Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLII, вып. I, 1960 г.

О ПЕРЕХОДНОМ ПЕРИОДЕ В ПРОЦЕССЕ УЛАВЛИВАНИЯ КЛЕТИ ПАРАШЮТАМИ

Т. А. Пономарева

При изучении колебаний жесткой армировки шахтных стволов необходимо различать два вида сил взаимодействия парашютного устройства с проводниками — торможения и сцепления. Под силой торможения будем понимать силу взаимодействия парашютов с проводниками при движении подъемного сосуда вдоль проводников, под силой сцепления — силу взаимодействия парашютов с проводниками при неподвижном по отношению к проводникам подъемном сосуде или движении его с весьма небольшой скоростью. В общем случае сила сцепления не равна силе торможения. Так, при действии парашютов трения различие в величине силы торможения и силы сцепления будет определяться различием в величине коэффициентов трения движения и трения покоя. При этом следует иметь в виду, что трение покоя больше трения движения в 1,7—2,8 раза [1] и, следовательно, сила сцепления будет больше силы торможения.

Процесс улавливания клети парашютными устройствами с неразделенными функциями улавливания и торможения при жесткой армировке можно разделить [1, 2] на два периода: 1) от начала действия парашютного устройства до момента сцепления с проводниками; 2) от момента сцепления подъемного сосуда с проводниками до полного затухания колебаний армировки. В течение первого периода подъемный сосуд перемещается вниз с замедлением под действием двух взаимно противоположных сил (силы тяжести и направленной вверх силы торможения), а система проводники-расстрелы совершает вынужденные колебания под действием силы торможения. В течение второго периода подъемный сосуд и система проводники-расстрелы совершают свободные колебания как одно целое вследствие наличия сил сцепления парашютных устройств с проводниками.

Однако при определенной величине амплитуды совместных колебаний в некоторые моменты вес клети и сила инерции ее массы могут превосходить силу сцепления парашютных устройств с проводниками. В результате сцепление клети с проводниками в эти моменты будет нарушаться, сопровождаясь кратковременным их разобщением и перемещением клети вдоль проводников, т. е. клеть будет как бы скачкооб-

[1] Коэффициент трения покоя стали по стали 0,25—0,15 (при сухой поверхности), а при движении со скоростью 3 *м/сек* он составляет 0,09 [4, стр. 412].

разно сползать по проводникам. Такое сползание будет происходить до тех пор, пока амплитуда колебаний армировки не снизится настолько, что станет возможным совместность колебаний клети и армировки при данной величине силы сцепления.

Таким образом, при определенных условиях переход от первого периода процесса улавливания клети ко второму будет происходить путем чередования кратковременных состояний сцепления и состояний скольжения вдоль проводников с торможением. Этот период неустановившегося режима движения клети назовем переходным.

В настоящей статье рассматривается задача о величине динамического коэффициента при расчете жесткой армировки шахтных стволов в случае наличия переходного периода. При значительной величине сцепления парашютных устройств с проводниками по сравнению с силой торможения сползания клети не произойдет [2].

1. Условия, обеспечивающие совместность колебаний подъемного сосуда и опорной системы

При динамическом расчете жесткая армировка может быть заменена эквивалентной в динамическом отношении системой с одной степенью свободы. Приведенную массу этой системы будем считать сосредоточенной в точке прикрепления проводника к наиболее нагруженному расстрелу, т. е. в точке максимального прогиба расстрела. В дальней-

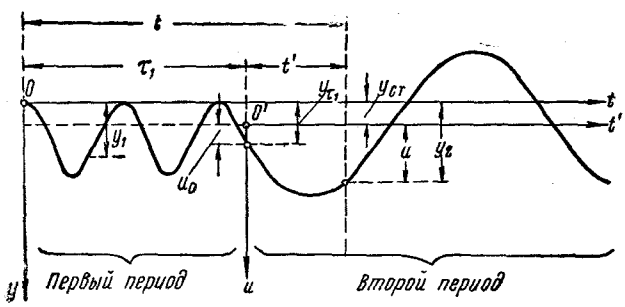


Рис. 1. График колебаний системы проводники-расстрелы в процессе улавливания подъемного сосуда при отсутствии переходного периода:
первый период — торможение; второй период — совместные колебания клети и опорной системы

шем под колебаниями системы проводники-расстрелы (армировки) понимаются колебания этой точки (рис. 1).

На рис. 1 система координат y, t отнесена к состоянию равновесия опорной системы в момент времени $t = 0$, т. е. к состоянию равновесия до нагружения. Система координат u, t' отнесена к состоянию равновесия опорной системы после затухания колебаний, т. е. к состоянию равновесия после нагружения весом подъемного сосуда, вызывающим деформацию $y_{ст}$. Кривая на участке $t < \tau_1$ показывает вынужденные колебания системы проводники-расстрелы в стадии торможения. Момент $t = \tau_1$ соответствует сцеплению подъемного сосуда с армировкой. Деформация в этот момент $y = y_1 = y_{\tau 1}$. * Кривая на участке $t > \tau_1$ выра-

* Индексом 1 или 2 будем отмечать величины, характеризующие колебания в течение первого или второго периода соответственно. Так, $y = y_1$ обозначает прогиб наиболее нагруженного расстрела в течение первого периода; $y = y_2$ — прогиб того же расстрела во втором периоде.

