



(06)-0121-1

ПАРАМЕТРИ ТА ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ОСОБЛИВИХ НАВАНТАЖЕНЬ УКІСНИХ ШАХТНИХ КОПРІВ ВІД ЗАЩЕМЛЕННЯ, СОСУДУ ЩО ПІДІЙМАЄТЬСЯ

В.М. Кущенко

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна 2,
86123, м. Макіївка, Україна.
E-mail: snpcsh@mail.ru*

Отримана 7 вересня 2006; прийнята 9 жовтня 2006

Анотація. В статті наведена методика і результати математичного моделювання особливих навантажень укісних шахтних копрів при защемленні посудини що піднімається в пружно-пластичній і в абсолютно жорсткій основі. Встановлені основні параметри особливих навантажень які є сумарним зусиллям і різницею зусиль натягнення гілок підйомного канату, а також інерційні навантаження від поперечних коливань конструкцій шахтних копрів. В результаті чисельних експериментів встановлені три групи факторів впливу на параметри особливих навантажень: умови аварійної ситуації; технічні характеристики підйомної машини динамічні характеристики конструкцій шахтних копрів. На основі виконаного факторного аналізу визначені умови з'явлення екстремальних значень особливих навантажень. Для шахтних підйомних машин в залежності від умов аварійної ситуації і технічних характеристик підйомних машин можливі аварійні ситуації двох видів: без розриву підйомного канату і з розривом підйомного канату. Для малих підйомних машин, на яких розрив підйомного канату не можливий, екстремим особливим навантаженням відповідає коефіцієнт динамічності по горизонтальній складовій головного вектора навантаження 1,5-1,53. Для інших підйомних машин для яких розрив підйомного канату можливий, відповідний коефіцієнт динамічності є 1-1,1.

Ключові слова: укісні шахтні копри; особливі навантаження; факторний аналіз; екстремальні значення навантажень.

ПАРАМЕТРЫ И ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЫХ НАГРУЗОК УКОСНЫХ ШАХТНЫХ КОПРОВ ОТ ЗАЩЕМЛЕНИЯ, ПОДНИМАЮЩЕГОСЯ СОСУДА

В.Н. Кущенко

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2,
86123, г. Макеевка, Украина.
E-mail: snpcsh@mail.ru*

Получена 7 сентября 2006; принята 9 октября 2006

Аннотация. В статье приведена методика и результаты математического моделирования особых нагрузок укосных шахтных копров при защемлении поднимающегося сосуда в упруго-пластическом и абсолютно жестком основании. Установлены основные параметры особых нагрузок, которыми являются суммарное усилие и разность усилий натяжения ветвей подъемного каната, а также инерционные нагрузки от поперечных колебаний конструкций шахтных копров. В результате численных экспериментов установлены три группы факторов влияния на параметры особых нагрузок: условия аварийной ситуации; технические характеристики подъемной машины; динамические характеристики конструкций шахтных копров. На основании выполненного факторного анализа определены условия появления экстремальных значений особых нагрузок. Для шахтных подъемных машин в зависимости от условий аварийной ситуации и технических характеристик подъемных машин возможны

аварийные ситуации двух видов: без разрыва подъёмного каната и с разрывом подъёмного каната. Для малых подъёмных машин, на которых разрыв подъёмного каната невозможен, экстренным особым нагрузкам соответствует коэффициент динамичности по горизонтальной составляющей главного вектора нагрузки 1,5-1,53. Для прочих подъёмных машин, для которых разрыв подъёмного каната возможен, соответствующий коэффициент динамичности составляет 1-1,1.

Ключевые слова: укосные шахтные копры; особые нагрузки; факторный анализ; экстремальные значения нагрузок.

PARAMETERS AND FACTOR ANALYSIS OF SPECIAL LOADS ON SLOPING HEAD FRAMES CAUSED BY A RISING VESSEL JAMMING

V.N. Kushenko

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzavin str. 2,
86123, Makeyevka, Ukraine.*

E-mail: snpcsh@mail.ru

Received 7 September 2006; accepted 9 October 2006

Abstract. There is represented a technique and results of mathematical modeling of special loads on sloping head frames at a rising vessel jamming in the elastic-plastic and absolutely rigid basis. There have been fixed main parameters of special loads among which a total force and a difference of tension forces of hoist rope strands, as well as inertial loads of transverse vibrations of head-frame structures. Numerical experiments resulted in three groups of factors effecting the parameters of special loads: emergency conditions; technical data on a mine hoist engine; dynamic characteristics of head-frame structures. The factor analysis made it possible to determine the conditions when extreme special loads occur. For mine hoists two kinds of emergency situations are possible depending on the emergency situation conditions and technical data of the hoists: with and without a hoist rope break. For small hoist engines, which cannot have a hoist rope break, a dynamical factor along a horizontal component of the main loading vector is 1.5-1.53 that corresponds to extreme special loads. For other hoist engines that can have a hoist rope break a corresponding dynamical factor is 1-1.1.

Keywords: sloping head frames, special loads, factor analysis, extreme load values.

Характеристика объекта исследования

Объектом исследования являются строительные конструкции укосных шахтных копров. Шахтные копры представляют собой пространственные стержневые системы (рис.1) и являются частью технологической системы шахтной подъёмной установки (ШПУ) (рис.2) [1,2]. Цель технологической системы ШПУ - осуществление транспортной коммуникации между горными выработками и шахтной поверхностью. Технологическая система ШПУ состоит из четырёх основных подсистем: I – «подъёмная машина»; II – «шахтный копёр»; III – «шахтный ствол»; IV – «устройства обеспечения безопасности». Между подсистемами ШПУ существуют прямые связи в виде целей и обрат-

ные связи в виде функциональных нагрузок (рис. 2).

Подсистемы «подъёмная машина» и «шахтный копёр» образуют механическую систему ШПУ, которая представляет собой объединение механизма (подъёмная машина) и геометрически неизменяемой механической системы (конструкции копра). Косвенно посредством подсистем «шахтный ствол» и «шахтный копёр» с технологической системой ШПУ связана система вентиляции горных выработок (рис. 2).

Связь конструкций шахтных копров с системами: шахтного транспорта; вентиляции горных выработок и предохранительной автоматики, - определяет их высокую ответственность и необходимость рассмотрения как объекта

обеспечения безопасности [3]. Одним из направлений обеспечения безопасности является уточнение методов аналитического описания нагрузок и расчётных схем сооружений.

Особые нагрузки от заземления поднимающегося сосуда являются основными при расчёте конструкций шахтных копров. В нормах [4, 5] расчётные значения указанных особых нагрузок определяются по условной схеме в виде статических эквивалентов усилий в ветвях подъёмного каната. При этом в заземлённой ветви усилие полагается равным разрывному усилию подъёмного каната, а в смежной ветви удвоенному значению рабочего натяжения. Основными недостатками указанного подхода являются отсутствие учёта влияния технических характеристик ШПУ и динамического характера особых нагрузок. Уточнение расчётных значений особых нагрузок возможно путём исследования динамических взаимодействий конструкций шахтного копра и механизма шахтной подъёмной установки как единой механической системы.

Задачи уточнения особых нагрузок от заземления, поднимающегося сосуда рассмотрены в работах [6-9], однако, несмотря на значи-

мость полученных в этих работах результатов, общий метод определения расчётных значений особых нагрузок в зависимости от технических характеристик подъёмных машин не был установлен. В ранее выполненных работах автора [10-11] изложены принципы математического моделирования особых нагрузок при заземлении сосуда в упругопластическом препятствии и приведены результаты предварительных численных экспериментов.

Цель работы

Целью данной работы является факторный анализ зависимости параметров особых нагрузок шахтных копров при заземлении поднимающегося сосуда от условий аварийной ситуации, технических характеристик ШПУ и динамических характеристик конструкций шахтных копров.

Методика выполнения работы

Поскольку проведение натурных экспериментов по моделированию особых нагрузок невозможно, исследование выполнялось методом

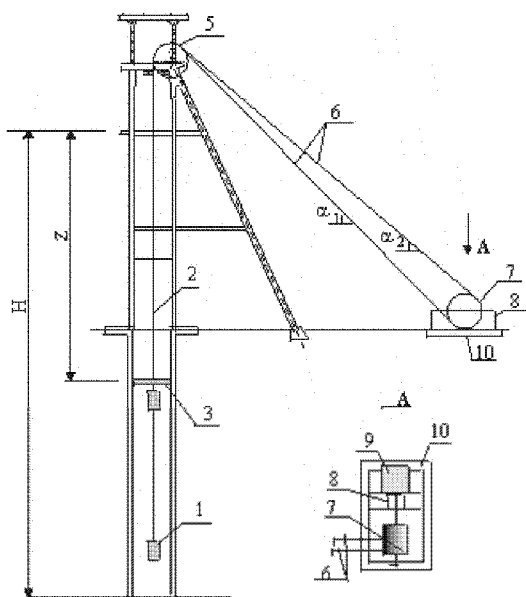


Рис. 1. Объект исследования – укосный шахтный копр в составе механической системы шахтной подъёмной установки.

