

УДК 622.235.5:504

А.В. Лешинский, Н.К. Лукашевич, Е.Б. Шевкун
РАСЧЕТ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЛОКАЛИЗАТОРА ВЗРЫВА

Семинар № 4

При производстве взрывных работ в карьерах, расположенных вблизи дорог с интенсивным движением транспорта, линий электропередач, населенных пунктов, водоохраных зон и т.д. возникают сложности с выдерживанием требований безопасности по сейсмическому воздействию, разлету кусков и ударной воздушной волне. В таких случаях взрывные работы выполняются под укрытием, и наибольшее применение нашли газопроницаемые цепные маты. Однако цепные укрытия обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение. В Тихоокеанском государственном университете разработаны локализаторы взрывов, изготовленные из отработанных автомобильных шин, соединенных в единый эластичный мат. При взрыве укрытие подвергается значительной ударной нагрузке, что может привести к разрыву элементов (трос, канат, цепь и т.д.), соединяющих автошины в единый мат.

Для обеспечения надежной работы укрытия необходимо знать силы натяжения в связях, что позволит подобрать диаметр сечения соединительных элементов. Рассмотрим методику расчета на примере локализатора взрыва в виде пригруза из трех шин. Шины укладываются симметрично относительно оси скважины для равномерного распределения массы пригруза по площади укрытия (рис. 1).

В предлагаемой методике расчета весь процесс взрыва от начала детонации до подброса пригруза на высшую высоту можно разделить на два основных этапа: 1 – действие ударного импульса (от начала детонации до начала движения пригруза); 2 – движение пригруза от поверхности земли до верхней точки подъема. На первом этапе ударный импульс сообщает пригрузу скорость, которая является начальной скоростью для последующего подъема пригруза. На втором этапе пригруз движется вверх, замедляя движение под действием сил тяжести шин. Силой давления взорванной массы на пригруз при движении укрытия практически можно пренебречь, потому что начальная скорость, сообщенная ударным импульсом взорванной массе и пригрузу практически одинакова.

Дальнейшее движение пригруза (падение на поверхность) не рассматривается, оно не представляет практического интереса, так как разрыв соединительных элементов пригруза, как и разлет кусков породы возможен только при движении взорванной массы вместе с укрытием вверх. На первом этапе для определения ударного импульса использовали основные положения и уравнения теории удара, потому что взрывные нагрузки – это ударные нагрузки; на втором, для определения начальной скорости движения пригруза – теорему о дви-

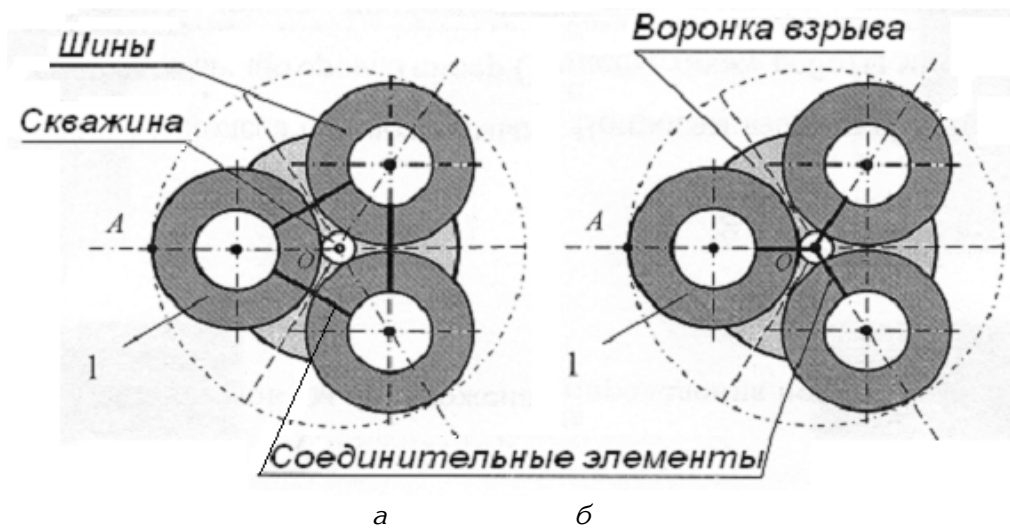


Рис. 1. Схемы расположения и увязки трех шин в пригрузе: а – соединение соседних шин по бокам; б – соединение в центре над скважиной