жает совместные колебания системы проводники-расстрелы и подъемного сосуда, связанного с ней силой сцепления. Эти колебания являются свободными колебаниями относительно деформированного состояния опорной системы под действием веса клети и в системе координат u, t' описываются известными [3] уравнениями

$$\left.\begin{aligned} u &= u_0 \cos \omega_2 t' + \frac{v_{0,2}}{\omega_2} \sin \omega_2 t' \\ v_2 &= v_{0,2} \cos \omega_2 t' - u_0 \omega_2 \sin \omega_2 t' \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где u и v_2 — перемещения и скорость приведенной массы системы и подъемного сосуда в момент t';

u_0 и $v_{0,2}$ — начальные отклонение и скорость указанных масс в момент $t' = 0$;

ω_2 — частота свободных колебаний системы проводники-расстрелы с уловленной массой подъемного сосуда,

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{c}{m + M}}; \qquad (2)$$

m — приведенная масса участка опорного ряда армировки, воспринимающего нагрузку;

M — масса подъемного сосуда, приходящаяся на рассматриваемый опорный ряд армировки;

c — жесткость армировки в центре приведения массы, т. е. величина силы, вызывающей прогиб $y = 1$.

Как следует из рис. 1,

$$u = y_2 - y_{ст}; \quad t' = t - \tau_1,$$

где $y_{ст}$ — деформация армировки (прогиб расчетного расстрела) от статического действия веса подъемного сосуда,

$$y_{ст} = \frac{G}{c};$$

G — вес подъемного сосуда, приходящийся на рассматриваемый опорный ряд армировки.

Произведя соответствующую замену в выражении (1), получим

$$\left.\begin{aligned} y_2 - y_{ст} &= u_0 \cos \omega_2 (t - \tau_1) + \frac{v_{0,2}}{\omega_2} \sin \omega_2 (t - \tau_1) \\ v_2 &= v_{0,2} \cos \omega_2 (t - \tau_1) - u_0 \omega_2 \sin \omega_2 (t - \tau_1) \end{aligned}\right\}. \qquad (3)$$

Начальные отклонение и скорость системы для второго периода, как это следует из рассмотрения колебаний первого периода, будут

$$u_0 = y_{\tau_1} - y_{ст}; \quad v_{0,2} = v_{\tau_1},$$

где y_{τ_1} и v_{τ_1} — отклонение и скорость системы в момент сцепления подъемного сосуда с проводниками в системе координат y, t.

Отсюда по формуле (3) получаем

$$\left.\begin{aligned} y_2 &= y_{ст} + (y_{\tau_1} - y_{ст}) \cos \omega_2 (t - \tau_1) + \frac{v_{\tau_1}}{\omega_2} \sin \omega_2 (t - \tau_1) \\ v_2 &= v_{\tau_1} \cos \omega_2 (t - \tau_1) - (y_{\tau_1} - y_{ст}) \omega_2 \sin \omega_2 (t - \tau_1) \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

или в другой форме

$$y_2 = y_{ст} + A\cos\omega_2 t + B\sin\omega_2 t; \tag{5}$$

$$v_2 = \omega_2 (B\cos\omega_2 t - A\sin\omega_2 t), \tag{6}$$

где A и B — коэффициенты, характеризующие состояние системы в момент сцепления подъемного сосуда с проводниками,

$$\left.\begin{aligned} A &= (y_{\tau_1} - y_{ст})\cos\omega_2\tau_1 - \frac{v_{\tau_1}}{\omega_2}\sin\omega_2\tau_1 \\ B &= (y_{\tau_1} - y_{ст})\sin\omega_2\tau_1 + \frac{v_{\tau_1}}{\omega_2}\cos\omega_2\tau_1 \end{aligned}\right\}. \tag{7}$$

Время, соответствующее максимальному значению y_2, которое обозначим через $t_{2_{max}}$, найдется из условия $v_2 = 0$, что дает

$$\sin\omega_2 t_{2_{max}} = \pm\frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}};$$

$$\cos\omega_2 t_{2_{max}} = \pm\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

Соответственно по формуле (5)

$$y_{2_{max}} = y_{ст} \pm \sqrt{A^2 + B^2}. \tag{8}$$

Подставив A и B по выражению (7), получим

$$y_{2_{max}} = y_{ст}\left[1 + \sqrt{\left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}} - 1\right)^2 + \left(\frac{v_{\tau_1}}{y_{ст}\omega_2}\right)^2}\right] \tag{9}$$

или после замены ω_2 по формуле (2)

$$y_{2_{max}} = y_{ст}\left[1 + \sqrt{\left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}} - 1\right)^2 + \frac{m+M}{c}\left(\frac{v_{\tau_1}}{y_{ст}}\right)^2}\right]; \tag{10}$$

$$\mu_2 = \frac{y_{2_{max}}}{y_{ст}} = 1 + \sqrt{\left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}} - 1\right)^2 + \frac{m+M}{c}\left(\frac{v_{\tau_1}}{y_{ст}}\right)^2}, \tag{11}$$

где μ_2 — динамический коэффициент при максимальной деформации во втором периоде.