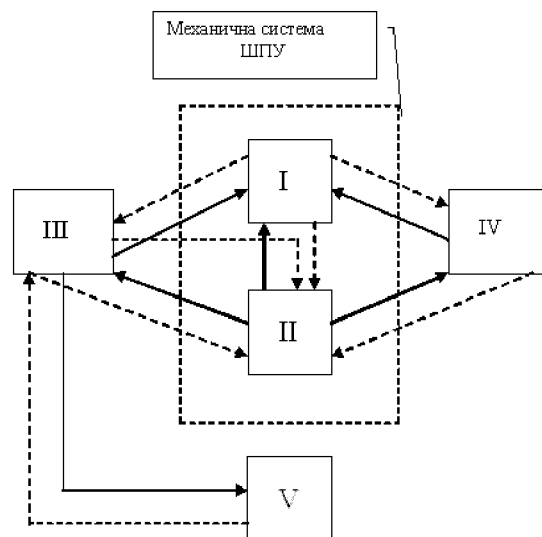


Рис. 2. Технологическая система шахтной подъёмной установки:

прямые связи – цели \longrightarrow
 обратные связи – нагрузки \dashrightarrow

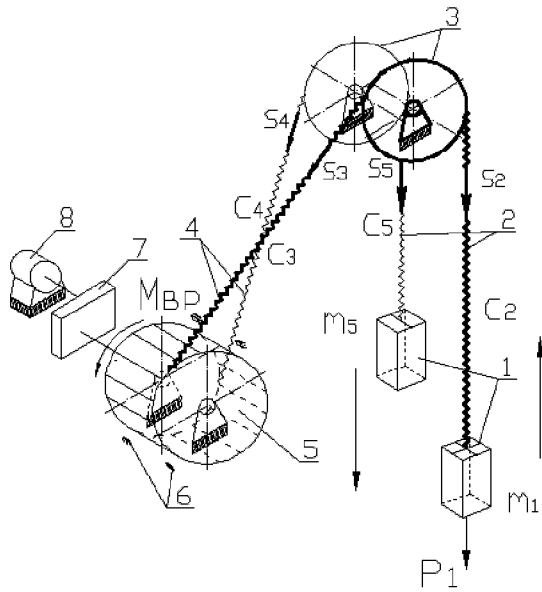


Рис. 3. Состав подсистемы «подъёмная машина»: 1 – подъёмные сосуды; 2 – ветви 3 – направляющие шкивы; 4 – струны подъёмного каната; 5 – барабан подъёмной машины; 6 – тормозная система; 7 – редуктор; 8 – двигатель.

математического моделирования [10-12]. Состав моделируемой механической системы представлен на рис. 3. Движение рассматриваемой механической системы (рис. 3) описывалось системами уравнений Лагранжа второго рода. При математическом моделировании рассматривались два варианта диаграмм сопротивления случайного препятствия: а) упруго-пластическая; б) абсолютно жёсткая. Например, для случая защемления поднимающегося сосуда в абсолютно жёстком препятствии (см. рис. 4) сценарий аварии описывается тремя системами уравнений, которые отражают характер качественных изменений механической системы. На первой стадии аварии (см. рис. 4,а), моделируется мгновенное превращение механизма движущейся подъёмной установки в геометрически неизменяемую систему. При защемлении приведенной массы m_1 в абсолютно жёстком основании, начальные условия соответствуют мгновенному приложению импульсов количества движения всех остальных вращающихся и поступательно движущихся масс системы (направляющих шкивов J_2, J_4 ; враща-

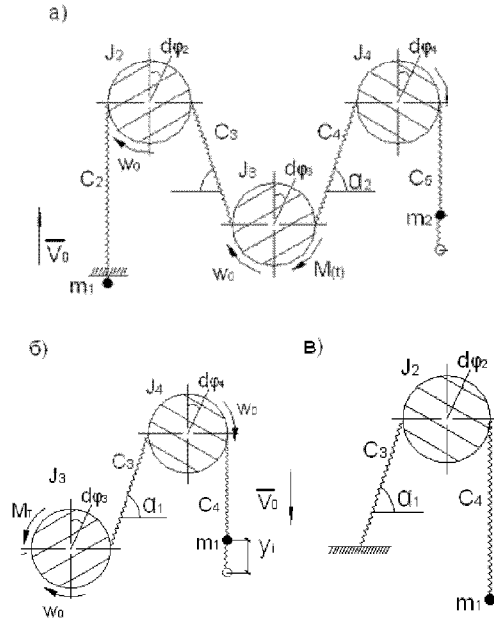


Рис. 4. Последовательность изменения расчётной схемы при защемлении поднимающегося сосуда в абсолютно жёстком препятствии: а) защемление поднимающегося сосуда; б) разрыв подъёмного каната и срабатывание системы аварийного торможения; в) остановка барабана.

ющихся масс подъёмной машины J_3 ; приведенной массы каната и сосуда смежной ветви m_3):

$$\left\{ \begin{aligned} & J_2 \frac{d\varphi_2^2}{dt^2} + c_2 \varphi_2 R_2^2 - c_3 (\varphi_3 R_3 - \varphi_2 R_2) R_2 - \\ & - k \frac{d\varphi_2}{dt} R_2 = 0; \\ & J_3 \frac{d\varphi_3^2}{dt^2} + c_3 (\varphi_3 R_3 - \varphi_2 R_2) R_3 - c_4 (\varphi_4 R_4 - \varphi_3 R_3) \times \\ & \times R_3 - k \frac{d\varphi_3}{dt} R_3 = -\dot{I} (t); \\ & J_4 \frac{d\varphi_4^2}{dt^2} + c_4 (\varphi_4 R_4 - \varphi_3 R_3) R_4 - c_5 (y_5 - \varphi_4 R_4) R_4 - \\ & - k \frac{d\varphi_4}{dt} R_4 = 0; \\ & m_5 \frac{dy_5^2}{dt^2} + c_5 (y_5 - \varphi_4 R_4) - k \frac{dy_5}{dt} = 0. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

При $t = 0$: $\varphi_{2...4} = 0$; $y_5 = 0$; $\frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{V_0}{R_2}$;

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = \frac{V_0}{R_3}; \quad \frac{d\varphi_4}{dt} = \frac{V_0}{R_4}; \quad \frac{dy_5}{dt} = V_0,$$

где: $M(t)$ – крутящий момент, передаваемый на барабан подъёмной машины от двигателя; $c_2 \dots c_4$ – жёсткость соответствующих участков ветвей подъёмного каната; k – коэффициент внутреннего трения; $\varphi_{2...4}$ – соответствующие углы поворота направляющих шкивов и барабана подъёмной машины; y_5 – линейное перемещение сосуда на смежной ветви; R_2, R_3 – радиусы направляющих шкивов; R_4 – радиус барабана подъёмной машины; V_0 – скорость движения подъёмной машины в момент заземления подъёмного сосуда. После преобразований система дифференциальных уравнений (1) приводится к следующему виду:

$$\begin{cases} m_2 y_2'' + (c_2 + c_3) y_2 - c_3 y_3 - k y_2' = 0; \\ m_3 y_3'' - c_3 y_2 + (c_3 + c_4) y_3 - c_4 y_4 - k y_3' = -\frac{M(t)}{R_3}; \\ m_4 y_4'' - c_4 y_3 + (c_4 + c_5) y_4 - c_5 y_5 - k y_4' = 0; \\ m_5 y_5'' - c_5 y_4 + c_5 y_5 - k y_5' = 0. \end{cases} \quad (2)$$

При $t=0$: $y_{2...5} = 0$; $\frac{dy_2}{dt} = V_0$; $\frac{dy_3}{dt} = V_0$; $\frac{dy_4}{dt} = V_0$;

$$\frac{dy_5}{dt} = V_0.$$

В момент времени $t=t_1$, соответствующий достижению усилия в заземлённой ветви подъёмного каната значения удвоенного статического натяжения, срабатывает предохранительная автоматика и система аварийного торможения, это событие отображается следующим изменением системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_2 y_2'' + (c_2 + c_3) y_2 - c_3 y_3 - k y_2' = 0; \\ m_3 y_3'' - c_3 y_2 + (c_3 + c_4) y_3 - c_4 y_4 - k y_3' = \\ = M_{T0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{T_T}} \right) / R_3; \\ m_4 y_4'' - c_4 y_3 + (c_4 + c_5) y_4 - c_5 y_5 - k y_4' = 0; \\ m_5 y_5'' - c_5 y_4 + c_5 y_5 - k y_5' = 0. \end{cases} \quad (3)$$

При начальных условиях: $t=t_1$; $y_2 = y_2(t_1)$; $y_3 = y_3(t_1)$; $y_4 = y_4(t_1)$; $y_5 = y_5(t_1)$; $y_2' = y_2'(t_1)$; $y_3' = y_3'(t_1)$; $y_4' = y_4'(t_1)$; $y_5' = y_5'(t_1)$; $y_2'' = y_2''(t_1)$; $y_3'' = y_3''(t_1)$; $y_4'' = y_4''(t_1)$; $y_5'' = y_5''(t_1)$, - которые получены из решений системы дифференциальных уравнений (2).