жении центра масс всего пригруза, а для определения силы натяжения в связи – уравнения плоского движения твердого тела отдельной шины. В расчетах использовались данные, полученные с помощью видеосъемок экспериментальных взрывов. В частности, с помощью видеосъемки с достаточной степенью точности были определены высоты подъема центров тяжести шин и их углы поворота в различные моменты времени движения пригруза.

При расчете пригруз рассматривается как механическая система, состоящая из одинаковых тел (автошин). Шины пригруза по схеме на рис. 1 расположены симметрично относительно оси скважины, и, следовательно, при взрыве все шины пригруза, получают одинаковый ударный импульс, и должны двигаться одинаково относительно оси скважины. При этом движение каждой шины можно рассматривать как плоскопараллельное относительно плоскости, проходящей через центр пригруза (ось скважины) и центр тяжести шины

перпендикулярно взрываемой поверхности. Движение пригруза в целом можно рассматривать как поступательное вдоль оси Z (рис. 2).

Вертикальную координату центра масс пригруза Z_c в любой момент времени можно определить по формуле:

$$Z_c = \frac{\sum m_i z_{c_i}}{M},$$

где $M = \sum m_i$ – масса пригруза; m_i – масса одной шины; z_{c_i} – соответствующие координаты центров тяжести шин (высоты подъема над поверхностью). Так как массы всех шин равны $m_i = m$ и $M = n \cdot m$, где n – число шин пригруза, получим

$$Z_c = \frac{\sum z_{c_i}}{n}.$$

Высоты подъема центров тяжести всех (или некоторых) шин пригруза можно определить по видеосъемке взрыва. Если удастся определить координату только одной шины пригруза, можно с достаточной степенью достоверности, принимать ее за координату центра масс всего пригруза.

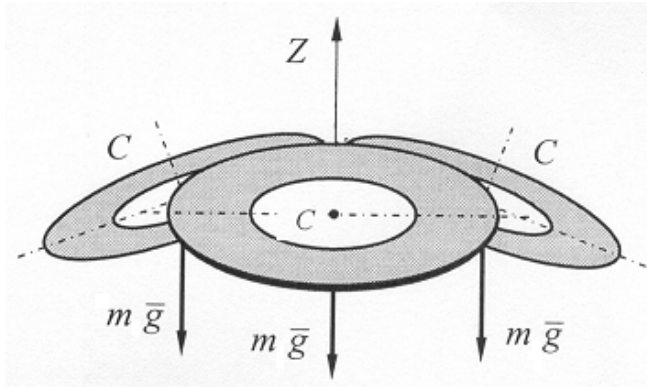


Рис. 2. Схема для расчета движения пригруза

Начальную скорость центра масс пригруза определим с помощью теоремы о движении центра масс. Пригруз движется замедленно под действием сил тяжести шин.

Согласно теореме о движении центра масс

$$M\bar{a}_c = \sum \bar{F}_i^e,$$

где $M = 3m$ – масса пригруза; \bar{a}_c – ускорение центра масс; $\sum \bar{F}_i^e$ – сумма всех внешних сил, действующих на механическую систему (пригруз).

В проекциях на ось Z , подставив значение массы пригруза $M = 3m$, после преобразования дифференциальное уравнение движения примет вид $\ddot{Z}_c = -g$.

