



ISSN 1814-5566
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS
11, N3 (2006) 171-185
УДК 624.96

(06)-0116-1

УРАХУВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ХАРАКТЕРУ ЗУСИЛЬ В ПІДІМАЛЬНИХ КАНАТАХ ПРИ РОЗРАХУНКУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ УКОСНИХ ШАХТНИХ КОПРІВ

В.М. Кущенко

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

Отримана 11 червня 2006; прийнята 14 липня 2006

Анотація. В статті наведені результати аналізу та узагальнення експериментальних і теоретичних досліджень динамічного характеру навантажень укосних шахтних копрів від робочих зусиль в піднімальних канатах. Запропонована інженерна методика визначення навантажень від робочого натягнення піднімальних канатів для розрахунку укосних шахтних копрів, яка дозволяє урахувати динамічні зусилля від коливань піднімальних посудин.

Ключові слова: шахтні копри, динамічні зусилля в піднімальних канатах, коефіцієнт динамічності, розрахункові навантаження.

УЧЁТ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА УСИЛИЙ В ПОДЪЁМНЫХ КАНАТАХ ПРИ РАСЧЁТЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ УКОСНЫХ ШАХТНЫХ КОПРОВ

В.Н. Кущенко

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

Получена 11 июня 2006; принята 14 июля 2006

Аннотация. В статье приведены результаты анализа и обобщения экспериментальных и теоретических исследований динамического характера нагрузок укосных шахтных копров от рабочих усилий в подъемных канатах. Предложена инженерная методика определения нагрузок от рабочего натяжения подъемных канатов для расчёта укосных шахтных копров, которая позволяет учесть динамические усилия от колебания подъемных сосудов.

Ключевые слова: шахтные копры, динамические усилия в подъемных канатах, коэффициент динамичности, расчётные нагрузки.

CALCULATION OF DYNAMIC FORCES IN LIFTING CABLES UNDER CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES OF MOWING MINE HEADFRAMES

V.N. Kushenko

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzavin str. 2, 86123,
Makeyevka, Ukraine.
E-mail: snpcsh@mail.ru

Received 11 June 2006; accepted 14 July 2006

Abstract. The article showed the results of analysis and synthesizing of experimental and theoretical investigations of dynamic character of loads in mowing mine headframes under operational loadings in lifting cables. The engineering principles of loading definition on mowing mine headframes from operational tension from lifting cables which allowed to estimate the dynamic forces from lifting mechanism oscillations were proposed.

Keywords: mine headframes, dynamic forces in lifting cables, dynamic coefficient, calculation loads.

Характеристика объекта исследования

Укосные шахтные копры являются горнотехническими сооружениями шахтных подъемных установок с наземным расположением подъемной машины. Конструкции шахтных копров представляют собой пространственные стержневые системы высотой от 15 до 70 м, состоящие из станка, подшивных конструкций и укосины [1-3] (см. рис. 1). Материалы конструкций шахтных копров – сталь и железобетон.

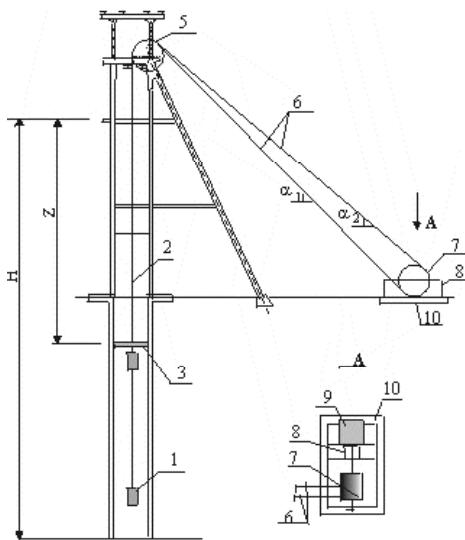


Рис. 1. Конструкции шахтного копра в составе механической системы шахтной подъемной установки.

Основным видом технологических нагрузок копров являются нагрузки от натяжения подъемных канатов. Нагрузки от натяжения подъемных канатов передаются на конструкции шахтного копра через опорные подшипники направляющих шкивов в виде реакций от действия равнодействующих сил натяжения ветвей и струн подъемного каната (см. рис. 2).

В соответствии с действующими нормами [4-6] нагрузки на конструкции шахтных копров от

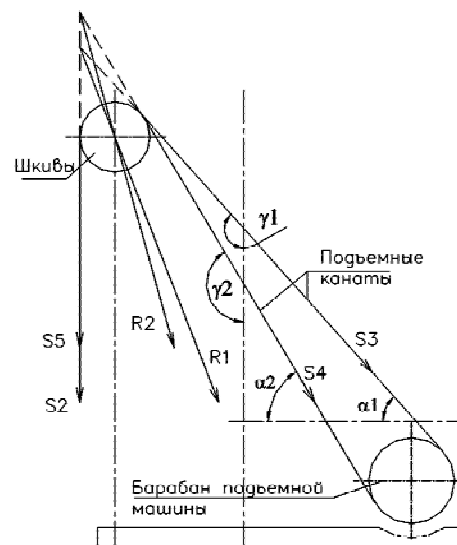


Рис. 2. Схема передачи нагрузок от натяжения подъемных канатов на конструкции укосных шахтных копров.

