется практически по прямой и может быть определено по формуле

$$N_{min} = (0{,}3 - 0{,}55k')P_0. \tag{28}$$

3. Минимальное натяжение каната больше величины силы трения пока соотношение сил F_{max} и P_0 остается меньше 0,193.

Скорость ударов при минимальном натяжении каната определяется по выражению скорости в уравнениях (24). После преобразований

$$v_{уд} = v_0 [\sqrt{1 - (b + k')^2}(\cos\gamma'' - \cos\gamma') - (b + k')(\sin\gamma'' - \sin\gamma') - (b - k')(\gamma' - \gamma'')]. \tag{29}$$

Если по данным табл. 2, где приведены результаты подсчета скорости ударов, построить график изменения скорости ударов при минимальном натяжении каната, то можно убедиться, что при изменении k' от 0 до 0,2 ($k \geqslant 5$) скорость также изменяется по закону прямой и может быть подсчитана по формуле

$$v_{min} = (1{,}9 - 1{,}85k')\, v_0. \tag{30}$$

Анализируя эту зависимость, можно видеть, что при соотношении сил

$$k = \frac{P_0}{F_{max}} > 10; \quad k' < 0{,}1,$$

скорость ударов при минимальном натяжении каната лежит в пределах

$$1{,}9v_0 > v_{min} > 1{,}7v_0,$$

т. е. остается достаточно большой. Соотношение сил P_0 и F_{max} больше 10 практически вполне осуществимо и для эффективной работы необходимо. В этом случае энергия ударов, даже при минимальном натяжении каната, увеличится больше чем в 2,9 раза по сравнению с максимальной энергией свободных колебаний.

Величины отклонения струга от забоя определим из выражения (23). Результаты подсчета максимального отклонения струга от забоя также приведены в табл. 2. Аналогично устанавливаем, что отклонение струга от забоя может быть определено по формуле

$$l = (2{,}6 - 3{,}2k')\,A_0. \tag{31}$$

Мощность, затрачиваемая на преодоление трения, зависит от величины отклонения струга от забоя и будет наибольшей при минимальном натяжении каната, так как в этом случае отклонение струга будет наибольшим.

Средняя скорость движения струга за период колебания возбуждающей силы

$$x_{c\,ср} = \frac{l\omega}{\pi}.$$

Тогда мощность, затрачиваемая на преодоление трения,

$$N_{f\,ср} = \frac{fgMl\omega}{102\,\pi}\ квт \tag{32}$$

или

$$N_{f\,ср} = \frac{fgM\omega\,(2{,}6 - 3{,}2k')\,A_0}{102\pi}\ квт. \tag{33}$$

Рассматривая зависимости (1), (4), (17) и (18), устанавливаем, что

$$k = \frac{1}{k'} = \frac{P_0}{F_{max}} = \frac{2M_1 r\omega^2}{(2M_1 + M)fg} = \frac{\omega^2}{fg}A_0,$$

откуда

$$A_0 = \frac{fgk}{\omega^2}. \tag{34}$$

Подставляя это значение A_0 в выражение (33), получим

$$N_{f\,ср} = \frac{f^2g^2M\,(2{,}6k - 3{,}2)}{102\pi\omega}\ квт. \tag{35}$$

Примечание. Если проанализировать уравнение (16), можно установить, что на струг при движении действует сила трения

$$F_{max} = fg\,(2M_1 + M),$$

которую приближенно можно заменить силой

$$F = fgM.$$

Чтобы установить влияние величины натяжения каната на работу струга, воспользуемся уравнениями (22), (26) и (29). Перепишем их,