В момент времени $t=t_2$, который соответствует моменту разрыва подъёмного каната, механическая система мгновенно изменяется (см. рис. 4,б), и её дальнейшее движение описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_3 y_3'' - c_4 y_3 + c_4 y_4 - k y_3' = \\ = M_{T0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_2}{T_T}} \right) / R_3; \\ m_4 y_4'' - c_4 y_3 + (c_4 + c_5) y_4 - c_5 y_5 - k y_4' = 0; \\ m_5 y_5'' - c_5 y_4 + c_5 y_5 - k y_5' = 0. \end{cases} \quad (4)$$

При начальных условиях: $t=t_2$; $y_3 = y_3(t_2)$; $y_4 = y_4(t_2)$; $y_5 = y_5(t_2)$; $y_3' = y_3'(t_2)$; $y_4' = y_4'(t_2)$; $y_5' = y_5'(t_2)$; $y_3'' = y_3''(t_2)$; $y_4'' = y_4''(t_2)$; $y_5'' = y_5''(t_2)$, - которые получены из решений системы дифференциальных уравнений (3).

В момент времени $t=t_3$ кинетическая энергия вращающихся масс подъёмной машины полностью поглощается работой сил трения при торможении подъёмной машины, и барабан останавливается, после этого движение механической системы, состоящей из смежной ветви направляющего шкива и подъёмного сосуда (см. рис. 4,в), описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_4 y_4'' + (c_4 + c_5) y_4 - c_5 y_5 - k y_4' = 0; \\ m_5 y_5'' - c_5 y_4 + c_5 y_5 - k y_5' = 0. \end{cases} \quad (5)$$

При начальных условиях: $t=t_3$; $y_4 = y_4(t_3)$; $y_5 = y_5(t_3)$; $y_4' = y_4'(t_3)$; $y_5' = y_5'(t_3)$; $y_4'' = y_4''(t_3)$; $y_5'' = y_5''(t_3)$, - которые получены из решений системы уравнений (4).

Для получения аналитического решения систем неоднородных дифференциальных уравнений (1-5) использовался метод разложения решения по собственным формам колебаний при сохранении заданного вида возмущающих сил. После определения собственных

частот системы и коэффициентов форм определялись функции движения масс системы. По перемещениям масс системы определялись переменные во времени усилия в ветвях подъёмного каната перед шкивами и в струнах. Затем определялись равнодействующие от натяжения ветвей подъёмного каната на направляющих шкивах. Равнодействующие от натяжения ветвей подъёмного каната приводились к главному вектору нагрузки и моментам приведения. Расчётная схема подсистемы «конструкции шахтного копра» представляет собой геометрически неизменяемую механическую систему, состоящую из двух приведенных сосредоточенных масс, объединённых упругими связями, которая по динамическим характеристикам эквивалентна пространственной стержневой системе сооружения.

Математическая модель рассматриваемой механической системы реализована в виде вы-

числительной программы, состоящей из двух подпрограмм в среде программного комплекса «Mathcad-11» (рис. 5). Графическая интерпретация характерных результатов математического моделирования особых нагрузок от разрыва подъёмного каната приведена на рис. 6. Приведенные на рис. 6 результаты демонстрируют динамический характер нагрузки от натяжения подъёмного каната. Нагрузка имеет повторно импульсивный характер и состоит из двух синусоидальных импульсов, продолжительность первого импульса составляет 0,64 с, второго – 0,85 с. Общая продолжительность нагрузки составляет 0,96 с. Поскольку аварийное торможение началось через 0,8 сек, связанная с ним диссипация кинетической энергии подъёмной машины не оказала существенного влияния на амплитудное значение нагрузки. Вследствие влияния масс направляющих шкивов усилие в отвесах и струнах ветвей подъёмного каната

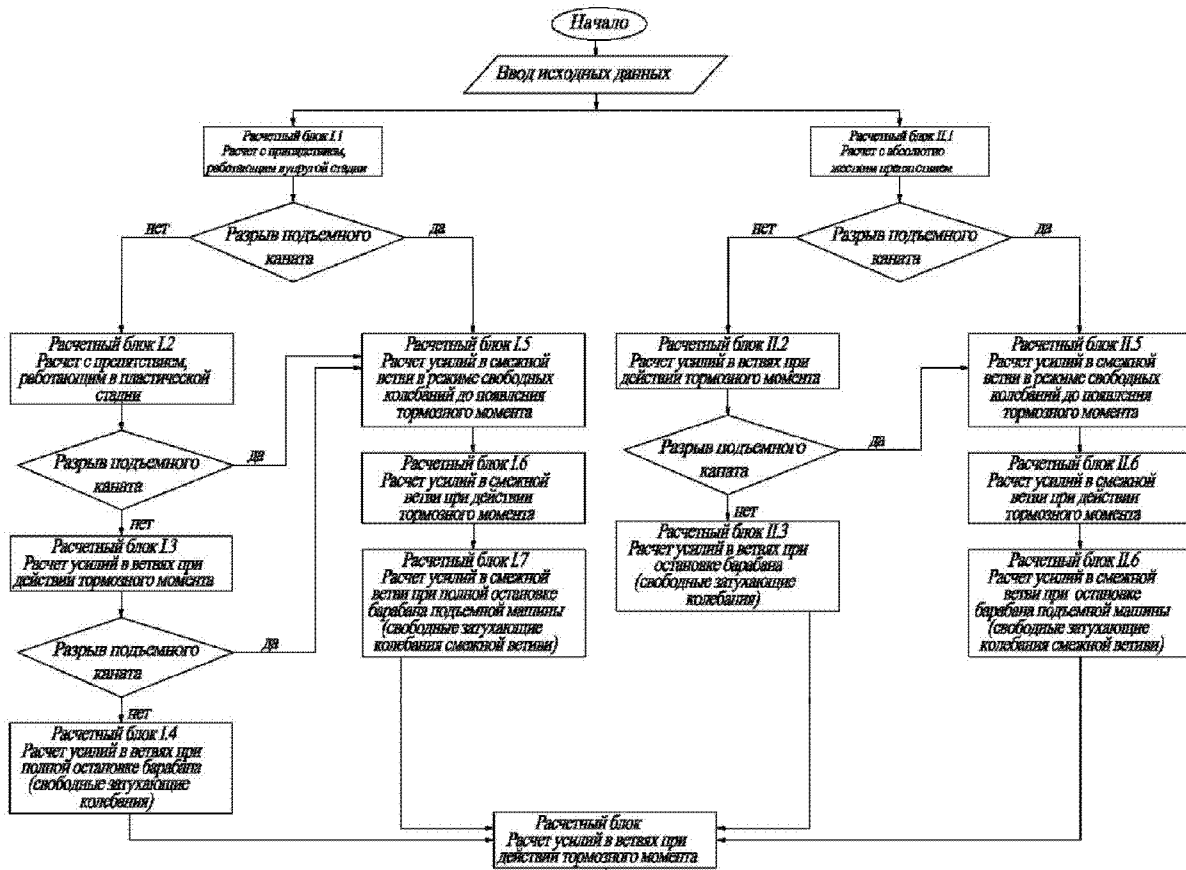


Рис. 5. Блок-схема вычислительной программы для определения параметров движения масс подъёмной машины и определения усилий в ветвях подъёмного каната.