Решив данное дифференциальное уравнение с учетом начальных условий (начальная координата $Z_{c_0} = 0$; начальная скорость $\dot{Z}_{c_0} = V_{c_{z_0}}$ – скорость, которую сообщил пригрузу ударный импульс), получим уравнение движения и уравнение скорости центра масс в окончательном виде

$$Z_c = -\frac{gt^2}{2} + V_{c_{z_0}}t,$$

$$\dot{Z}_c = -gt + V_{c_{z_0}}.$$

Из этих уравнений, зная высоту подъема в различные моменты времени, можно с достаточной степенью точ

ности определить начальную скорость центра масс пригруза.

Для определения ударного импульса, сообщившего пригрузу начальную скорость $V_{c_{z_0}}$, воспользуемся теоремой об изменении количества движения механической системы (пригруза) при ударе

при ударе

$$M\bar{u}_1 - M\bar{u}_0 = \bar{S}^{y_0},$$

где $M = \sum m_i$ – масса пригруза; \bar{u}_0 – скорость центра масс пригруза в начале удара; \bar{u}_1 – скорость центра масс пригруза в конце удара; \bar{S}^{y_0} – ударный импульс от взрыва скважинного заряда, действующий на пригруз. Согласно теории удара действием неударных сил (силы тяжести) за время удара пренебрегаем и пригруз во время удара считаем неподвижным. Спроецируем это уравнение на ось Z , и, учитывая, что в начале удара пригруз находился в покое, то есть $u_{0z} = 0$, получим

$$Mu_{1z} = S_z^{y_0}.$$

Отсюда вертикальный ударный импульс, полученный пригрузом при взрыве скважинного заряда, с учетом того, что $u_{1z} = V_{c_{z_0}}$, равен

$$S_z^{y_0} = Mu_{1z} = MV_{c_{z_0}}.$$

Для определения начальной угловой скорости шины рассмотрим действие ударного импульса на одну шину. Ударный импульс, действующий на пригруз, распределен по площади радиуса R_b – основание конуса воронки взрыва скважинного заряда (рис. 3).

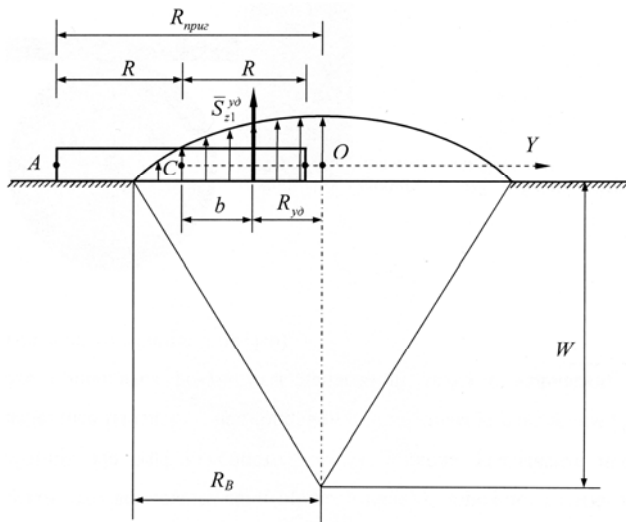


Рис. 3. Схема действия ударного импульса на одну автошину

Закон распределения ударного импульса нелинейный, близкий к шаровому сегменту. На каждую шину будет действовать сосредоточенный ударный импульс $\bar{S}_1^{y\phi}$ с одной третьей всей площади распределения. Линия действия сосредоточенного ударного импульса $\bar{S}_1^{y\phi}$ проходит через центр тяжести соответствующей части шарового сегмента.

Рассмотрим вертикальную составляющую ударного импульса, действующего на одну шину $S_{z_1}^{y\phi} = \frac{S_z^{y\phi}}{3}$. Для упрощения расчета положим, что ударный импульс вдоль прямой OA распределен по параболе. В этом случае ударный импульс, действующий на шину, должен проходить через центр тяжести половины параболы, то есть точка приложения ударного импульса расположена от оси скважины на расстоянии $R_{y\phi} = 0,375R_B$.