натяжения подъёмных канатов определяются по условной схеме как статические. При определении нагрузок от рабочих усилий в ветвях подъёмного каната учитываются инерционные нагрузки при разгоне и замедлении подъёмной машины, а так же усилия сопротивления движению сосуда в шахтном стволе, однако дополнительные усилия от колебаний сосудов на подъёмных канатах не учитывается [1-4]. Пренебрежение динамическим характером усилий в подъёмных канатах является причиной недостаточно точного расчёта конструкций шахтных копров. Совпадение частот динамических нагрузок с собственными частотами конструкций может привести к резонансным явлениям и как следствие к зыбкости сооружений, а так же к появлению усталостных повреждений.

Цель работы

Целью данной работы является уточнение нагрузок от натяжения подъёмных канатов, действующих на конструкции укосных шахтных копров при нормальных режимах работы подъёмной машины.

Методика выполнения работы

Исследование динамического характера нагрузок от натяжения подъёмных канатов проводилось на основе: 1) анализа результатов теоретических исследований динамического поведения механической системы «сосуд – канат – шкивы – копёр»; 2) статистического анализа экспериментальных данных об амплитудах

динамических усилий в подъёмных канатах при различных режимах работы подъёмных установок; 3) гармонического и статистического анализа данных динамических испытаний конструкций шахтных копров. В результате устанавливались следующие параметры динамических нагрузок: коэффициенты динамичности усилий в подъёмных канатах при различных режимах работы подъёмных машин; диапазоны частот собственных и вынужденных колебаний в механической системе «сосуды – канаты – шкивы - копёр»; коэффициенты динамичности конструкций копров по перемещениям; параметры циклов динамических напряжений в основных несущих конструкциях шахтных копров.

Теоретические значения амплитуд динамических усилий в подъёмных канатах

В работах [7-13] приведены результаты теоретических исследований динамического поведения механической системы «подъёмный канат-сосуд» для следующих расчётных случаев работы ШПУ: движение подъёмного сосуда с ускорением или замедлением; внезапное приложение груза без начальной скорости; внезапное приложение скорости. Теоретические предельные значения коэффициентов динамичности по внутреннему усилию в подъёмных канатах, систематизированы в работе [13] и приведены в табл. 1. В соответствии с приведенными данными предельные значения коэффициента динамичности при разгоне и торможении подъёмной машины составляют 1,05-1,15.

Таблица 1. Теоретические значения коэффициентов динамичности усилий в подъёмных канатах при различных переходных режимах работы подъёмной машины.

№ п.п.	Расчётный случай	Теоретические значения коэффициента динамичности
1	Разгон (торможение) подъёмной машины	$(1+2a/g)/(1+a/g)$ где: a – ускорение
2	Внезапное приложение груза без скорости	$2 (1+0,133\alpha)$ при $\alpha=0-1,5$ $2,43$ при $\alpha > 1,5$ где: $\alpha=pl/m$; p – погонная масса каната; l – длина ветви каната;

При внезапном приложении груза без скорости предельные значения коэффициента динамичности составляют 2-2,1. Поскольку нагрузки конструкций шахтных копров линейно зависят от усилий натяжения подъёмных канатов, нагрузки, определяемые нормативной методикой [4-6] без учёта коэффициента динамичности, существенно занижены.

Кроме рассмотренных случаев [7-13], вынужденные колебания в системе «подъёмный канат – сосуд – копёр» возникают по причине биения направляющих шкивов. В результате биения на конструкции шахтного копра действует вращающаяся центробежная сила, а также происходит кинематическое возбуждение подсистемы «подъёмный канат – сосуд». Биение направляющих шкивов вызвано наличием случайных эксцентриситетов, которые могут быть вызваны неточностью балансировки и разработкой подшипников. В соответствии с требованиями [14] предельно допустимые амплитуды биения направляющих шкивов зависят от их типа, конструкции и диаметра. Технические характеристики направляющих шкивов и соответствующие им предельно-допустимые значения случайных эксцентриситетов приведены в таблице 2.

При биении направляющего шкива точка схода подъёмного каната перемещается в вертикальном направлении по гармоническому закону:

$$Y_{ш} = e_{ш} * \sin \Omega t, \quad (1)$$

где

$Y_{ш}$ – перемещение точки схода подъёмного каната в вертикальном направлении;

$e_{ш}$ – случайный эксцентриситет направляющего шкива;

$\Omega = 2 * V/D_{ш}$, рад/сек – угловая скорость вращения шкива;

V – скорость движения подъёмного сосуда, м/сек;

$D_{ш}$ – диаметр направляющего шкива, м.

В процессе работы подъёмной машины частота биения шкивов изменяется и может сближаться с переменной частотой тона собственных колебаний подсистемы «подъёмный канат-сосуд» (см. рис. 3).

Характер изменения амплитуды динамических усилий в подъёмных канатах при изменении длины ветви подъёмного каната, приведенный на рис. 4, показывает возможность прохождения системы через резонанс при длине ветви каната 300-450 м.

Таблица 2. Технические характеристики направляющих (копровых) шкивов и предельно-допустимые значения случайных эксцентриситетов – $e_{ш}$.