одновременно преобразовав уравнение (26) (подставим значение l, $\sin\varphi_0$ и $\cos\varphi_0$ и упростим формулу)

$$\sqrt{1-(b+k')^2}\,(1-\cos\gamma'')-(b+k')\,(\gamma''-\sin\gamma'')=0;$$

$$\gamma''\left[-\sqrt{1-(b+k')^2}\cos\gamma''+b\sin\gamma''+k'\sin\gamma''-b\gamma''+\right.$$
$$\left.+\sqrt{1-(b+k')^2}+(b+k')\right]+\gamma'\left[\sqrt{1-(b+k')^2}\cos\gamma''-b\sin\gamma''-\right.$$
$$\left.-k'\sin\gamma''+b\gamma''-k'\gamma''\right]-\sqrt{1-(b+k')^2}\sin\gamma'-(b+k')\cos\gamma'-$$
$$-0{,}5\,(b-k')\,\gamma'^2=0;$$

$$v_{уд}=v_0\left[\sqrt{1-(b+k')^2}\,(\cos\gamma''-\cos\gamma')-(b+k')\,(\sin\gamma''\right.$$
$$\left.-\sin\gamma')-(b-k')\,(\gamma'-\gamma'')\right].$$

Решением этих трех уравнений находим зависимость скорости ударов от величины натяжения каната. Установим такую зависимость для двух значений k

$$k_1=\frac{P_0}{F_{max}}=10;\quad k_1'=0{,}1;$$

$$k_2=\frac{P_0}{F_{max}}=25;\quad k_2'=0{,}04.$$

Подставляя значение k', из уравнения (22) определяем γ'' для различных значений b, а из преобразованного уравнения (26) — γ' Зная γ'' и γ', величину скорости ударов при изменении натяжения получим из зависимости (29). Решение произведено методом подбора. Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

$b=\frac{N}{P_0}$	$\frac{\gamma''}{\pi}$	$\frac{\gamma'}{\pi}$	$\frac{v_{уд}}{v_0}$	$\frac{\gamma''}{\pi}$	$\frac{\gamma'}{\pi}$	$\frac{v_{уд}}{v_0}$
	$k'=0{,}04\ (k=25)$			$k'=0.1\ (k=10)$		
0,2247	—	—	—	1,251	1,934	1,7164
0,28	1,285	1,973	1,8315	1,206	1,822	1,8445
0,3	1,258	1,906	1,9281	1,178	1,764	1,8794
0.32	1,231	1,844	1,9885	1,152	1,710	1,8876
0,35	1,191	1,758	2,0296	1,114	1,635	1,8662
0,4	1,128	1,611	1,9390	1,048	1,518	1,7724
0.5	0,994	1,408	1,7278	0.9170	1,302	1,4329
0.6	0,861	1,200	1.3177	0,788	1,096	1,0241
0,7	0,717	0,989	0,8647	0.625	0,974	0.5762
0,2	0,556	0,761	0,4424	0,433	0,668	0,2551

По данным таблицы построены графики изменения скорости удара при наличии трения в зависимости от величины натяжения каната (рис. 3).

Анализируя полученное, можно сделать следующие выводы.

1. Трение не влияет на характер изменения скорости ударов от величины натяжения каната (рис. 3, кривая $k=\infty$).

2. При любом соотношении сил P_0 и F_{max} имеет место оптимальное натяжение каната N_0, при котором скорость ударов наибольшая.

Так, при k, равном 25,

$$N_0 = 0{,}35P_0,$$

$$v_{max} = 2{,}03v_0.$$

При k, равном 10,

$$N_0 = 0{,}32P_0,$$

$$v_{уд} = 1{,}89v_0.$$

При соотношении сил P_0 и F_{max}, большем 10, скорость ударов при оптимальном натяжении каната лежит в пределах

$$2{,}13v_0 > v_{max} > 1{,}89v_0.$$

Таким образом, если k больше 10, то при наличии трения может быть обеспечено увеличение энергии ударов больше чем в 3,57 раза, по сравнению с максимальной энергией свободных колебаний.