Расстояние b от центра тяжести шины (точки C) до точки приложения ударного импульса равно

$$b = R_{\text{приг}} - R - R_{y\phi}$$

За радиус пригруза $R_{\text{приг}}$ принимаем радиус окружности, в которую вписаны шины пригруза.

Зная ударный импульс, действующий на одну шину, и точку его приложения определим начальную угловую скорость шины с помощью теоремы об изменении момента количества движения при ударе

$$L_{xc} - L_{xc_0} = S_{z_1}^{y\phi} b, \quad (1)$$

где $L_{xc_0} = I_{xc} \omega_0 = 0$ и $L_{xc} = I_{xc} \cdot \omega$ – моменты количества движения шины относительно оси X , проходящей через центр тяжести шины перпендикулярно плоскости движения, соответственно в начале и в конце удара;

$$I_{xc} = \frac{m_1(R^2 + r^2)}{4} \text{ – момент инерции}$$

шины относительно той же оси. Момент инерции шины определяем как момент инерции кольца.

Из уравнения (1) после преобразования получим $\omega = \frac{S_{z_1}^{y\phi} b}{I_{xc}}$. Эта угловая

скорость будет начальной угловой скоростью шины при подбросе пригруза. Угловые скорости двух других шин будут определяться также, но каждая из них будет двигаться в своей плоскости.

Определим силу натяжения в соединительных элементах при различных способах увязки шин в пригруз. Для этого рассмотрим движение отдельной шины пригруза. Как было сказано выше, все шины пригруза, состоящего из трех шин, движутся

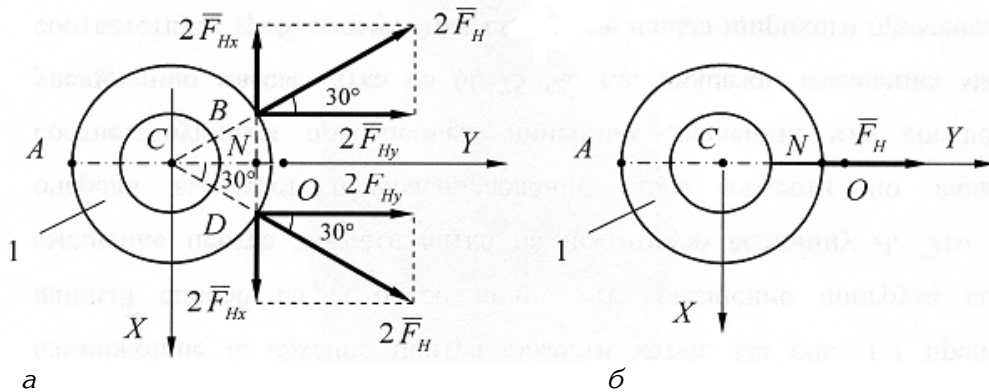


Рис. 4. Схемы для определения сил натяжения в пригрузе из трех шин (вид сверху): а – соединение соседних шин по бокам; б – соединение в центре над скважиной

плоскопараллельно, то есть шины перемещаются вверх, поворачиваются в плоскости, проходящей через ось скважины (ось симметрии) и центр тяжести шины перпендикулярно взрываваемой поверхности, и расходятся от оси симметрии. В результате центры тяжести шин вдоль оси Y (радиально) практически не перемещаются, этим перемещением можно пренебречь. Точка O – точка пересечения плоскости пригруза, лежащего на поверхности и оси скважины (оси симметрии пригруза) будет двигаться вертикально вверх и связи все время движения пригруза вверх натянуты и будут оставаться горизонтальными. Определим силу натяжения, положив, что система жесткая, то есть тела (шины) абсолютно твердые и связи сразу вступают в работу, то есть в начальный момент времени находятся в натянутом состоянии.