Наименование шкива	Диаметр шкива, м	Маховый момент, кгм ²	Приведенная масса, кг	Масса, кг	$e_{ш}$, мм
Шкивы с литым чугуном ободом					
ШКК 3	3	9600	1100	2019	3
ШКК 3А	3	9600	1100	2206	3
РО390-336-844	3	15700	1750	3424	3
РО390-336-2	3	15700	1750	3424	3
ШК 4	4	34200	2140	3892	8
ШК 4А	4	34200	2140	4049	8
ШК 4Б	4	34500	2160	4090	8
Шкивы со штампованным ободом и наборными спицами					
Ш 4	4	34500	2160	4930	3
Ш 4А	4	34500	2160	4980	3
Ш 5А	5	71500	2860	6540	18
Ш 5	5	71500	2860	6874	18
Ш 6	6	139000	3860	8500	18
Ш 6А	6	139000	3860	9130	18

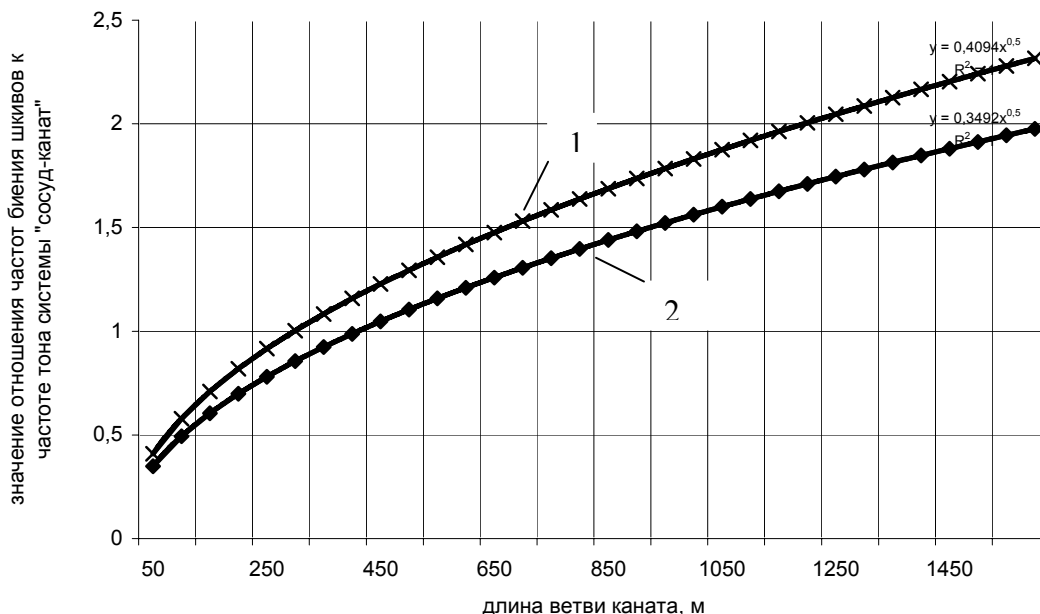


Рис. 3. Зависимость отношения частот биения шкивов к частоте тона собственных колебаний системы «сосуд-канат» от длины ветви подъёмного каната: 1 – для грузоподъёмных ШПУ; 2 – для грузовых ШПУ.

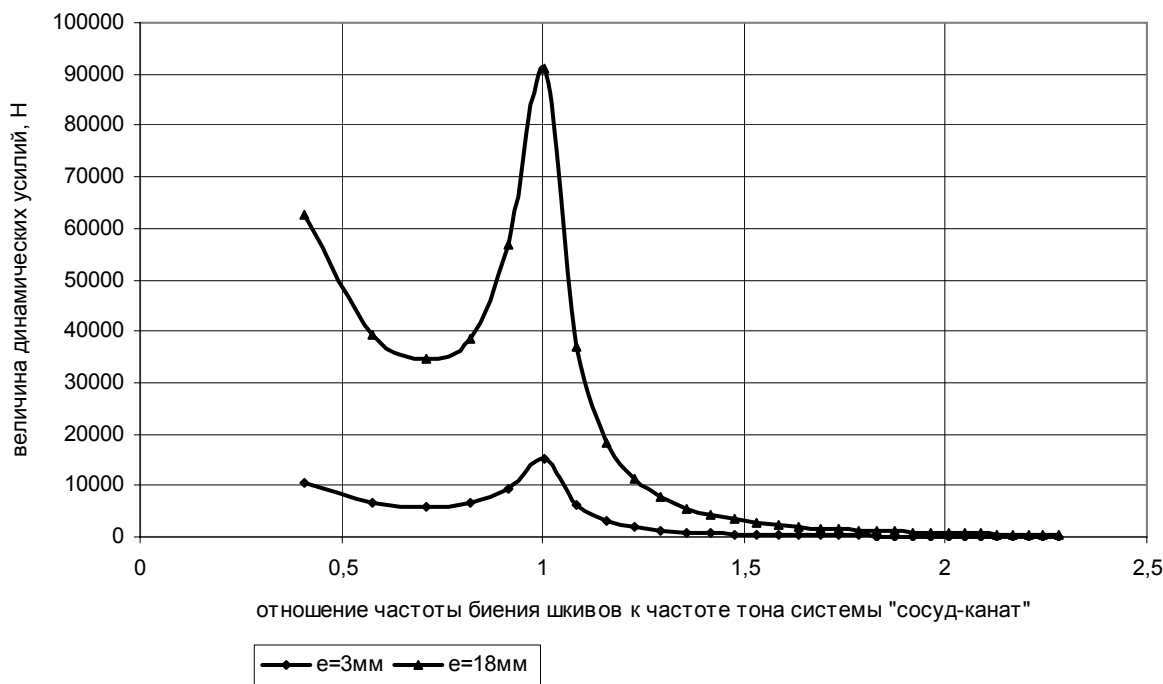


Рис. 4. Зависимость амплитуды динамических усилий в подъёмных канатах от отношения частот биения шкивов к частоте тона собственных колебаний системы «сосуд-канат» от длины ветви подъёмного каната при биении шкива с предельно допустимыми амплитудами.