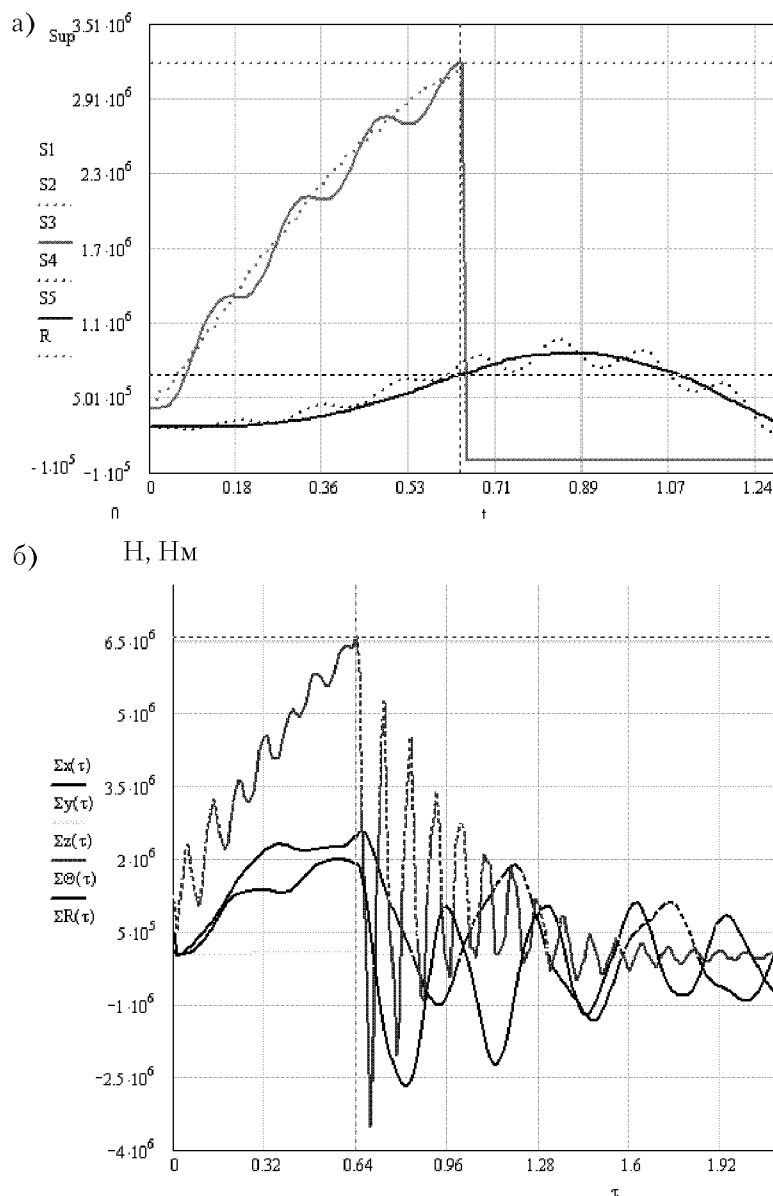


Рис. 6. Характерные результаты математического моделирования защемления поднимающегося сосуда в шахтном стволе: а) усилия в подъемных канатах; б) особая нагрузка с учётом действия сил инерции.

несколько отличаются на 5-10%, что вызывает в данном случае изменение углов наклона равнодействующих от натяжения подъемных канатов на 2° .

Параметры особых нагрузок

Особые нагрузки от защемления подъемного сосуда включают: 1) переменные во времени равнодействующие от натяжения подъемных канатов (рис. 6,а); 2) силы инерции, действующие на массы сооружения в процессе импуль-

сивного нагружения (рис. 6,б). Переменные во времени равнодействующие от натяжения подъемных канатов представляют собой суммарную нагрузку: 1) от предшествующего аварии нормального режима эксплуатации (статическая составляющая) и 2) от защемления поднимающегося сосуда (динамическая составляющая).

Основными параметрами особых нагрузок от натяжения подъемных канатов являются: переменные во времени сумма и разность усилий натяжения ветвей подъемного каната, которые

определяют величину главного вектора особой нагрузки и моментов приведения (рис. 7):

$$\begin{aligned}
 R(t) &= [S_p(t) + S_{\tilde{m}}(t)] \sqrt{\sin^2 \gamma_a + (1 + \cos^2 \gamma_i)} = \\
 &= \Sigma S(t) \sqrt{\sin^2 \gamma_a + (1 + \cos^2 \gamma_i)}; \\
 M_{xy}(t) &= 0,5b_o [S_p(t) - S_{\tilde{m}}(t)] \sin \gamma_a = \\
 &= 0,5b_o \Delta S \sin \gamma_a; \\
 M_{zx}(t) &= 0,5b_o [S_p(t) - S_{\tilde{m}}(t)] (1 + \cos \gamma_i) = \\
 &= 0,5b_o \Delta S (1 + \cos \gamma_i), \quad (6)
 \end{aligned}$$

где: $S_p(t) = S_2(t)$ – усилие в защемлённой ветви; $S_{cm}(t) = S_5(t)$ – усилие в смежной ветви; γ_o – угол наклона струны верхнего каната к вертикали; γ_u – то же для нижнего каната; b_u – расстояние между осями направляющих шкивов; $\Sigma S(t)$ – сумма усилий натяжения защемлённой и смежной ветвей; $\Delta S(t)$ – разность усилий натяжения защемлённой и смежной ветвей.

Переменные во времени составляющие векторов сил инерции $I_x(t), I_y(t), I_z(t), M(t)_{xyi}, M(t)_{zyi}$ зависят от характера изменения во времени усилий натяжения ветвей подъёмного каната и динамических характеристик строительных конструкций шахтного копра. Таким образом, третьим параметром особых нагрузок является длительность действия импульса главного вектора и его форма.

Обобщённая особая нагрузка на конструкции шахтного копра с учётом инерционных составляющих определяется по следующим формулам:

$$R_{zod} = \sqrt{(R^2(t) + I_x^2(t) + I_z^2(t))}; \quad (7)$$

$$M_{xyo}(t) = M_{xy}(t) + M_{xyi}; \quad (8)$$

$$M_{zyo}(t) = M_{zy}(t) + M_{zyi}, \quad (9)$$

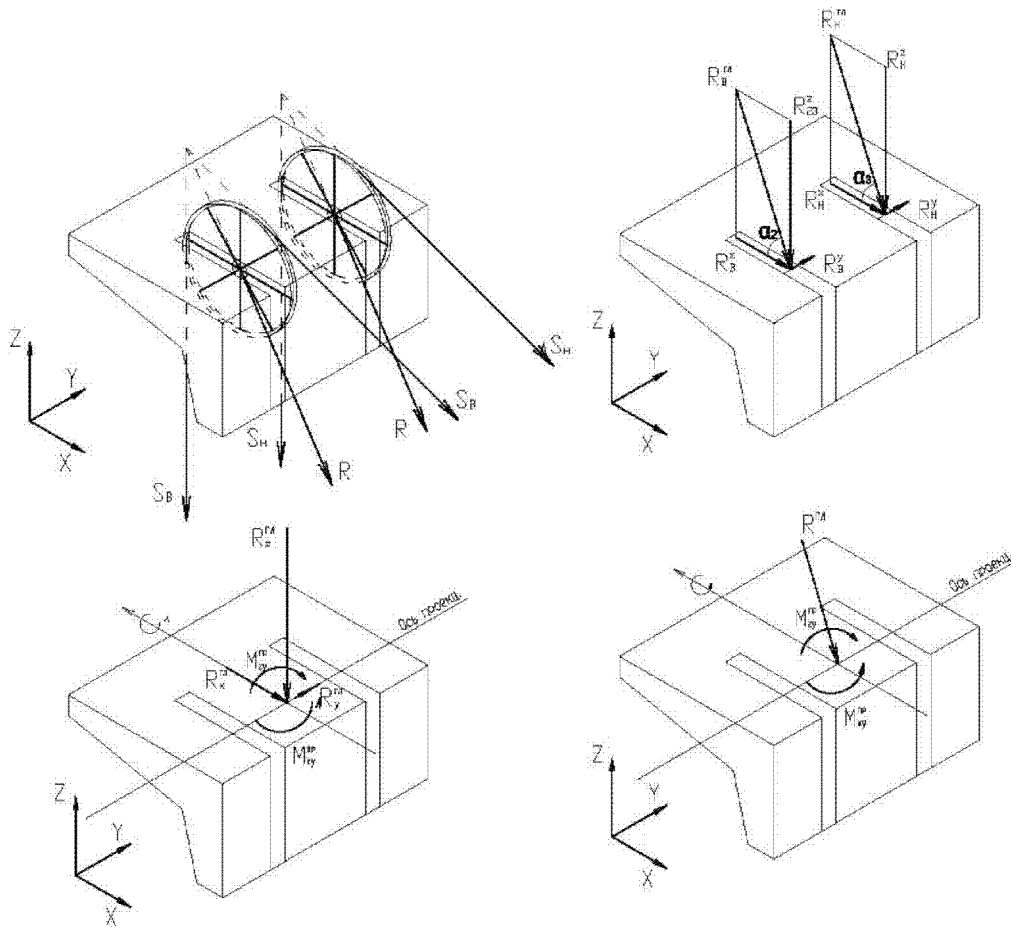


Рис. 7. Схема приведения нагрузок от натяжения подъёмных канатов к главному вектору особой нагрузки.