Формула (11), как и следовало ожидать, совпадает с выражением динамического коэффициента, полученным ранее другим путем [2]. Найденные зависимости характеризуют совместные колебания подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы и, следовательно, действительны лишь в случае, если сила сцепления парашютных устройств с проводниками достаточно велика, чтобы воспрепятствовать разобщению подъемного сосуда и опорной системы.

Подъемный сосуд и опорная система будут колебаться как одно целое лишь при силе сцепления большей или равной силе, стремящейся отделить подъемный сосуд от системы проводники-расстрелы, т. е. силе,

передаваемой подъемным сосудом на систему проводники-расстрелы. Такой силой является собственный вес подъемного сосуда и сила инерции. Отсюда условие совместности колебаний подъемного сосуда и опорной системы

$$F_c > G - Ma_2, \qquad (а)$$

где F_c — сила сцепления парашютного устройства с проводниками;
a_2 — ускорение масс M и m в процессе их совместных колебаний.

Используя формулу (6), приходим к выражению

$$a_2 = \frac{dv_2}{dt} = -\omega_2^2 (B \sin \omega_2 t + A \cos \omega_2 t). \qquad (б)$$

Но из формулы (5) следует, что

$$B \sin \omega_2 t + A \cos \omega_2 t = y_2 - y_{ст}. \qquad (в)$$

Отсюда, подставив (в) в (б), получим

$$a_2 = -\omega_2^2 (y_2 - y_{ст}), \qquad (г)$$

после чего выражение (а) может быть представлено в виде

$$F_c > G + M\omega_2^2 (y_2 - y_{ст}).$$

Решая это неравенство относительно y_2, приходим к выражению

$$y_2 < y_{ст} + \frac{F_c - G}{M\omega_2^2}.$$

Подставив сюда ω_2 по формуле (2) и имея в виду, что $y_{ст} = \frac{G}{c}$, окончательно получим

$$\left.\begin{aligned} y_2 &< y_{ст}\left[1 + \frac{m+M}{M}(f_c - 1)\right] \\ y_2 &< y_{ст}\left[f_c + \frac{m}{M}(f_c - 1)\right] \end{aligned}\right\}, \qquad (12)$$

где f_c — удельная сила сцепления,

$$f_c = \frac{F_c}{G}.$$

Таким образом, предельная величина деформации при совместных колебаниях подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы

$$y_{пр} = y_{ст}\left[1 + \frac{m+M}{M}(f_c - 1)\right] = y_{ст}\left[f_c + \frac{m}{M}(f_c - 1)\right]. \qquad (13)$$

Найдем величину скорости v_2, соответствующей $y_2 = y_{пр}$. Для этого выразим скорость массы системы при колебаниях через деформацию.

Значения $\cos \omega_2 t$ и $\sin \omega_2 t$ могут быть получены из системы уравнений

$$A \cos \omega_2 t + B \sin \omega_2 t = y_2 - y_{ст};$$

$$\cos^2 \omega_2 t + \sin^2 \omega_2 t = 1,$$

решение которой приводит к выражениям

$$\left.\begin{aligned}\cos\omega_2 t &= \frac{A}{A^2+B^2}(y_2-y_{ст}) \pm \frac{B}{A^2+B^2}\sqrt{A^2+B^2-(y_2-y_{ст})^2}\\ \sin\omega_2 t &= \frac{B}{A^2+B^2}(y_2-y_{ст}) \mp \frac{A}{A^2+B^2}\sqrt{A^2+B^2-(y_2-y_{ст})^2}\end{aligned}\right\}. \qquad (14)$$

Подставив эти выражения в формулу (6), получим

$$v_2 = \pm\omega_2\sqrt{A^2+B^2-(y_2-y_{ст})^2},$$

что после замены A^2+B^2 в соответствии с выражением (8) или (7) дает

$$\left.\begin{aligned}v_2 &= \pm\omega_2\sqrt{(y_{2max}-y_{ст})^2-(y_2-y_{ст})^2}\\ \text{или}\quad v_2 &= \pm\omega_2\sqrt{(y_{\tau_1}-y_{ст})^2-(y_2-y_{ст})^2+\frac{v_{\tau_1}^2}{\omega_2^2}}\end{aligned}\right\}. \qquad (15)$$

Полагая в формуле (15) $y_2 = y_{пр}$ по выражению (13), получим формулы для определения предельной скорости масс m и M при их совместных колебаниях

$$v_{пр} = \pm\omega_2\sqrt{(y_{2max}-y_{ст})^2-y_{ст}^2\left[\frac{m+M}{M}(f_c-1)\right]^2} \qquad (16)$$

или

$$v_{пр} = \pm\omega_2\sqrt{(y_{\tau_1}-y_{ст})^2-y_{ст}^2\left[\frac{m+M}{M}(f_c-1)\right]^2+\frac{v_{\tau_1}^2}{\omega_2^2}}. \qquad (16')$$

Зависимости (13), (16) и (16′) определяют состояние системы подъемный сосуд — проводники-расстрелы в момент разобщения масс m и M, происходящего вследствие недостаточной силы сцепления.