При прохождении системы через резонанс коэффициент динамичности усилия в подъёмном канате может достигать значений 1,05-1,2.

Нижнее значение коэффициента динамичности соответствует подъёмным установкам с диаметром шкивов до 3 м, верхнее значение для

Таблица 3. Величина центробежной силы от биения направляющего шкива в зависимости от скорости движения подъёмного каната.

Тип шкива	Допустимая амплитуда биения $e_{ш}$, (мм)	Зависимость центробежной силы от скорости подъёма, $R_{ш} R_{ш}$, (Н)	Центробежная сила, (Н)
Шкивы с литым чугуном ободом			
ШКК 3(А)	3	$0,37 \cdot V^2$	30
РО390-336-844(2)	3	$0,58 \cdot V^2$	40
ШК 4(А) (Б)	8	$1,1 \cdot V^2$	110
Шкивы со штампованным ободом			
Ш 4 (А)	3	$0,42 \cdot V^2$	50
Ш 5 (А)	18	$1,6 \cdot V^2$	320
Ш 6 (А)	18	$1,93 \cdot V^2$	500

подъёмных установок со шкивами диаметром более 4 м. При биении шкива на конструкции копра действует центробежная сила, величина которой соответствует: для шкивов диаметром до 3 м II категории виброактивности (средняя); для шкивов диаметром 4 м и более III категории виброактивности (большая) (см. табл.3).

При совпадении частоты биения шкива и первой собственной частоты горизонтальных колебаний конструкций копра, в момент прохождения резонанса, амплитуда динамических усилий может возрасти в 9-10 раз. В литературных источниках описаны случаи неудачных конструктивных решений шахтных копров, которые приводили к резонансным явлениям [7]. Для исключения возможности резонансов, самая низкая частота собственных изгибных и изгибно-крутильных колебаний шахтных копров в направлении f_t должна удовлетворять следующему условию:

$$f_t \geq 3V/D_{ш}. \quad (2)$$

Статистический анализ экспериментальных данных

Цикл работы подъёмной машины можно разделить на следующие стадии: А – манёвры и загрузка (разгрузка) подъёмных сосудов; Б – снятие с посадочных устройств; В – ускоренное движение; Г – равномерное движение; Д – замедленное движение. Ускорение и замедление

для шахтных подъёмных установок (ШПУ) составляют [18]: 1) для клетевых подъёмных установок - 0,6-0,75 м/сек²; 2) для скиповых подъёмных установок – 0,7-1 м/сек². Скорость движения подъёмных сосудов на ШПУ в зависимости от глубины и назначения ствола составляет 5-16 м/сек.

В процессе работы подъёмной машины в ветвях и струнах подъёмного каната возникают переменные усилия, которые представляют собой сумму статических и динамических сил [6-13, 15, 16]. Статические усилия в подъёмных канатах возникают от веса подъёмных сосудов и веса полезного груза. Динамическая составляющая усилий в ветвях каната включает: переменный вес подъёмного каната; переменную величину веса полезного груза при загрузке или разгрузке подъёмного сосуда; силы инерции при разгоне или торможении подъёмной машины; усилия от вынужденных колебаний подъёмных сосудов и канатов; усилия от параметрических колебаний. На величину динамических усилий в ветвях подъёмного каната оказывают влияние следующие факторы: технические характеристики подъёмной машины; тахограмма движения подъёмных сосудов; тип и состояние грузозачно-разгрузочных устройств; технические характеристики и состояние армировки шахтного ствола; программы работы системы автоматизации подъёмной машины. Влияние большого числа факторов, обладающих переменным характером, определяет случайный характер колебаний

Таблица 4. Числовые характеристики коэффициентов динамичности усилий в подъёмных канатах при различных режимах работы ШПУ.

№ п.п.	Стадия работы ШПУ	Математическое ожидание	Дисперсия	Доверительный интервал ($\beta=0,95$)	Три стандарта
1	Спуск - А	1,21	0,0122	1,15; 1,28	1,61
2	Спуск - Б	1,12	0,0052	1,09; 1,15	1,29
3	Спуск - В	1,14	0,0074	1,1; 1,18	1,43
4	Спуск - Г	1,08	0,0023	1,06; 1,1	1,24
5	Спуск - Д	1,17	0,0047	1,14; 1,20	1,40
6	Подъём - А	1,26	0,039	1,15; 1,37	1,96
7	Подъём - Б	1,12	0,0046	1,08; 1,15	1,32
8	Подъём - В	1,14	0,0055	1,11; 1,17	1,4
9	Подъём - Г	1,08	0,003	1,06; 1,1	1,27
10	Подъём - Д	1,18	0,0198	1,123; 1,24	1,66

в системе «сосуд – подъёмный канат». Поскольку при работе подъёмной машины упругие перемещения сосуда имеют вид колебаний относительно динамического положения равновесия в качестве характеристики амплитуды динамических усилий в подъёмном канате можно рассматривать коэффициент динамичности [16]. Числовые характеристики случайной величины коэффициента динамичности, определённые для экспериментальных данных работы [16], приведены в таблице 4.