Рассмотрим пригруз из трех шин, каждая шина которого соединена с двумя соседними (см. рис. 1, а). На каждую шину пригруза кроме силы тяжести действуют четыре силы натяжения \bar{F}_H по две с каждой стороны (связь обхватывает шину через центральное отверстие), линии действия

сил натяжения направлены вдоль гибких связей (рис. 4, а).

Все четыре силы натяжения практически равны по модулю. Разложим каждую силу натяжения на составляющие по осям X и Y : $\bar{F}_H = \bar{F}_{Hx} + \bar{F}_{Hy}$, при этом

$$F_{Hy} = F_H \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} F_H = 0,87 F_H.$$

Заменим эти силы одной равной $4F_{Hy} = 2\sqrt{3}F_H$, приложенной в точке N , направленной по оси Y (рис. 5, а).

Расстояние от центра тяжести шины до точки приложения силы натяжения

$$CN = R \cdot \cos 30^\circ = \frac{R\sqrt{3}}{2} = 0,87 R.$$

В начальном положении шина находится на взрываваемой поверхности, в процессе движение – в воздухе (рис. 5, а). Составим уравнения плоского движения для шины. Горизонтальным перемещением шины пренебрегаем ввиду его малости.

$$m\ddot{z}_C = -mg; \quad (2)$$

$$I_C \ddot{\phi} = -4F_{Hy} \cdot CN \sin \phi. \quad (3)$$

Уравнение (2) характеризует вертикальное перемещение шины. Силу

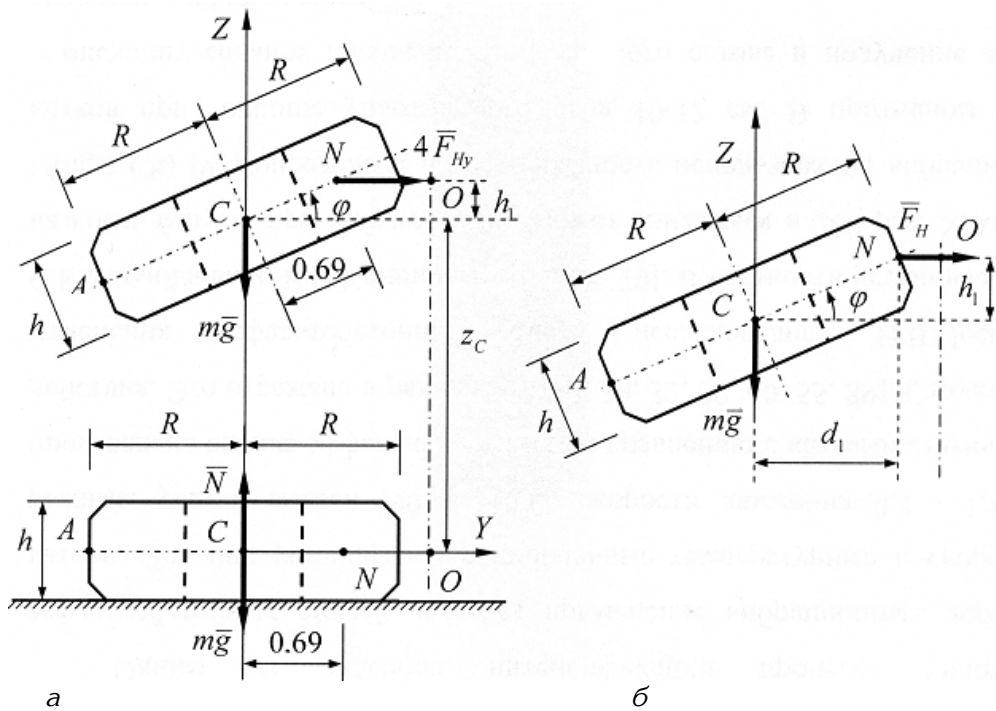


Рис. 5. Расчетная схема для определения силы натяжения связи для пригруза из трех шин: а – соединение соседних шин по бокам; б – соединение в центре над скважиной

натяжения \bar{F}_H определим из уравнения (3), подставив значения, получим

$$\ddot{\varphi} = -\frac{3R}{I_c} F_H \sin \varphi. \quad (4)$$

Это выражение содержит две переменные величины: силу натяжения и угол поворота. Для решения данного уравнения, в связи с тем, что число неизвестных больше числа уравнений, угол поворота $\varphi = \varphi(t)$ аппроксимируем полиномом $\varphi = a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4$. Для определения постоянных коэффициентов a_1, a_2, a_3, a_4 используем начальные условия (начальный угол поворота φ_0 и начальную угловую скорость ω_0) и два промежуточных значения угла поворота.