При наличии сползания деформация армировки не может достигнуть величины, равной y_{2max}. Поэтому y_{2max} в формуле (16) не выражает реально возможной деформации, а имеет смысл лишь некоторого параметра, определяемого зависимостями (9) или (10).

2. Определение динамического коэффициента и расчетной нагрузки при наличии переходного периода

Выражение динамического коэффициента μ_2 по формуле (11) действительно лишь при $y_{2max} < y_{пр}$ или с учетом выражений (10) и (13)

$$\sqrt{\left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}}-1\right)^2+\frac{m+M}{c}\left(\frac{v_{\tau_1}}{y_{ст}}\right)^2} < \frac{m+M}{M}(f_c-1). \qquad (17)$$

Если указанное условие не обеспечено, то в некоторый момент времени произойдет разобщение подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы. В этом случае зависимости (4) или (5) и (6) будут действительны только до момента разобщения, после чего подъемный сосуд будет перемещаться под действием противоположно направленных сил G

и $F_c = f_c G$, а система проводники-расстрелы (масса m) будет совершать вынужденные колебания под действием возмущающей силы F_c до момента $t = \tau_2$, соответствующего повторному сцеплению подъемного сосуда с армировкой.

При несоблюдении условия (17) будет иметь место переходный период и колебания системы проводники-расстрелы будут происходить по зависимости, показанной на рис. 2.

Точка a соответствует моменту $t = \tau_1$, в который происходит сцепление подъемного сосуда и армировки. Точка b соответствует моменту $t = \psi$, когда смещение приведенной массы m достигает величины $y = y_{пр}$ и происходит разобщение подъемного сосуда и армировки. Кривая bcd

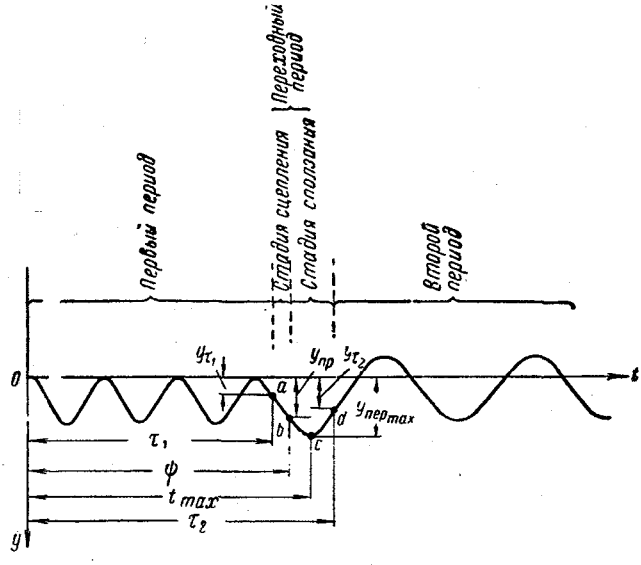


Рис. 2. График колебаний системы проводники-расстрелы в процессе улавливания подъемного сосуда при наличии переходного периода

отражает перемещение массы m в течение стадии сползания клети. Точка d соответствует моменту $t = \tau_2$, в который происходит повторное сцепление подъемного сосуда и армировки.

При описании движения подъемного сосуда и колебаний системы проводники-расстрелы в стадии сползания примем момент их разобщения за начальный, а время, отсчитываемое от этого момента и равное $t - \psi$, обозначим $t_{сп}$.

Из динамики сооружений известно [3], что вынужденные колебания упругой системы под действием внезапно приложенной силы $F(t)$ определяются зависимостями:

$$\left.\begin{aligned} y &= y_0 \cos \omega\tau + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega\tau + \frac{1}{\omega m} \int_0^{\tau} F(t) \sin \omega (\tau - t)\, dt \\ v &= v_0 \cos \omega\tau - y_0 \omega \sin \omega\tau + \frac{1}{m} \int_0^{\tau} F(t) \cos \omega (\tau - t)\, dt \end{aligned}\right\}, \qquad (18)$$

где y_0 и v_0 — начальное перемещение и начальная скорость массы, m.

Полагая в этих зависимостях $y_0 = y_{пр}$ и $v_0 = v_{пр}$, что соответствует состоянию системы в момент разобщения, получим

$$\left.\begin{aligned} y_{сп} &= y_{пр}\cos\omega_1 t_{сп} + \frac{v_{пр}}{\omega_1}\sin\omega_1 t_{сп} + \\ &+ \frac{1}{\omega_1 m}\int_0^{t_{сп}} F_{сп}(t)\sin\omega_1(t_{сп}-t)\,dt \\ v_{сп} &= v_{пр}\cos\omega_1 t_{сп} - y_{пр}\omega_1\sin\omega_1 t_{сп} + \\ &+ \frac{1}{m}\int_0^{t_{сп}} F_{сп}(t)\cos\omega_1(t_{сп}-t)\,dt \end{aligned}\right\}, \qquad (19)$$

где $F_{сп}(t)$ — сила торможения в стадии сползания;

$y_{сп}$ и $v_{сп}$ — деформация и скорость в стадии сползания;