В соответствии с данными табл. 4, случайный характер колебаний в механической системе «сосуд-канат» проявляется на всех стадиях цикла работы подъёмной машины. По однородности статистические данные разделяются на три группы: манёвры груженых сосудов на уровне нижнего загрузочного устройства ($m(K_d)=1,2-1,3$; $A_{K_d}=0,1$); ускоренное или замедленное движение сосудов ($m(K_d)=1,14-1,18$; $A_{K_d}=0,07$); движение с постоянной скоростью ($m(K_d)=1,1$; $A_{K_d}=0,05$). В соответствии с приведенными данными в большей мере случайный характер вынужденных колебаний проявляется при переходных режимах работы подъёмных машин.

Сопоставление теоретических данных и результатов статистического анализа

Максимальные значения коэффициентов динамичности наблюдаются при манёврах клетей

внизу во время загрузки (п. 6 табл. 4) и в среднем составляют 1,26-1,37, верхняя граница рассеивания определённая по правилу трёх стандартов составляет 1,96 и близка к теоретическому значению 2-2,1 (см. п. 2, 3 табл. 1).

Минимальные значения коэффициентов динамичности наблюдаются при равномерном движении (п.п. 3, 8 табл. 4): математическое ожидание 1,06-1,1; верхняя граница рассеивания 1,24-1,27. Максимальные теоретические значения коэффициента динамичности от биения шкивов совпадают с верхней границей рассеивания экспериментальных значений и соответствуют резонансным режимам совпадения собственной частоты тона системы «сосуд-канат» с частотой биения шкивов (см. рис. 3, 4).

При разгоне подъёмной машины числовые характеристики коэффициентов динамичности составляют: математическое ожидание 1,14-1,18; верхняя граница рассеивания 1,43. Тоже при торможении: математическое ожидание 1,12-1,24; верхняя граница рассеивания 1,4-1,66. Теоретические значения коэффициента динамичности составляют 1,05 – 1,1 меньше математического ожидания экспериментальных данных (см. п. 3 табл. 1) на 6-12%, а также меньше верхней границы рассеивания на 22-45%.

Таким образом, вследствие случайного характера колебаний в системе «сосуд-канат», действительные амплитуды динамических напряжений могут значительно отличаться от теоретических значений. Возможные отличия

Таблица 5. Технические характеристики испытанных копров.

№ п.п.	Система	Назначение	Высота (м)	Тип подъёмных машин	Диаметр шкивов
1	рамный	клетевой	28,5	2ЦЗ,5х1,8	4
2	станковый	клетевой	21,0	БМ-3000/2030	3
3	комбинированный	скиповой	38,0	2ЦЗ,5х1,8	4
4	комбинированная	скиповой	47,8	ШПМ 1х5,5х6 2Ц-5х2,3	6

Таблица 6. Результаты динамических испытаний шахтных копров.

№ п.п.	Режим работы ШПУ	K_d	a_d , мм	f , Гц	σ_d/R_y
1	Манёвры и отрыв от кулаков	1,03	0,3-0,4	1,3-2,4	0,02-0,03
2	Разгон	1,02	0,15-0,2	1,3-2,4	0,015-0,02
3	Равномерное движение	1,01	0,05-0,1	0,6-2,4	0,005-0,01
4	Посадка на кулаки	1,03	0,25-0,3	1,3-8,1	0,02-0,03
5	Испытание шахтного парашюта	1,02	0,15-0,2	1,3-8,1	0,015-0,02

необходимо учитывать, коэффициентами надёжности по нагрузке обеспечивающими характеристику безопасности не менее 3.

Анализ результатов динамических испытаний конструкций укосных шахтных копров

Для оценки влияния динамического характера нагрузок от натяжения подъёмных канатов на вибрации и напряженно-деформированное состояние конструкций шахтных копров выполнен анализ данных динамических испытаний четырёх шахтных копров с различными конструктивно-технологическими параметрами (см. рис. 5). Технические характеристики копров приведены в табл. 5.

Динамические испытания проводились по методике приведенной в работе [17]. В результате динамических испытаний определялись параметры собственных и вынужденных колебаний, а так же амплитуды динамических напряжений в конструкциях шахтных копров (см. рис. 6). Амплитудно-частотные характеристики испытанных шахтных копров приведены на рис. 8. В табл. 6 приведены следующие осреднённые результаты динамических испытаний:

K_d – коэффициенты динамичности по горизонтальным перемещениям; a_d – максимальные амплитуды горизонтальных динамических перемещений; f – линейные частоты колебаний; σ_d/R_y – отношение динамических напряжений действующих в конструктивных элементах основных несущих конструкций к расчётному сопротивлению стали (см. п.1 табл. 6). В соответствии с данными табл. 6, коэффициенты динамичности по перемещениям в горизонтальном, крутильном и продольном направлениях незначительно отличаются от 1. Незначительные по величине значения коэффициентов динамичности обусловлены наличием в конструкциях шахтных копров укосины, ось которой практически совпадает с направлением равнодействующих от натяжения подъёмного каната. Вследствие этого, горизонтальные перемещения сооружения ограничены осевой жёсткостью ветвей укосины.