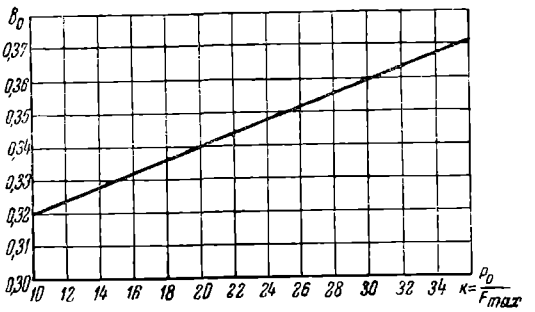


Рис. 5. Изменение величины оптимального натяжения каната при наличии трения

3. Наличие трения приводит не к увеличению, а к уменьшению необходимого натяжения каната. Выбираемое натяжение каната должно быть тем меньше, чем меньше соотношение P_0 и F_{max}.

4. Если натяжение каната достигает величины

$$N = P_0 - F_{max},$$

то отход струга от забоя становится невозможным, т. е. становится невозможным ударный режим работы.

Для выбора натяжения каната необходимо знать величину оптимального натяжения при различных соотношениях сил P_0 и F_{max}. Оптимальное натяжение каната можно определить по кривым изменения скорости ударов для различных значений k' (аналогичным кривым рис. 3), построенным на основании решения уравнений (22), (26), (29).

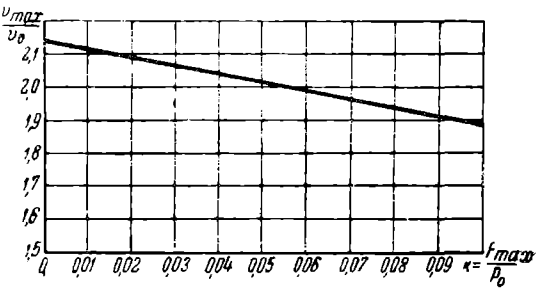


Рис. 6. Величина максимальной скорости ударов при наличии трения

Определение оптимального натяжения каната произведено нами для $k \geqslant 10$; $k' \leqslant 0{,}1$. По результатам подсчетов построен график изменения оптимального натяжения каната (рис. 5) и график максимальной скорости, которая имеет место при оптимальном натяжении каната (рис. 6).

Как свидетельствует анализ полученных графиков, оптимальное натяжение каната находится в прямо пропорциональной зависимости от величины k и может быть подсчитано по формуле

$$N_0 = (0{,}3 + 0{,}002k)\,P_0 \text{ при } k \geqslant 10. \quad (36)$$

Максимальная скорость ударов, наоборот, находится в прямо пропорциональной зависимости от величины k' и может быть подсчитана по формуле

$$v_{max} = (2{,}13 - 2{,}4k')\, v_0 \text{ при } k' \leqslant 0{,}1. \tag{37}$$

Мощность, расходуемая на удары струга по забою, зависит от величины скорости ударов. Так как частота ударов во всех случаях остается неизменной, то наибольшая средняя мощность затрачивается при оптимальном натяжении каната, когда скорость ударов наибольшая.

Средняя мощность, затрачиваемая на удары,

$$N_{ср} = \frac{T\omega}{2\pi 102} \text{ квт}, \tag{38}$$

где энергия удара

$$T = \frac{Mv_{max}^2}{2} = \frac{Mv_0^2}{2}(2{,}13 - 2{,}4k')^2.$$

Принимая во внимание равенства (5) и (34), найдем

$$v_0 = A_0\omega = \frac{fgk}{\omega},$$

тогда

$$N_{ср} = \frac{f\, 0{,}08 f^2 g^2 M (2{,}13k - 2{,}4)^2}{102\omega} \tag{39}$$

Выбираемое натяжение каната необходимо принимать примерно равным оптимальному, соответствующему данному значению k. Нижний предел колебания натяжения каната можно принять равным N_{min}, которое определяется зависимостью (28). Верхний предел колебания следует выбирать из условия допустимой наименьшей скорости ударов и можно определять по графикам рис. 3. Колебание натяжения каната от N_{min} до N_{max} предопределяет практическую возможность получения требуемой характеристики тяговой лебедки.