ω_1 — частота свободных колебаний системы проводники-расстрелы,

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{c}{m}}. \qquad (20)$$

Полагая в наиболее неблагоприятном случае силу торможения в стадии сползания равной силе сцепления, т. е. $F_{сп}(t) = F_c$, находим

$$\frac{1}{\omega_1 m}\int_0^{t_{сп}} F_c\sin\omega_1(t_{сп}-t)\,dt = \frac{F_c}{\omega_1^2 m}(1-\cos\omega_1 t_{сп}) =$$

$$= y_{ст} f_c (1-\cos\omega_1 t_{сп});$$

$$\frac{1}{m}\int_0^{сп} F_c\cos\omega_1(t_{сп}-t)\,dt = \frac{F_c}{\omega_1 m}\sin\omega_1 t_{сп} = \omega_1 y_{ст} f_c \sin\omega_1 t_{сп}.$$

В результате получаем следующие уравнения, выражающие колебания армировки в стадии сползания подъемного сосуда,

$$y_{сп} = y_{ст} f_c + (y_{пр} - y_{ст} f_c)\cos\omega_1 t_{сп} + \frac{v_{пр}}{\omega_1}\sin\omega_1 t_{сп}; \qquad (21)$$

$$v_{сп} = \omega_1\left[\frac{v_{пр}}{\omega_1}\cos\omega_1 t_{сп} - (y_{пр} - y_{ст} f_c)\sin\omega_1 t_{сп}\right]. \qquad (21')$$

Время $t_{сп} = t_{max} - \psi$, соответствующее максимальной деформации в стадии сползания (см. рис. 2), получим из условия $v_{сп} = 0$. При этом условии из формулы (21′) получаем

$$\left.\begin{aligned} \cos\omega_1(t_{max}-\psi) &= \frac{y_{пр} - y_{ст} f_c}{\sqrt{\frac{v_{пр}^2}{\omega_1^2} + (y_{пр} - y_{ст} f_c)^2}} \\ \sin\omega_1(t_{max}-\psi) &= \frac{\frac{v_{пр}}{\omega_1}}{\sqrt{\frac{v_{пр}^2}{\omega_1^2} + (y_{пр} - y_{ст} f_c)^2}} \end{aligned}\right\}. \qquad (22)$$

Время в момент разобщения m и M ($t = \psi$) определяется из формулам (14), в которые необходимо подставить: 1) вместо y_2 — значение $y_{пр}$, вычисленное по формуле (13); 2) значения A и B, вычисленные по формуле (7).

Максимальная деформация армировки в стадии сползания является вместе с тем и максимальной деформацией переходного периода, поэтому обозначим ее $y_{пер_{max}}$. Подставив в выражение (21) значения $\sin \omega_1 t_{сп}$ и $\cos \omega_1 t_{сп}$, по формулам (22) найдем

$$y_{пер_{max}} = y_{ст} f_c + \sqrt{(y_{пр} - y_{ст} f_c)^2 + \frac{v_{пр}^2}{\omega_1^2}}. \qquad (23)$$

Заменив в выражении (23) $y_{пр}$ и $v_{пр}$ по формулам (13) и (16′) и подставив в него значения $\omega_1 = \sqrt{\frac{c}{m}}$ и $\omega_2 = \sqrt{\frac{c}{m+M}}$, после преобразования получаем

$$y_{пер_{max}} = y_{ст} \left[f_c + \sqrt{\frac{m}{m+M}} \times \right.$$

$$\left. \times \sqrt{\left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}} - 1\right)^2 + \frac{m+M}{c} \frac{v_{\tau_1}^2}{y_{ст}^2} - \frac{m+M}{M} (f_c - 1)^2} \right] \qquad (24)$$

и, соответственно,

$$\mu_{пер} = f_c + \sqrt{\frac{m}{m+M}} \sqrt{\left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}} - 1\right)^2 + \frac{m+M}{c} \frac{v_{\tau_1}^2}{y_{ст}^2} - \frac{m+M}{m} (f_c - 1)^2}, \qquad (25)$$

где $\mu_{пер}$ — динамический коэффициент при максимальной деформации в переходный период.

Для определения расчетного динамического коэффициента необходимо исследовать выражение (25) на максимум. Очевидно, такое исследование сводится к отысканию максимума некоторой функции

$$u(\tau_1) = \left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}} - 1\right)^2 + \frac{m+M}{c} \frac{v_{\tau_1}^2}{y_{ст}^2}. \qquad (26)$$

Но функция $u(\tau_1)$ является также подкоренным выражением формулы (11). Таким образом, оказывается, что максимум выражений (25) и (11) определяется максимумом общей для них функции $u(\tau_1)$ и, следовательно, соответствует одному и тому же значению τ_1.