Характерные амплитудно-частотные характеристики испытанных шахтных копров приведены на рис. 7. В соответствии с экспериментальными данными, в процессе работы подъёмной машины конструкции шахтных копров совершают колебания четырёх видов: изгибные в направлении подъёмной машины; крутиль-

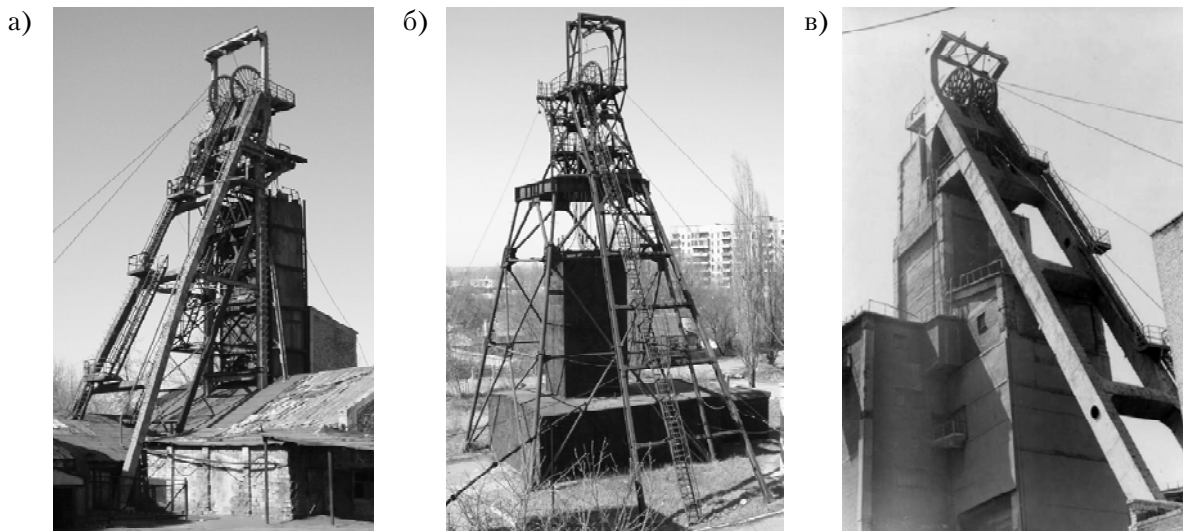


Рис. 5. Общий вид объектов динамических испытаний: а) копер клетового подъёма рамной системы; б) копер клетового подъёма станковой системы; в) копер скипового подъёма рамный комбинированной системы

ные в горизонтальной плоскости; изгибные в направлении перпендикулярном к направлению подъёмной машины; изгибно-крутильные; продольные в вертикальном направлении. Спектр собственных частот плотный, основная часть располагается в диапазоне от 1,5-6 Гц (см. рис 8). Нижняя граница спектра соответствует изгибным колебаниям в направлении перпендикулярном углу девиации. Верхняя граница соответствует вторым и третьим формам изгибных и связанных изгибно-крутильных колебаний. Диапазон вынужденных и собственных колебаний по амплитудно-частотным характеристикам практически совпадает (см. рис. 8). Нижняя граница спектра вынужденных колебаний 0,5-0,6 Гц соответствует биению направляющих шкивов. Динамические нагрузки от натяжения ветвей подъёмного каната являются низкочастотными, характеристика виброактивности III-IV категория — большая и очень большая.

Уточнение расчётных значений динамических нагрузок от натяжения подъёмных канатов

Обобщая результаты анализа априорных источников и экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что расчётные усилия натяжения подъёмных канатов S_{Π} при различ-

ных режимах работы подъёмной машины следует рассматривать как сумму статического натяжения S_1 , сил инерции S_2 , сил сопротивления движению подъёмного сосуда в стволе S_3 , динамических усилий S_4 , возникающих при колебаниях подъёмного сосуда относительно динамического положения равновесия:

$$S_p = S_1 + S_2 + S_3 + S_4. \quad (2)$$

Расчётное значение статического натяжения подъёмного каната определяется по следующей формуле:

$$S_1 = (m_c \gamma_f + m_Q \gamma_f + \rho_k L \gamma_f) g, \quad (3)$$

где

γ_f — коэффициент надёжности по нагрузке: для собственного веса подъёмного сосуда с прицепным устройством и вагонетками — 1,05 [4]; от веса подъёмного каната — 1,2 [19]; от веса полезного груза: насыпных — 1,2; прочих 1,1 [4]; m_c — масса сосуда с прицепным устройством; m_r — вес полезного груза; ρ_k — линейная плотность подъёмного каната; L — переменная длина ветви подъёмного каната, зависящая положения подъёмного сосуда по высоте ствола.