При работе струга величина силы трения не остается постоянной, что необходимо учитывать при выборе натяжения каната. Для этого нужно задавать нижний предел колебания k. Тогда выбираемое натяжение каната будет находиться между N_{0_1} для заданного и N_{0_2} для минимального значения k. Так, если задано k, равное 25, а нижний предел колебания k равен 15, то, согласно формуле (35), выбираемое натяжение каната должно лежать в пределах

$$0{,}33P_0 \leqslant N \leqslant 0{,}35P_0.$$

Предлагаемый выбор натяжения каната представляет решение этого вопроса в первом приближении, так как относится к воздействию струга на неупругий неразрушаемый массив. Приближенная картина такой работы может быть осуществлена в стендовых условиях. При работе в естественных условиях необходимо дополнительное корректирование и уточнение полученных данных, которые могут быть установлены в результате экспериментального исследования опытного образца вибрационного струга.

4. Числовой пример

При правильно выбранном натяжении каната, как установлено выше, обеспечивается значительно большее повышение скорости ударов, чем при максимальной скорости свободных колебаний. Следовательно, эффективность работы струга при этом будет зависеть от параметров свободных колебаний, которые обеспечивают выбранное возбуждающее устройство. Если возбуждающее устройство сможет обеспечить достаточно высокую максимальную скорость свободных колебаний, то энергия ударов будет значительной, а работа струга эффективной.

Параметры свободных колебаний. Исходя из данных струга ВХ-1, примем массу корпуса

$$M = 300 \ кг \cdot сек^2/м.$$

Зададимся угловой скоростью вращения неуравновешенных масс и амплитудой свободных колебаний

$$\omega = 152 \frac{1}{сек.} \ (n = 1450 \ об/мин);$$

$$A_0 = 3{,}5 \ мм.$$

Если принять соотношение масс

$$m = \frac{M}{2M_1} = 60,$$

т. е. $2M_1 = 5 \ кг \cdot сек^2/м$,
то, согласно формуле (4),

$$r = A_0 (1 + m) = 213{,}5 \ мм,$$

а возбуждающая сила

$$P_0 = 2M_1 r\omega^2 = 24\,664 \ кг.$$

Сила, действующая на корпус струга,

$$R_0 = \frac{2M_1 M}{2M_1 + M} r\omega^2 = A_0 M\omega^2 = 24\,259 \ кг.$$

Уменьшение возбуждающей силы, вследствие переносного движения корпуса,

$$\Delta P = P_0 - R_0 = 405 \ кг.$$

Согласно формуле (5),

$$v_0 = A_0\omega = 0{,}53 \ м/сек,$$

а максимальная величина кинетической энергии при свободных колебаниях

$$T = \frac{Mv_0^2}{2} = 42 \ кгм.$$

Работа струга без учета трения. Минимальное необходимое натяжение каната

$$N_{min} = 0{,}3P_0 = 7399 \ кг.$$

Оптимальное натяжение каната

$$N_0 = 0{,}4P_0 = 9866 \text{ кг}.$$

Максимально допустимое натяжение каната примем таким, чтобы обеспечивалась скорость ударов, равная $v_{\min}$. В соответствии с графиком рис. 3 ($k = \infty$),

$$N_{\max} = 0{,}51P_0 = 12\,579 \text{ кг}.$$

Возможные пределы колебания натяжения каната

$$N = (7167 \div 12\,579) \text{ кг}.$$

Минимальная скорость ударов

$$v_{\min} = 1{,}9v_0 = 1{,}01 \text{ м/сек}.$$

Максимальная скорость ударов

$$v_{\max} = 2{,}13v_0 = 1{,}13 \text{ м/сек}.$$

Минимальная энергия ударов

$$T_{\min} = \frac{Mv_{\min}^2}{2} 153 \text{ кгм}.$$

Максимальная энергия ударов

$$T_{\max} = \frac{Mv_{\max}^2}{2} = 192 \text{ кгм}.$$

Согласно формуле (38), мощность, затрачиваемая на удары по забою, при минимальном натяжении каната

$$N_{\min} = \frac{T_{\min}\omega}{2\pi\, 102} = 36{,}3 \text{ квт},$$

при максимальном

$$N_{\max} = 45{,}56 \text{ квт}.$$

Работа струга при наличии трения. Если принять коэффициент трения $f = 0{,}3$, то максимальная величина силы трения

$$F_{\max} = fg\,(2M_1 + M) = 898 \text{ кг}.$$

Сила трения, действующая на корпус,

$$F = fgM = 883 \text{ кг}.$$

Соотношение сил

$$k = \frac{P_0}{F_{\max}} = \frac{R_0}{F} = 27; \quad k' = \frac{1}{k} = 0{,}037.$$