После стадии сползания произойдет вновь сцепление подъемного сосуда с системой проводники-расстрелы. Это повторное сцепление произойдет в момент $t = \tau_2$ (см. рис. 2), когда скорость V массы подъемного сосуда M будет равна скорости $v_{сп}$ приведенной массы армировки m. В стадии сползания масса подъемного сосуда совершает равнозамедленное движение под действием собственного веса G и силы сцепления с начальной скоростью $V = v_{пр}$, соответствующей скорости в момент разобщения $t = \psi$. Таким образом, скорость подъемного сосуда в момент времени $t = \tau_2$ будет

$$V = v_{пр} - \frac{F_c - G}{M} (\tau_2 - \psi) = v_{пр} - \frac{G}{M} \times$$

$$\times \left(\frac{F_c}{G} - 1\right)(\tau_2 - \psi) = v_{пр} - g(f_c - 1)(\tau_2 - \psi).$$

Заменив в выражении (21′) $t_{сп}=\tau_2-\psi$ и приравняв его полученному выражению V, приходим к следующему уравнению для определения времени повторного сцепления τ_2:

$$\omega_1\left[\frac{v_{пр}}{\omega_1}\cos\omega_1(\tau_2-\psi)-(y_{пр}-y_{ст}f_c)\sin\omega_1(\tau_2-\psi)\right]=$$

$$=v_{пр}-g(f_c-1)(\tau_2-\psi).$$

Подставив сюда $y_{пр}$ и $v_{пр}$ по формулам (13) и (16), после преобразований получим

$$\frac{\frac{M}{m}\sqrt{\frac{m}{m+M}}\sqrt{(y_{\tau_1}-y_{ст})^2-y_{ст}^2\left[\frac{m+M}{M}(f_c-1)\right]^2+\frac{v_{\tau_1}^2}{\omega_2^2}}}{y_{ст}(f_c-1)}\times$$

$$\times[1-\cos\omega_1(\tau_2-\psi)]=\omega_1(\tau_2-\psi)-\sin\omega_1(\tau_2-\psi). \qquad (27)$$

3. Случай постоянной силы торможения

В первом периоде армировка совершает вынужденные колебания под действием внезапного приложения силы торможения парашютных устройств. При этом в момент начала торможения ($t=0$) приведенная масса армировки находится в покое. Таким образом, колебания армировки в первом периоде описываются уравнениями (18) при $y_0=0$ и $v_0=0$. В случае постоянной силы торможения $F(t)=F$; тогда по формуле (18) получаем

$$\left.\begin{aligned} y_1&=\frac{F}{\omega_1^2 m}(1-\cos\omega_1\tau)=f\frac{G}{\omega_1^2 m}(1-\cos\omega_1\tau)=fy_{ст}(1-\cos\omega_1\tau)\\ v_1&=\frac{F}{\omega_1 m}\sin\omega_1\tau=\omega_1 f\frac{G}{\omega_1^2 m}\sin\omega_1\tau=\omega_1 fy_{ст}\sin\omega_1\tau\end{aligned}\right\}. \qquad (28)$$

Максимум динамического коэффициента по уравнению (11) при постоянной силе торможения выражается формулой (2)

$$\mu_{2\max}=1+\sqrt{1+\frac{m}{M}\left(f-1+f\frac{M}{m}\right)^2}, \qquad (29)$$

что соответствует

$$\left.\begin{aligned}\cos\omega_1\tau_1&=-\frac{m}{M}\left(1-\frac{1}{f}\right)\\ \sin\omega_1\tau_1&=\sqrt{1-\frac{m^2}{M^2}\left(1-\frac{1}{f}\right)^2}\end{aligned}\right\}. \qquad (30)$$

А это по выражению (28) при $\tau=\tau_1$ дает

$$y_{\tau_1}=fy_{ст}\left[1+\frac{m}{M}\left(1-\frac{1}{f}\right)\right]=y_{ст}\left[f+\frac{m}{M}(f-1)\right]; \qquad (31)$$

$$v_{\tau_1}=\omega_1 fy_{ст}\sqrt{1-\frac{m^2}{M^2}\left(1-\frac{1}{f}\right)^2}=\omega_1 y_{ст}\sqrt{f^2-\frac{m^2}{M^2}(f-1)^2}. \qquad (32)$$

Сопоставление уравнений (11) и (29) показывает, что максимум функции (26) выражается формулой

$$[u(\tau_1)]_{\max} = \left[\left(\frac{y_{\tau_1}}{y_{ст}} - 1\right)^2 + \frac{m+M}{c}\frac{v_{\tau_1}^2}{y_{ст}^2}\right]_{\max} =$$

$$= 1 + \frac{m}{M}\left(f - 1 + f\frac{M}{m}\right)^2. \qquad (33)$$

Как показано выше, максимум динамического коэффициента μ_2 и максимум динамического коэффициента при наличии переходного периода определяются одинаковыми условиями.

Таким образом, формулы (30), (31), (32) и (33) выражают наиболее неблагоприятный случай сцепления подъемного сосуда с армировкой при постоянной силе торможения.

Подставив выражение (33) в формулу (17), получим условие, при выполнении которого не будет происходить сползания подъемного сосуда при колебаниях армировки

$$\left.\begin{array}{l} \sqrt{1 + \frac{m}{M}\left(f - 1 + f\frac{M}{m}\right)^2} < \frac{m+M}{M}(f_c - 1) \\ \text{или} \\ f_c > 1 + \frac{M}{m+M}\sqrt{1 + \frac{m}{M}\left(f - 1 + f\frac{M}{m}\right)^2} \end{array}\right\}. \qquad (34)$$

Если это условие не выполняется, то будет иметь место переходный период. Следовательно, для определения динамического коэффициента необходимо пользоваться зависимостью (25). При этом максимальное значение динамического коэффициента в данном случае получим, применяя выражение (33)

$$\mu_{пер} = f_c + \sqrt{\frac{m}{m+M}}\sqrt{1 + \frac{m}{M}\left(f - 1 + f\frac{M}{m}\right)^2 - \frac{M+m}{M}(f_c - 1)^2}. \qquad (35)$$

Состояние системы проводники-расстрелы в момент $t = \psi$, соответствующий разобщению подъемного сосуда с армировкой и определяющий начало стадии сползания, характеризуется предельными значениями смещения и скорости приведенной массы армировки, допускающими совместность колебания подъемного сосуда и армировки.