Наибольшее значение S_{1max} называется максимальным статическим натяжением и соответствует положению груженого сосуда на уровне

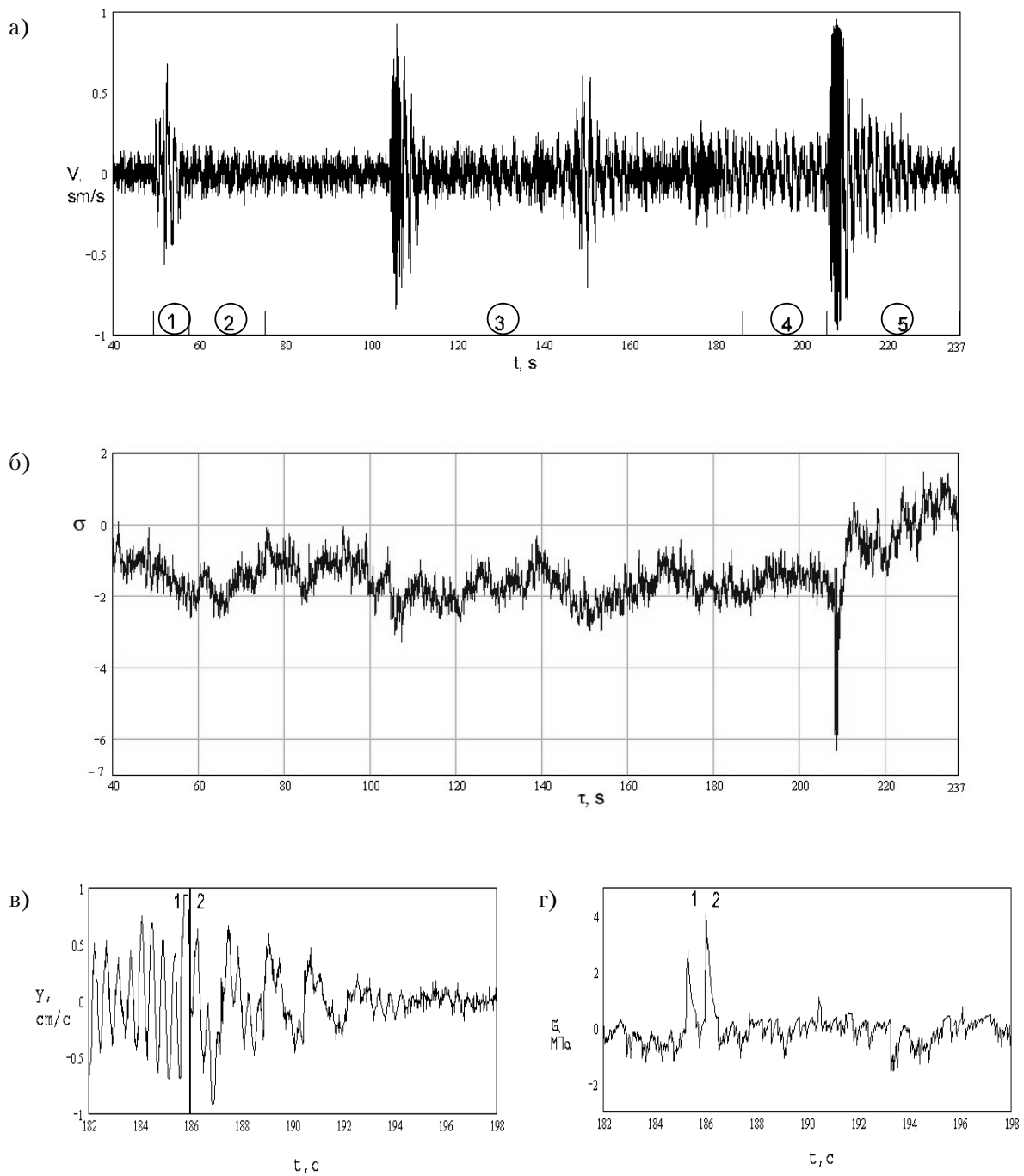
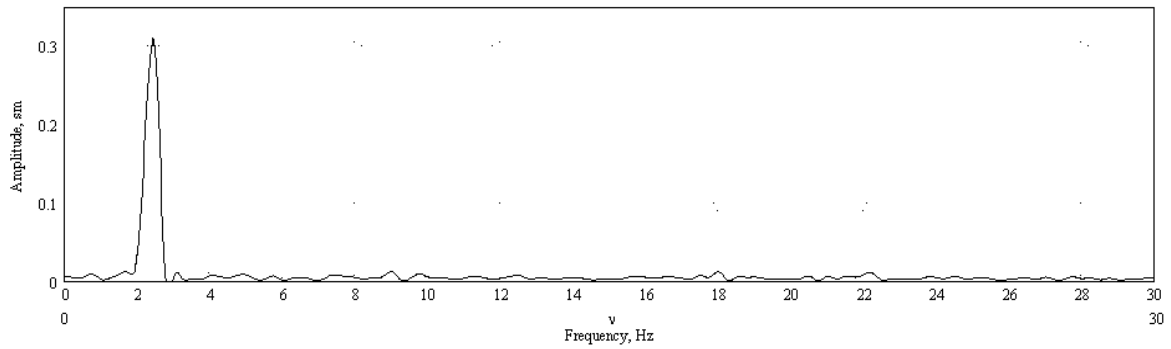