Согласно формуле (28),

$$N_{\min} = (0{,}3 - 0{,}55k')\,P_0 = 0{,}28P_0 = 6906 \text{ кг}.$$

Наибольшее отклонение струга рассчитывается по формуле (31)

$$l_{max} = (2{,}6 - 3{,}2k')\, A_0 = 2{,}48A_0 = 8{,}7 \ мм.$$

Наибольшая мощность, затрачиваемая на преодоление трения [по формуле (32)],

$$N_{f_{ср}} = \frac{fgMl_{max}\omega}{102\pi} = 3{,}64 \ квт.$$

Скорость ударов при минимальном натяжении каната [по формуле (30)]

$$v_{min} = (1{,}9 - 1{,}85k')\, v_0 = 1{,}83v_0 = 0{,}97 \ м/сек.$$

Энергия ударов при минимальном натяжении каната

$$T_{min} = \frac{Mv^2_{min}}{2} = 141 \ кгм.$$

Согласно формуле (36), оптимальное натяжение каната

$$N_0 = (0{,}3 \div 0{,}002k)\, P_0 = 0{,}354P_0 = 8731 \ кг.$$

Максимальная скорость ударов по формуле (37)

$$v_{max} = (2{,}13 - 2{,}4k')\, v_0 = 2{,}0412v_0 = 1{,}08 \ м/сек.$$

Тогда максимальная энергия ударов при наличии трения

$$T_{max} = \frac{Mv^2_{max}}{2} = 175 \ кгм.$$

Мощность, затрачиваемая на удары по забою, при минимальном натяжении каната

$$N_{min} = \frac{T_{min}\,\omega}{2\pi\,102} = 33{,}4 \ квт,$$

при максимальном

$$N_{max} = 41{,}5 \ квт.$$

Учитывая изменение силы трения при работе струга, зададимся коэффициентом k, который изменяется в пределах

$$k = (28 \div 16)$$

или

$$k' = (0{,}037 \div 0{,}0625).$$

Это соответствует изменению коэффициента трения

$$f = (0{,}3 \div 0{,}51)$$

и силы трения

$$F = (883 \div 1500) \ кг.$$

При значении k, равном 16

$$N_0 = (0{,}3 + 0{,}002k)\, P_0 = 0{,}332P_0 = 8188 \text{ кг};$$

$$v_{max} = (2{,}13 - 2{,}4k')\, v_0 = 1{,}98v_0 = 1{,}05 \text{ м/сек};$$

$$T_{max} = \frac{Mv_{max}^2}{2} = 165 \text{ кгм}.$$

Выбираемое натяжение каната должно лежать в пределах

$$N = (8188 \div 8731) \text{ кг},$$

что обеспечит энергию удара

$$T = (165 \div 175) \text{ кгм}.$$

Колебание натяжения каната можно принять в пределах от

$$N_{min} = 0{,}28P_0 = 6906 \text{ кг}$$

до

$$N_{max} = 0{,}4P_0 = 9866 \text{ кг}.$$

В соответствии с графиком рис. 3 это обеспечит скорость ударов не меньше, чем при минимальном натяжении каната даже при значении k, равном 16.

Заключение

1. Наличие трения вызывает снижение эффективности работы струга, которая зависит от величины соотношения сил P_0 и F_{max}. Для эффективной работы струга необходимо обеспечение соотношения P_0 и F_{max} больше 10. В этом случае влияние трения на работу струга будет незначительным.