Предельное смещение приведенной массы $y_{пр}$ не зависит от характера изменения силы торможения и во всех случаях определяется зависимостью (13).

Выражение предельной скорости при постоянной силе торможения найдем по формуле (16′), подставив в нее y_{τ_1} и v_{τ_1} из выражений (31) и (32)

$$\left.\begin{array}{l} v_{пр} = \pm\omega_2 y_{ст}\sqrt{\frac{M+m}{m}} \times \\ \times\sqrt{f^2 - \frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_c - 1)^2 - (f-1)^2\right]} \\ \text{или} \\ v_{пр} = \pm\omega_1 y_{ст}\sqrt{f^2 - \frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_c - 1)^2 - (f-1)^2\right]} \end{array}\right\}. \qquad (36)$$

Применяя формулу (28), а также (4), (21) и (21′) с подстановкой в них y_{τ_1} по формуле (31), v_{τ_1} по (32), $y_{\text{пр}}$ по (13) и $v_{\text{пр}}$ по (36), приходим к следующим зависимостям, описывающим колебания системы проводники-расстрелы при улавливании подъемного сосуда парашютными устройствами с постоянной силой торможения.

1. При невозможности разобщения подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы, т. е. при выполнении условия (34):

а) в стадии торможения

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= \frac{F}{\omega_1^2 m}(1-\cos\omega_1 t) = y_{\text{ст}} f(1-\cos\omega_1 t) \\ v_1 &= \frac{F}{\omega_1 m}\sin\omega_1 t = y_{\text{ст}} f\omega_1 \sin\omega_1 t \end{aligned}\right\}; \qquad (37)$$

б) в стадии совместных колебаний подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы

$$\left.\begin{aligned} y_2 &= y_{\text{ст}}\left[1+\frac{m+M}{M}(f-1)\cos\omega_2(t-\tau_1)+\right. \\ &\left.+\sqrt{\frac{m+M}{m}}\sqrt{f^2-\frac{m^2}{M^2}(f-1)^2}\sin\omega_2(t-\tau_1)\right] \\ v_2 &= y_{\text{ст}}\omega_2\left[\sqrt{\frac{m+M}{m}}\sqrt{f^2-\frac{m^2}{M^2}(f-1)^2}\cos\omega_2(t-\tau_1)-\right. \\ &\left.-\frac{m+M}{M}(f-1)\sin\omega_2(t-\tau_1)\right] \end{aligned}\right\}. \qquad (38)$$

2. При возможности разобщения подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы, т. е. когда условие (34) не удовлетворяется:

а) в стадии торможения — зависимости (37);

б) в течение времени от момента сцепления подъемного сосуда с системой проводники-расстрелы до момента их разобщения (стадия сцепления) — зависимости (38) с ограничениями

$$y_2 \leqslant y_{\text{пр}} = y_{\text{ст}}\left[f_{\text{с}}+\frac{m}{M}(f_{\text{с}}-1)\right];$$

$$v_2 \geqslant \left|\omega_2 y_{\text{ст}}\sqrt{\frac{M+m}{m}}\sqrt{f^2-\frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_{\text{с}}-1)^2-(f-1)^2\right]}\right|;$$

в) в течение времени от момента разобщения подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы до момента их повторного сцепления (стадия сползания)

$$\left.\begin{aligned} y_{\text{сп}} &= y_{\text{ст}}\left\{f_{\text{с}}+\frac{m}{M}(f_{\text{с}}-1)\cos\omega_1(t-\psi)+\right. \\ &\left.+\sqrt{f^2-\frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_{\text{с}}-1)^2-(f-1)^2\right]}\sin\omega_1(t-\psi)\right\} \\ v_{\text{сп}} &= y_{\text{ст}}\omega_1\left\{\sqrt{f^2-\frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_{\text{с}}-1)^2-(f-1)^2\right]}\times\right. \\ &\left.\times\cos\omega_1(t-\psi)-\frac{m}{M}(f_{\text{с}}-1)\sin\omega_1(t-\psi)\right\} \end{aligned}\right\}; \qquad (39)$$

г) в стадии совместных колебаний подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы после их повторного сцепления—зависимости (4)

или (5) и (6), в которых вместо v_{τ_1} и y_{τ_1} необходимо подставить скорость и деформацию системы в момент повторного сцепления, т. е. v_{τ_2} и y_{τ_2}, а вместо τ_1 — время, соответствующее моменту повторного сцепления, т. е. τ_2; скорость v_{τ_2} и деформация системы y_{τ_2} в момент повторного сцепления определяются по (39) при $t = \tau_2$.