где: $R_{зад}$ — значение главного вектора особой нагрузки; $M_{xy\partial}(t)$, $M_{xz\partial}(t)$ — моменты приведения главного вектора особой нагрузки соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскости; $I_x(t)$, $I_z(t)$ — соответственно горизонтальная и вертикальная составляющая инерционной нагрузки.

Факторы влияния параметров особых нагрузок

В результате предварительных численных экспериментов установлены три качественно различных группы факторов влияния на параметры особых нагрузок конструкций шахтных копров [10-12]: 1) факторы условий аварийной ситуации; 2) факторы технических характеристик шахтной подъёмной установки; 3) факторы динамических свойств конструкций шахтных копров. Согласно данным [13, 14] основными причинами внезапной остановки поднимающегося сосуда являются: нарушение прямолинейности жёстких проводников; разрушение узлов крепления проводников к элементам армировки шахтного ствола; попадание в поднимаемый сосуд негабаритного элемента (например, крепи горных выработок). При различных условиях заземления поднимающегося сосуда в конструкциях армировки ствола, возможный диапазон жёсткости случайного препятствия составляет 5000-100000 кН/м; прочности — 100-1500 кН [12]. При заземлении поднимающегося сосуда в железобетонных конструкциях крепи ствола (при аварийном схождении проводников) случайное препятствие можно полагать абсолютно жёстким с прочностью значительно превышающей усилие разрыва подъёмного каната.

Факторы технических характеристик подъёмных машин барабанного типа образуют группы технологически совместимых сочетаний, которые определяются областью применения машин с различными типоразмерами [2]. В общем случае, на параметры особых нагрузок шахтных копров влияют следующие технические характеристики подъёмных машин: моменты инерции и массы подвижных частей подъёмной машины; скорость и тахограмма подъёма; высота подъёма; максимальное статическое натяжение и разность статических на-

тяжения ветвей подъёмного каната; диаметр и усилие разрыва подъёмного каната. Факторы влияния подъёмной машины, можно представить в виде обобщённой характеристики — импульс количества движения. Импульс количества движения подъёмной машины представляет собой произведение номинальной скорости движения на приведенную массу всех вращающихся частей подъёмной машины и для подъёмных машин составляет $6 \cdot 10^4 - 1,6 \cdot 10^6$ кг·м/с.

Максимальное усилие в заземлённой ветви ограничено разрывным усилием подъёмного каната и в среднем определяет 80-90% амплитуды суммарного натяжения ветвей подъёмного каната при особых нагрузках. В качестве основной расчётной характеристики прочности каната для целей определения особых нагрузок особых нагрузок копров принято суммарное разрывное усилие всех проволок P_c .

Факторы динамических характеристик конструкций шахтных копров включают: собственные частоты колебаний; значение логарифмического декремента затухания. В результате натуральных динамических испытаний установлено, что для конструкций копров характерны следующие виды колебаний: поперечные в горизонтальном направлении по двум взаимно ортогональным направлениям; продольные колебания в вертикальном направлении [12]. Частота собственных колебаний в горизонтальной плоскости, в низкочастотной части спектра собственных частот, который для укосных копров всех систем составляет от 2 до 3 Гц. При увеличении высоты шахтных копров спектр значимых частот собственных колебаний изменяется только с высокочастотной стороны и монотонно возрастает с 3-4 Гц до 7 Гц. Логарифмический декремент затухания составляет 0,28-0,3 [12].

Для установления характера влияния факторов на параметры особых нагрузок выполнен численный эксперимент. В процессе эксперимента для характерных типоразмеров подъёмных машин варьировались три фактора: прочность препятствия; скорость движения подъёмной машины, положение аварии по высоте подъёма и прочностные характеристики моделируемого случайного препятствия. Скорость подъёма варьировалась в пределах от 25 до 100% от номинального значения. Положение аварии

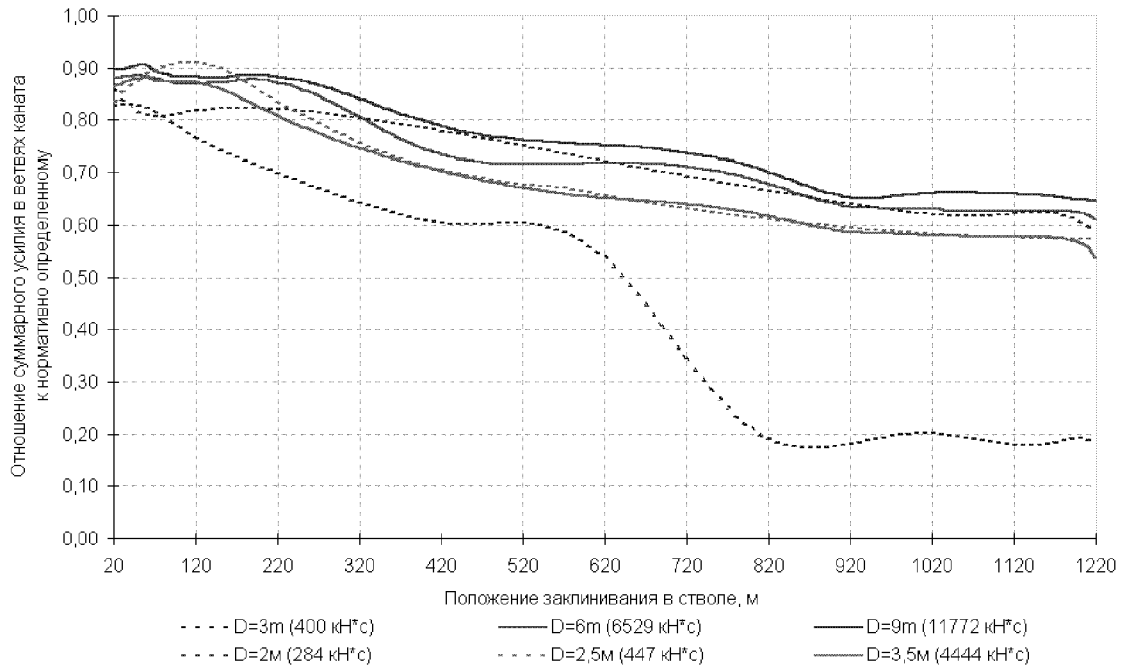


Рис. 8. Зависимость отношения расчётного суммарного амплитудного значения в ветвях каната к нормативно определённом значению от типа подъемной машины (импульса количества движения) и положения аварии в стволе.

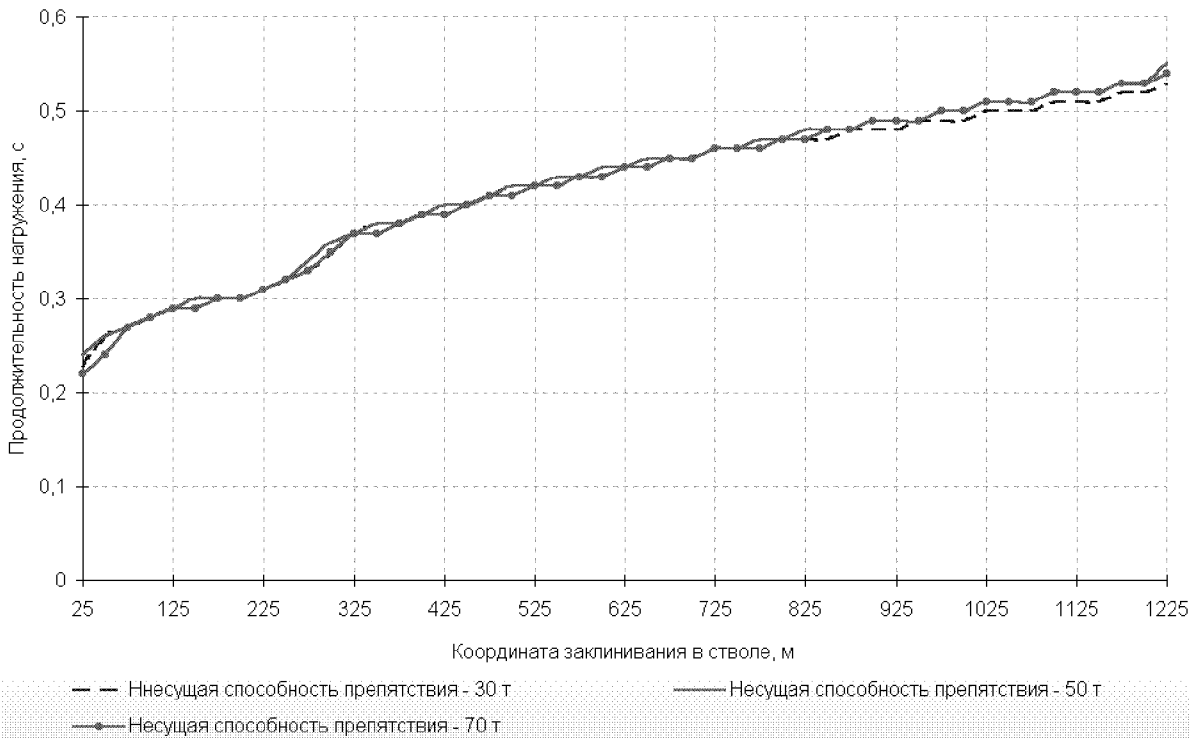


Рис. 9. Зависимость времени достижения амплитудного значения усилия в заземленной ветви от координаты заклинивания в стволе при различных прочностных характеристиках препятствия.