2. Работа струга в значительной степени зависит от величины натяжения каната. При правильно выбранном натяжении каната скорость ударов может быть увеличена в 2 раза по сравнению с максимальной скоростью свободных колебаний. Это обеспечивает увеличение энергии ударов в 4 раза и является залогом эффективной работы струга.

3. При работе вибрационного струга канат обеспечивает максимально полезное использование вибраций корпуса для разрушения угольного массива, поэтому вибрация должна быть примерно постоянной.

Натяжение каната не должно быть меньше минимального значения, при котором имеет место предельный случай устойчивой работы струга, и не должно достигать величины $N = P_0 - F_{max}$, при которой становится невозможным ударный режим работы.

Наиболее рационально оптимальное натяжение каната N_0, при котором имеет место максимальная скорость ударов.

4. Наличие трения вызывает не увеличение, а уменьшение величины минимального и оптимального натяжений каната, которые при отсутствии трения определятся равенствами (12) и (14). Характер изменения скорости ударов от величины натяжения каната при этом не изменяется (рис. 3).

5. Минимальное и оптимальное натяжения каната определяются зависимостями (28) и (36)

$$N_{min} = (0{,}3 - 0{,}55k')P_0;$$

$$N_0 = (0{,}3 + 0{,}002k)P_0.$$

Скорости ударов, соответствующие N_{min} и N_0, можно определить по формулам (30) и (37)

$$v_{min} = (1{,}9 - 1{,}85k')\, v_0;$$

$$v_{max} = (2{,}13 - 2{,}4k')\, v_0.$$

6. Выбираемое натяжение каната должно примерно соответствовать оптимальному значению. Колебание натяжения каната допустимо от величины N_{min} до величины N_{max}, которое следует принимать из условия наименьшей допустимой скорости ударов и можно определить по графикам рис. 3.

При выборе натяжения каната следует учитывать изменение силы трения в процессе работы. Для этого необходимо задавать нижний предел колебания $k\left(k = \frac{P_0}{F_{max}}\right)$.

7. Мощность, затрачиваемая на преодоление трения при работе, имеет наибольшее значение при минимальном натяжении каната и может быть определена по формуле (35).

Мощность, затрачиваемая на удары по забою, имеет наибольшее значение при оптимальном натяжении каната и может быть определена по формуле (39).

8. Работа струга в конечном счете зависит от выбранных параметров возбуждающего устройства, которые определяют свободные колебания струга. При выборе этих параметров особое внимание должно быть уделено выбору угловой скорости ω вращения неуравновешенных мас и обеспечению достаточной амплитуды A_0 свободных колебаний, так как произведение ω и A_0 определяет величину максимальной скорости свободных колебаний [формула (5)].

9. При правильно выбранных параметрах возбуждающего устройства и натяжения каната вполне возможно получение энергии ударов больше 150 *кгм*, что свидетельствует о возможности достижения достаточно высокой эффективности вибрационного струга.

10. Полученные основные выводы и зависимости могут быть использованы при конструировании и анализе возможной эффективности вибрационного струга.

Использованная литература

1. Кучеров П. С. Динамика вибрационных угольных стругов. Записки института горной механики АН УССР, 1951, № 9.
2. Кучеров П. С. Некоторые замечания к поправкам тов. Б. Н. Любимова. Сборник трудов ИГД АН УССР, 1951, № 1/10.
3. Любимов Б. Н. Необходимые поправки к работе тов. П. С. Кучерова. Сборник трудов ИГД АН УССР, 1951, № 1/10.
4. Любимов Б. Н. Динамика вибрационного угольного струга с синусоидальной возбуждающей силой. Сб. Расчеты и конструирование горных машин. Углетехиздат, 1954.
5. Перетолчин В. А. Анализ некоторых вопросов работы горных машин по принципу крупного скола. Диссертация. Фонды Ленинградского горного института, 1954.
6. Топчиев А. В. Создание новых исполнительных органов угледобывающих машин и задачи научных исследований в этой области. Известия АН СССР, 1953, № 1.