Максимальная деформация в стадии совместных колебаний определяется по формуле (9) или (10), в которую вместо v_{τ_1} и y_{τ_1} необходимо подставить скорость и деформацию в момент повторного сцепления, т. е. v_{τ_2} и y_{τ_2}. Полученная максимальная деформация не должна превосходить $y_{\text{пр}}$ по формуле (13). Если максимальная деформация, найденная по формулам (9) или (10), превзойдет $y_{\text{пр}}$, то это указывает на возникновение в некоторый момент повторного разобщения, т. е. на продолжение переходного периода.

Для определения времени ψ, соответствующего разобщению подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы (момент начала сползания), приравниваем y_2 по формуле (38) и $y_{\text{пр}}$ по (13), заменив в выражении (38) $t = \psi$.

Решая полученное уравнение с учетом того, что

$$\cos^2 \omega_2 (\psi - \tau_1) + \sin^2 \omega_2 (\psi - \tau_1) = 1,$$

получим

$$\left.\begin{aligned}
\sin \omega_2 (\psi - \tau_1) &= \frac{m}{M} \frac{\sqrt{\frac{m+M}{m}}}{f^2 + \frac{m}{M}(f-1)^2} \left\{ (f_c - 1) \sqrt{f^2 - \frac{m^2}{M^2}(f-1)^2} - \right. \\
&\left. - (f-1) \sqrt{f^2 - \frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_c-1)^2 - (f-1)^2\right]} \right\} \\
\cos \omega_2 (\psi - \tau_1) &= \frac{\frac{m}{M}\frac{m+M}{M}(f_c - 1)(f-1)}{f^2 + \frac{m}{M}(f-1)^2} + \\
&+ \frac{\sqrt{f^2 - \frac{m^2}{M^2}(f-1)^2}\sqrt{f^2 - \frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_c-1)^2 - (f-1)^2\right]}}{f^2 + \frac{m}{M}(f-1)^2}
\end{aligned}\right\}. \quad (40)$$

Отсюда и получаем ψ.

Время повторного сцепления находим по уравнению (27), которое после подстановки в него y_{τ_1} и v_{τ_1} по формулам (31) и (32) принимает вид

$$\frac{M}{m}\frac{1}{f_c - 1}\sqrt{f^2 - \frac{m}{M}\left[\frac{m+M}{M}(f_c-1)^2 - (f-1)^2\right]} \times$$
$$\times [1 - \cos \omega_1 (\tau_2 - \psi)] = \omega_1 (\tau_2 - \psi) - \sin \omega_1 (\tau_2 - \psi). \quad (41)$$

Решение этого уравнения можно выполнить методом последовательных приближений или графически.

Все приведенные зависимости предусматривают наиболее неблагоприятный случай обрыва каната, обусловливающий максимальные деформации армировки.

Рассмотрим частный случай улавливания клети при $f_c = f$, т. е. когда сила сцепления парашютных устройств с проводниками равна силе торможения.

Полагая в выражении (40) $f_c = f$, получим

$$\sin \omega_2 (\psi - \tau_1) = 0; \quad \cos \omega_2 (\psi - \tau_1) = 1.$$

Следовательно, $\psi = \tau_1$, т. е. момент разобщения подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы в данном случае совпадает с моментом их сцепления.

Подставив далее $f_c = f$ в выражение (35), находим

$$\mu_{пер} = 2f.$$

Таким образом, при $f_c = f$ сцепление подъемного сосуда с системой проводники-расстрелы в наиболее неблагоприятный момент является условным (продолжительность времени, соответствующего равенству скоростей подъемного сосуда и системы проводники-расстрелы, равна нулю), а максимальная деформация опорной системы после момента этого условного сцепления равна максимальной деформации до него. Иными словами, в случае $f_c = f$ деформация системы проводники-расстрелы в течение второго периода улавливания подъемного сосуда не может быть больше деформации в течение первого периода, как и в случае

$$\frac{m}{M} \geqslant \frac{f}{f-1},$$

что было показано ранее [2].

Выводы

1. При рассмотрении процесса улавливания клети парашютами с неразделенными функциями улавливания и торможения необходимо различать силу торможения и силу сцепления. Сила торможения действует при движении подъемного сосуда вдоль проводников, сила сцепления — при неподвижном (по отношению к проводникам) подъемном сосуде.

2. Если сила сцепления равна силе торможения, то динамический коэффициент $\mu = 2f$.

3. Если величина силы сцепления соответствует неравенству (34), то процесс улавливания клети протекает так, как было описано ранее [2].

4. В случаях промежуточных между указанными в пунктах 2 и 3 имеет место переходный период и величина динамического коэффициента определяется по формуле (25) или (35).

ЛИТЕРАТУРА

1. Доброхотов А. А. О расчете жесткой армировки стволов шахт. Сб. «Вопросы проведения горных выработок». Углетехиздат, 1955.

2. Пономарева Т. А. О динамическом коэффициенте при расчете жесткой армировки шахтных стволов. Зап. ЛГИ, 1958, т. XXXVI, вып. 1.

3. Рабинович И. М., Синицын А. П., Теренин Б. М. Расчет сооружений на действие кратковременных и мгновенных сил, Ч. I, Изд-во ВИА, 1956.

4. Справочник. Инженерные сооружения, т. I. Машстройиздат, 1950.