Запишем функции угла поворота и ее производные

$$\begin{aligned} \varphi &= a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4; \\ \dot{\varphi} &= 3a_1 t^2 + 2a_2 t + a_3; \\ \ddot{\varphi} &= 6a_1 t + 2a_2, \end{aligned}$$

Подставив численные значения углов поворота и угловой скорости при соответствующих моментах времени и решив полученные системы уравнений, определим аппроксимирующую функцию для угла поворота.

Из выражения (4) сила натяжения

$$F_H = -\frac{I_c}{3R} \cdot \frac{6a_1 t + 2a_2}{\sin(a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4)} \quad (5)$$

здесь выражение $6a_1 t + 2a_2 = \ddot{\varphi}$ (угловое ускорение шины) при подъеме шины будет отрицательным, потому что вращение шины замедляется, и значение силы натяжения F_H будет положительным.

Рассмотрим пригруз из трех шин, соединенных через центр (см. рис. 1, б). На шину 1 (рис. 4, б) действует сила тяжести $m\bar{g}$, приложенная в центре тяжести шины и сила натяжения \bar{F}_H . Сила натяжения \bar{F}_H приложена в точке, где связь прикреплена к обвязке шины (точка N) и направлена по связи к точке O . Покажем шину в процессе движения (рис. 5, б).

Составим уравнения плоского движения для шины. При этом горизонтальным перемещением шины пренебрегаем ввиду его малости.

$$m\ddot{z}_c = -mg;$$

$$I_C \ddot{\varphi} = -F_H R \sin \varphi. \quad (6)$$

Силу натяжения \bar{F}_H определим из уравнения (6). Это уравнение аналогично выражению (3), отличается только коэффициентом. Для его решения угол поворота $\varphi = \varphi(t)$ также аппроксимируем полиномом $\varphi = a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4$, коэффициенты которого определяются аналогично.

Подставив численные значения углов поворота при соответствующих моментах времени и решив полученные системы уравнений, определим аппроксимирующую функцию для угла поворота.

Из уравнения (6), подставив в него угол поворота, получим

$$F_H = -\frac{I_C}{R} \cdot \frac{6a_1 t + 2a_2}{\sin(a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4)} \quad (7)$$

Сравнивая выражения (5) и (7), можно сказать, что для пригруза из трех шин, сила натяжения связи будет в три раза меньше, если шины связывать по бокам с двумя другими, по сравнению с соединением через центр.

По предложенной методике были произведены расчеты и определены ударные импульсы и силы натяжения в соединительных элементах локали-

заторов взрывов, с пригрузом из трех шин, соединенных по схеме (см. рис. 1, б), при разных массах заряда ВВ. Расчеты выполнены с помощью данных, полученных по видеосъемке при проведении полигонных испытаний в карьере Теплоозерского цементного завода. Все скважины для экспериментальных взрывов бурились одинакового размера диаметром 110 мм и глубиной 1,6 м. Скважины располагались на расстоянии 4...6 м друг от друга, на участке с визуально выявленным выходом ненарушенных предшествующими взрывами пород. Горные породы представлены известняками VIII категории крепости по СНиП. Скважины сухие, ВВ – аммонит АПВ высыпали из патронов диаметром 90 мм, формируя заряды массой по 1, 2, 3 или 5 кг в скважине. Во всех случаях в скважинах использовалась засыпная песчано-илистая забойка длиной около 1,4 м (12,8 диаметра скважины).