по высоте ствола варьировалось в пределах максимальной высоты подъёма с шагом 50 м.

На рис. 8 приведены графики характерных зависимостей амплитуды суммарного усилия в ветвях подъёмного каната для различных типоразмеров подъёмных машин от прочностных характеристик случайного препятствия в шахтном стволе. В соответствии с приведенными данными амплитуда усилия в заземлённой ветви, как правило, в 1,8-1,9 раз превышает обобщённое усилие разрушения препятствия. При увеличении жёсткости и прочности препятствия амплитуда суммарных усилий в ветвях подъёмного каната монотонно возрастает и достигает максимального значения при заземлении в абсолютно жёстком основании. Продолжительность достижения амплитудных значений особых нагрузок составляет, 0,2...0,55 с.

В соответствии с графиками, приведенными на рис. 9, продолжительность возрастания усилия до амплитудного значения в заземлённой ветви подъёмного каната практически не зависит от жёсткости и прочности случайного препятствия.

На рис. 10 представлены результаты исследования зависимости амплитуды суммарного

усилия в ветвях подъёмного каната от скорости подъёма и положения аварии по высоте ствола для подъёмной машины ШМП 1-6.3-6.0 при заземлении поднимающегося сосуда в абсолютно жёстком основании. Представленные графики демонстрируют возможность двух качественно различных сценариев аварии: 1) без разрыва подъёмного каната (графики 1, 2, 3) при скорости подъёма 2-6 м/сек; 2) с разрывом подъёмного каната (графики 4, 5, 6, 7) при скорости подъёма 8-14 м/сек. Для сценариев аварий первого типа (без разрыва подъёмного каната) максимальные значения суммарных амплитуд натяжения ветвей каната наблюдаются в верхней части шахтного ствола в момент, предшествующий торможению подъёмной машины. В случае возможности разрыва подъёмного каната графики максимальных значений суммарных амплитуд усилий в подъёмных канатах имеют вид выпуклых кривых с точкой абсолютного максимума, который соответствует экстремальным значениям усилий в ветвях подъёмного каната.

Для характерных типоразмеров шахтных подъёмных машин применительно к клетевым и скиповым подъёмным установкам был выполнен численный эксперимент с целью выявления

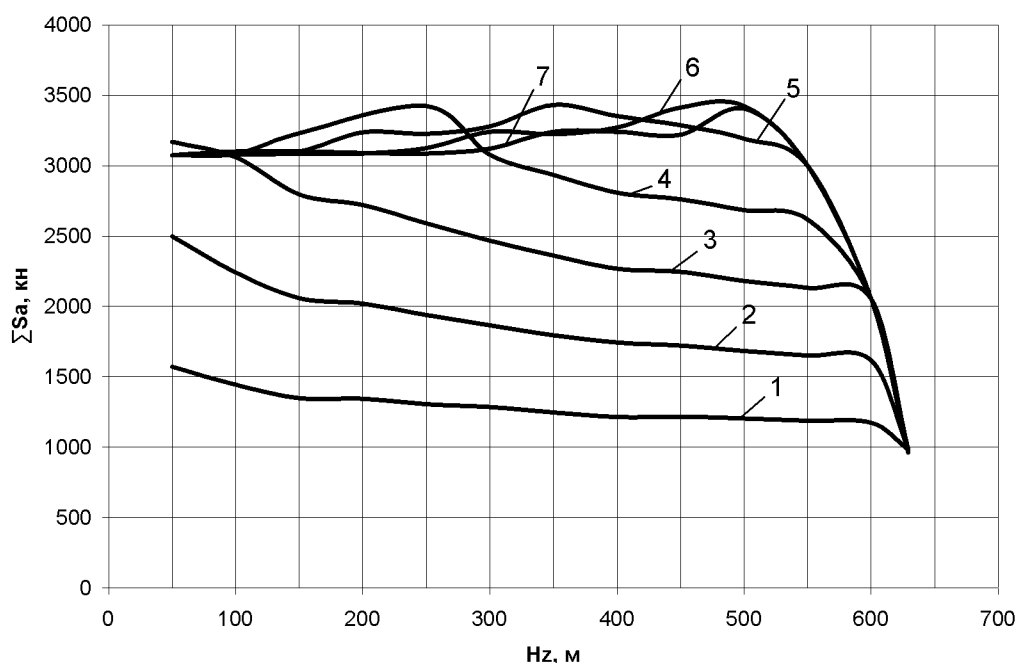


Рис. 10. Зависимости амплитудного значения суммарного натяжения ветвей подъёмного каната от местоположения аварии в шахтном стволе при различных значениях скорости подъёма: 1 — 2 м/с; 2 — 4 м/с; 3 — 6 м/с; 4 — 8 м/с; 5 — 10 м/с; 6 — 12 м/с; 7 — 14 м/с.

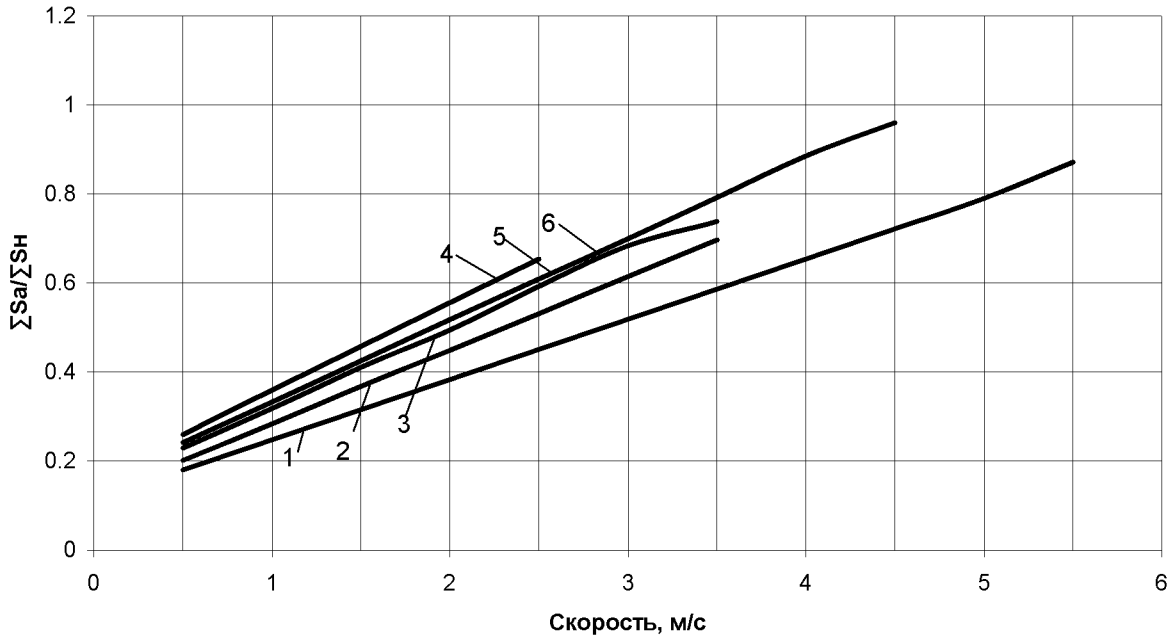


Рис. 11. Зависимость отношений значений максимальных амплитуд суммарного натяжения ветвей подъемного каната к нормативному значению амплитуды для малых однобарабанных подъемных машин клетового подъема: 1 – БМ-3000/2011 (1500м); 2 – БМ-2500/20302 (1500м); 3 – БМ-2000/1500 (1060м); 4 – БМ-2000/1500 (460м); 5 – БМ-2500/20302 (700м); 6 – БМ-3000/2011 (600м).

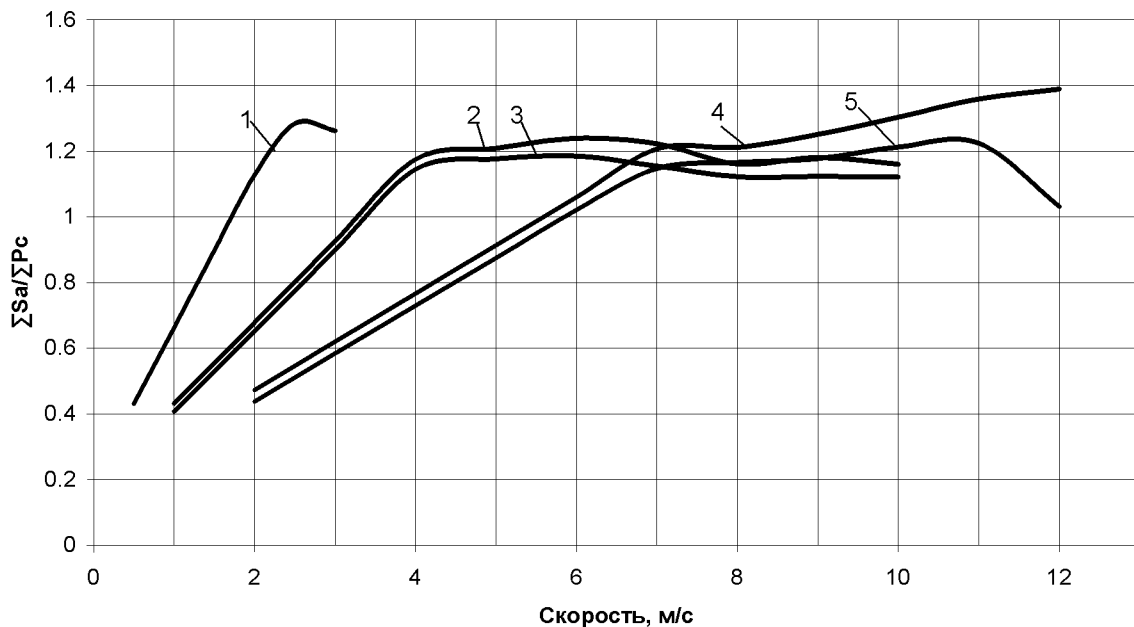


Рис. 12. Зависимость отношений экстремальных значений амплитуд суммарного натяжения ветвей к суммарному разрывному усилию проволок подъемного каната от скорости подъема для машин клетового подъема с двумя цилиндрическими барабанами: 1 – 2Ц-1,2х0,8 (200м); 2 – 2Ц-3,5х1,7 (550м); 3 – 2Ц-3,5х1,7 (750м); 4 – 2Ц-6х2,4 (850м); 5 – 2Ц-6х2,4 (850м).

характера влияния их технических характеристик на значения экстремальных усилий натяжения ветвей подъёмного каната при заземлении поднимающегося сосуда в абсолютно жёстком основании в различных точках по высоте подъёма (рис. 11, 12).

В соответствии с приведенными результатами при номинальных скоростях движения, для малых однобарабанных машин с диаметром барабана до 2,5 м (рис. 11) характерны сценарии аварий первого типа (без разрыва подъёмного каната). Для аварий первого типа характерна практически линейная зависимость экстремальных усилий от скорости подъёма (рис. 11). При этом сумма экстремальных усилий в ветвях подъёмного каната в зависимости от скорости и типоразмера подъёмной машины составляет 40-90% от нормативного значения. Для прочих подъёмных машин (рис. 12) характерны сценарии первого типа при скорости подъёма составляющей 40-50% от номинального значения, а также аварии второго типа (с разрывом подъёмного каната) при скорости движения подъёмной машины 50-100% от номинального значения.

На рисунках 13, 14 приведены экспериментальные точки значений максимальных ампли-

туд усилий суммарного натяжения ветвей подъёмного каната относительно импульса количества движения подъёмных машин. В случае возможности разрыва подъёмного каната (см. рис. 14), наблюдается группировка отношений максимумов амплитудных значений к разрывному усилию подъёмного каната около средних значений: для клетевых подъёмных установок – 1,25 (верхняя граница – 1,4, нижняя – 1,1); для скиповых подъёмных установок – 1,18 (верхняя граница – 1,26, нижняя – 1,1).

Для определения степени влияния сил инерции на значения особых нагрузок шахтных копров был проведен численный эксперимент, в результате которого производилось определение коэффициентов динамичности по перемещениям конструкций шахтных копров при заземлении поднимающегося сосуда для характерных типоразмеров подъёмных машин и конструкций шахтных копров (табл. 1). Существенные значения коэффициентов динамичности наблюдаются при аварийных ситуациях первого типа (без разрыва подъёмного каната). Максимальные значения коэффициентов динамичности 1,5-1,53 соответствуют горизонтальным перемещениям конструкций шахтных копров в направлении горизонтальных составляющих

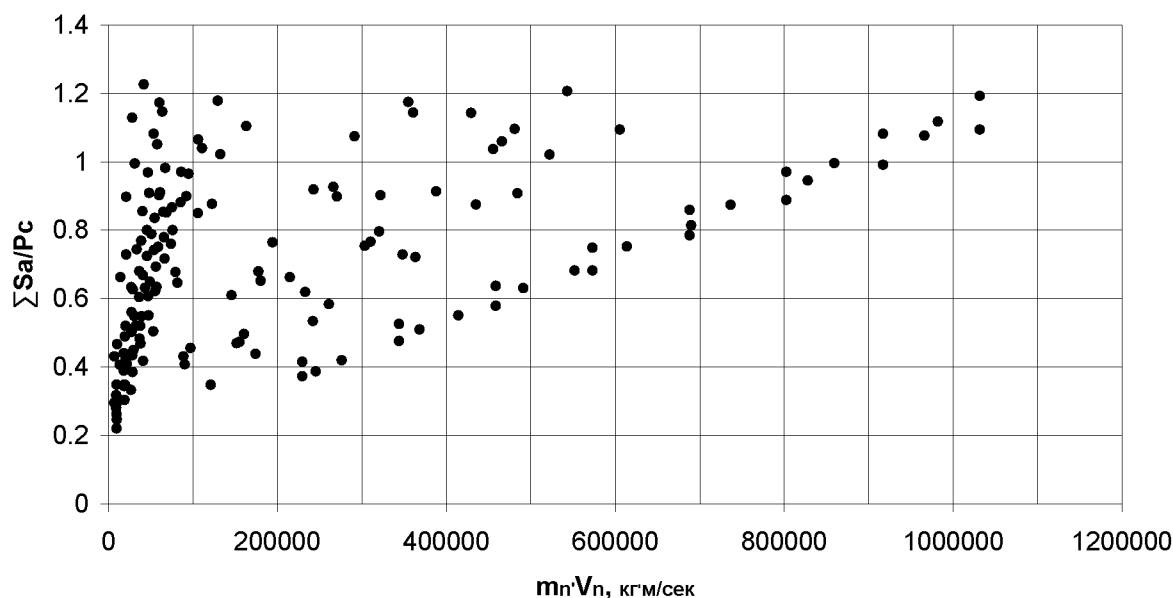


Рис. 13. Экспериментальные точки отношений экстремальных значений амплитуд суммарного натяжения ветвей к разрывному усилию каната при отсутствии разрыва подъёмного каната (малые подъёмные машины).