По данным расчетов были построены графики изменения силы натяжения. Графики распределения силы натяжения по времени полета пригруза при взрывах с массами зарядов ВВ 1, 2, 3 и 5 кг имеют одинаковый характер и в большей мере зависят от угла поворота шины. Рассмотрим на примере взрыва с зарядом массой заряда 3 кг.

Из графика (рис. 6, а) видно, что для жестких систем, в начале движения пригруза развиваются огромные силы натяжения, которые должны разорвать связи. Однако этого на практике не происходит, что объясняется упругостью как самих элементов пригруза, так и связей. Обвязка шин связями производится с зазором, сами связи имеют провисание, шины также обладают определенной упругостью. Поэтому в начале движения, при малых углах поворота шины, когда

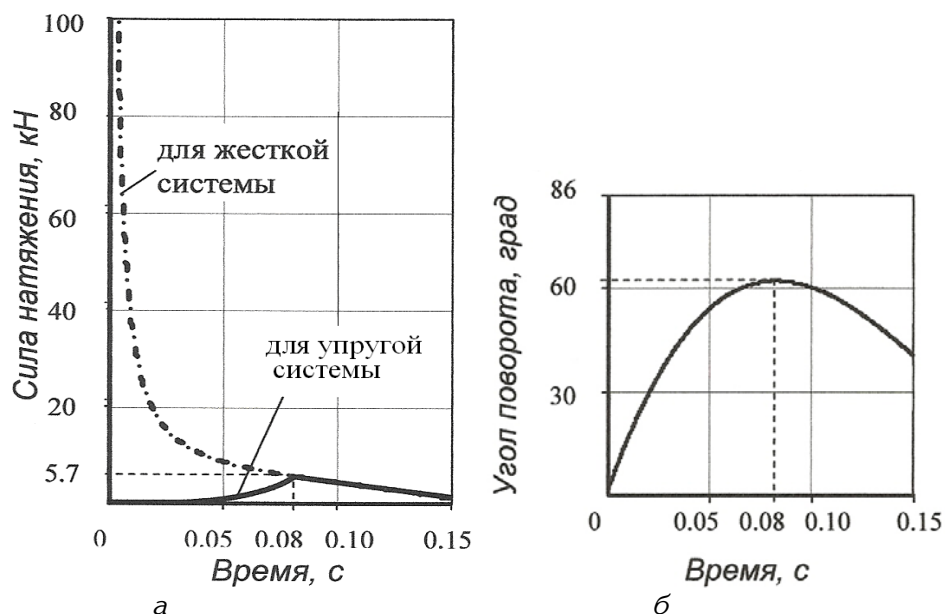


Рис. 6. Зависимость от времени t подброса автошины: а – силы натяжения F_n связи; б – угла поворота φ шины

должны возникать огромные силы натяжения, они не развиваются, поскольку связи еще не работают на полную нагрузку, а выбираются зазоры и провисания связей, деформируются шины и пр. и сила натяжения в связях нарастает плавно. И лишь после того, как шины повернутся на определенный наибольший угол φ (рис. 6, б), упругая система становится достаточно жесткой и связи нагружаются полностью, и далее сила натяжения изменяется как в же-

стой системе. Но при таком угле поворота силы натяжения уже достаточно малы и воспринимаются связями без разрывов.

Таким образом, применение в локализаторах взрыва связей, позволяющих пригрузу вначале подброса работать как упругой гибкой системе (за счет зазоров и провисаний связей), дает возможность избежать разрушающего воздействия ударного импульса от взрыва на соединительные элементы пригруза. ■■

Коротко об авторах

Лешинский А.В. – доцент, кандидат технических наук,
 Лукашевич Н.К. – старший преподаватель,
 Шевкун Е.Б. – профессор, доктор технических наук,
 Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007».
 Рецензент д-р техн. наук, проф. С.А. Гончаров.