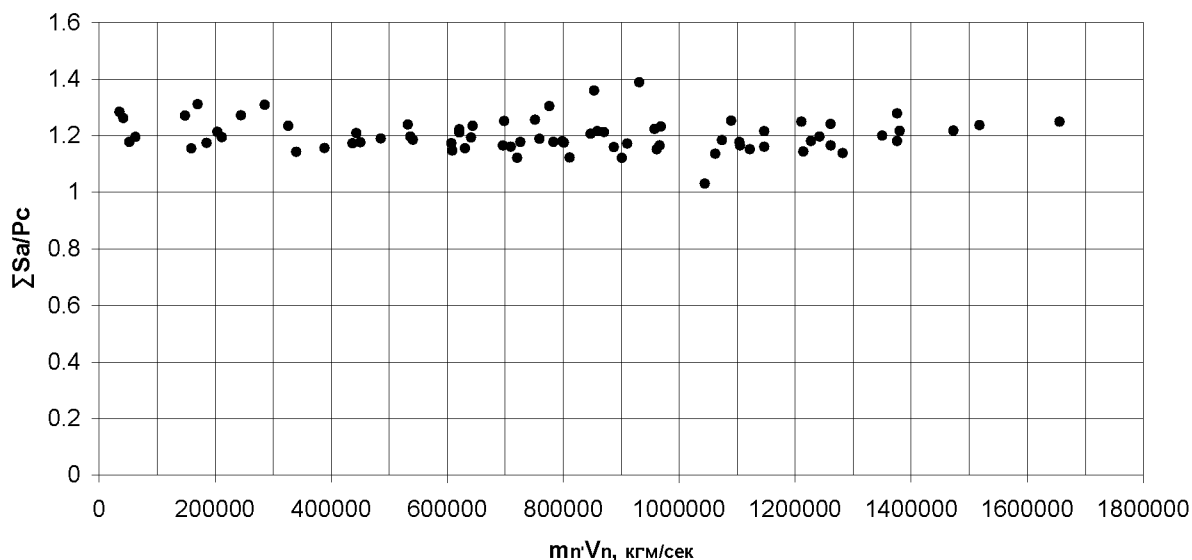


Рис. 14. Экспериментальные точки отношений экстремальных значений амплитуд суммарного натяжения ветвей к разрывному усилию каната при возможности разрыва подъемного каната (крупные подъемные машины).

равнодействующих от натяжения ветвей подъемного каната. Для второго типа аварийных ситуаций (с разрывом подъемного каната) при экстремальных особых нагрузках максимальные значения коэффициентов динамичности по перемещениям составляют 1-1,1.

Выводы

1. Основными параметрами особых нагрузок от внезапного защемления поднимающегося сосуда являются: сумма и разность натяжения ветвей подъемного каната; силы инерции, действующие на массы сооружения при импульсивном изменении усилий в ветвях подъемного каната.
2. Параметры особых нагрузок зависят от трёх групп факторов: а) условий аварийной ситуации; б) технических характеристик подъемных установок; в) динамических характеристик конструкций укосных шахтных копров.
3. Экстремальные усилия натяжения ветвей подъемного каната соответствуют защемлению поднимающегося сосуда в абсолютно жёстком основании.
4. Скорость приложения особой нагрузки практически не зависит от жёсткости и прочности препятствия.
5. Аварийное торможение подъемной машины на расчётные параметры особых нагрузок от защемления поднимающегося сосуда существенно не влияет.
6. Поскольку параметры механической системы шахтной подъемной установки являются детерминированными, основным источником неопределённости условий аварийной ситуации являются механические свойства случайного препятствия в шахтном стволе.
7. При абсолютно жёстком случайном препятствии значимыми факторами аварийной ситуации являются скорость подъёма, положение и аварии по высоте шахтного ствола.
8. Возможны два типа сценариев аварий при защемлении поднимающегося сосуда в абсолютно жёстком основании: 1) сценарии первого типа без разрыва подъемного каната; 2) сценарии второго типа с разрывом подъемного каната.
9. Для малых подъемных машин с диаметром барабана до 2,5м характерны сценарии аварий первого типа без разрыва подъемного каната. В этом случае для скиповых подъемных установок необходимо учитывать возможность разрыва подъемного каната в результате зависания подъемного сосуда.

Таблица 1. Значения коэффициентов динамичности по направлениям динамических степеней свободы

Типоразмер подъёмной машины	V, м/сек	Коэффициенты динамичности по перемещениям				
		K _{ox}	K _{oy}	K _{oz}	K _{oθ}	K _{oR}
Разрыв подъёмного каната						
БМ2500-20302 (клетевые)	1-3	1,4-1,5	1,5-1,6	1,1-1,15	1,2-1,24	1,14-1,2
2БМ2500-1220 (клетевые)	1-3	1,5-1,53	1,55-1,6	1,21-1,23	1,23-1,27	1,16-1,25
Ц - 3x2.2 (клетевые)	1-8	1,3-1,5	1,4-1,6	1,2	1,22-1,45	1,15-1,2
2Ц-3.5x1.7 (клетевые)	1-6	1,23-1,5	1,3-1,6	1,2	1,2-1,4	1,15-1,2
ШПУ 6.5 (клетевые)	2-6	1,36	1,5	1,05-1,1	1,1-1,17	1,1-1,15
Разрыв подъёмного каната возможен						
2Ц-3.5x1.7 (скиповые)	8-10	1-1,1	1-1,2	1,02	1,02-1,05	1,06-1,1
ШПУ 6.5 (клетевые)	8	1,2	1,45	1,03	1,07	1,1
ШПУ 6.5 (скиповые)	10-14	1-1,12	1-1,1	1	1,04-1,1	1-1,02

10. Для малых подъёмных машин с диаметром барабана более 2,5м, а также для крупных подъёмных машин в зависимости от скорости подъёма возможны аварии первого и второго типа. Предельные значения отношения экстремальных амплитуд суммарного натяжения подъёмных канатов к разрывному усилию составляют для клетевых подъёмных установок $\Sigma S/P_c = 1,3$; для скиповых — $\Sigma S/P_c = 1,2$.
11. Существенные значения коэффициентов динамичности наблюдаются при аварийных ситуациях первого типа (без разрыва подъёмного каната). Максимальные значения коэффициентов динамичности 1,5-1,53 соответствуют горизонтальным перемещениям конструкций шахтных копров в направлении горизонтальных составляющих

равнодействующих от натяжения ветвей подъёмного каната.

12. Для подъёмных машин, для которых возможны аварийные ситуации второго типа (с разрывом подъёмного каната), при экстремальных особых нагрузках максимальные значения коэффициентов динамичности по перемещениям составляют 1-1,1.

Литература

1. Бровман Я.В. Надшахтные копры. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 239с.
2. Федоров М. М. Шахтные подъёмные установки. — М.: Недра, 1979. — 309 с.
3. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.
4. РД 12.005-94. Металлические конструкции шахтных копров. Требования к эксплуатации. — К.: Госуглепром Украины, 1994. — 68с.

5. Указания по определению нормативных нагрузок и коэффициентов перегрузки для надшахтных зданий и сооружений предприятий угольной промышленности. К.: Будивельник, 1964. — 81с.
6. Балкарей И.М., Колтакова Г.В. Колебания укосных копров при экстренном разрыве шахтного подъемного каната // Динамика и прочность строительных конструкций. Киев: Будивельник, 1967. — С. 50-64.
7. Балкарей И.М., Колтакова Г.В. Определение импульса шахтного подъемного каната // Динамика и прочность строительных конструкций. Киев: Будивельник, 1967. — С. 32-49.
8. ВСН 46-75. Инструкция по определению нагрузок на здания и сооружения угольной промышленности. — Донецк, 1977. — 89 с.
9. Ткач А.А. Определение экстренных усилий в многоканатной подъемной установке. // Горная механика: Сб. науч. тр. (научно-исследовательский институт горной механики им. М.М. Фёдорова).— Вып. 1. — Часть 1. — Донецк, 1991. — С. 102-109.
10. Куценко В.Н. Совершенствование методики расчёта укосных шахтных копров на действие особых нагрузок от внезапной остановки поднимающегося сосуда // Металеві конструкції. — Т. 8. — №1. — Макіївка, 2005. — С. 53-65.
11. Куценко В.Н. Учёт динамического характера усилий в подъемных канатах при расчёте строительных конструкций укосных шахтных копров // Металлические конструкции. — Т. 11. — №3. — Макеевка, 2006. — С.171-185.
12. Куценко В.Н., Кострицкий А.С. Экспериментальное исследование динамического поведения конструкций шахтных копров // Вісник ДонНАБА. (Будівельні конструкції, будівлі та споруди). — Випуск 2003-2(39). — Т. 2. — Макіївка, 2003. — С. 46-52.
13. Бескопильный В.С. Решетников В.И. О величине напуска каната при кратковременном зависании подъемного сосуда // Сборник научных статей аспирантов МакНИИ. — Макеевка-Донбасс, 1968. — С.31-34.
14. Бескопильный В.С. Решетников В.И. О величине напуска каната при кратковременном зависании подъемного сосуда // Сборник научных статей аспирантов МакНИИ. — Макеевка-Донбасс, 1968. — С. 31-34.

Куценко Володимир Миколайович є доцентом кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: дослідження дійсної роботи та удосконалення методів розрахунку будівельних конструкцій гірничотехнічних споруд.

Куценко Владимир Николаевич является доцентом кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: исследование действительной работы и, совершенствование методов расчёта строительных конструкций горнотехнических сооружений.

Kuschenko Volodymyr is an Associated Professor of the Metal Structures Department at the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of the Ukrainian Association of Metal Structures. His scientific interests include research into an actual work and improvement of the design methods for building structures of water-development works.