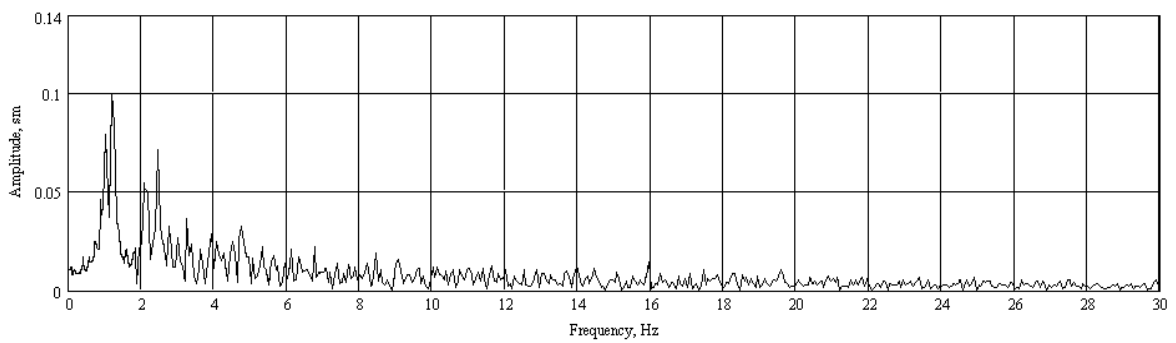
Рис. 6. Синхронные сигналы: а) сейсмографа (горизонтальные колебания) и б) тензодатчика (продольные деформации укосины) при полном цикле работы клетевой подъемной установки (1 – снятие клетки посадочных устройств; 2 – разгон; 3 – стадия равномерного движения; 4 – стадия торможения; 5 – посадка клетки); в) сейсмографа и г) тензодатчика: (1 – посадка клетки; 2 – свободные колебания).

нижнего загрузочного устройства, то есть, когда длина ветви подъемного каната максимальна. Минимальное значение S_{1min} соответствует

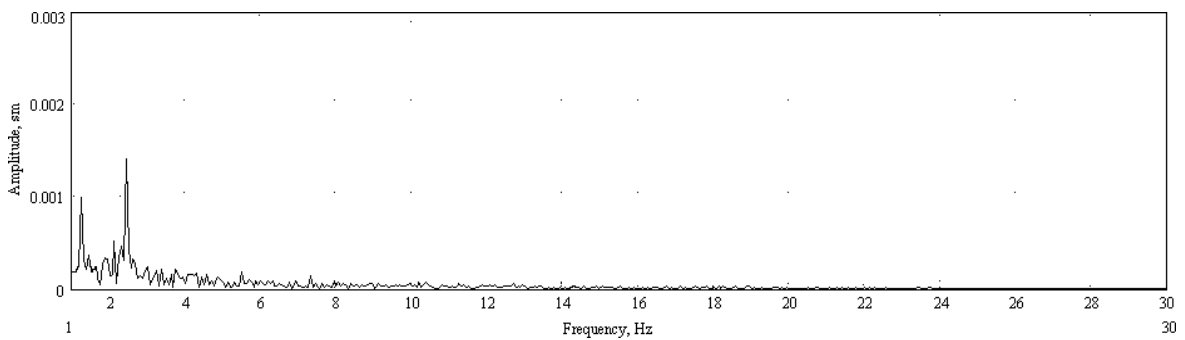
положению разгруженного сосуда на уровне верхней приёмной площадки.



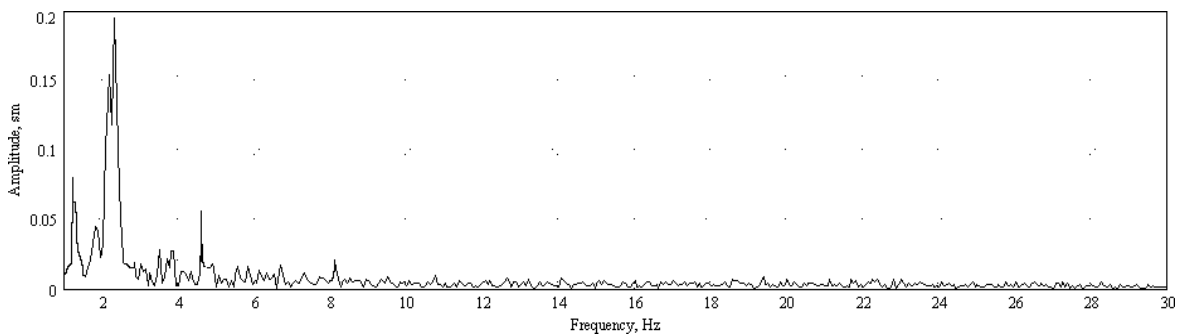
а) снятие клетки с кулаков (горизонтальные перемещения)



б) разгон подъемной машины (динамические напряжения)



в) равномерное движение (горизонтальные перемещения)



г) посадка клетки на кулаки (динамические напряжения)

Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний рамного копра на различных стадиях цикла работы шахтной подъемной установки.

Силы инерции возникают при движении подъёмной машины с ускорением или замедлением и определяются по следующей формуле:

$$S_2 = \pm(m_c \gamma_f + m_Q \gamma_f + p_k L \gamma_f) a = \pm S_1 a / g, \quad (4)$$

где

a – ускорение или замедление движения сосуда; знак «+» соответствует случаю ускоренного движения поднимающихся и замедленного движения опускающихся – сосудов; знак «-» соответствует случаю ускоренного движения опускающихся и замедленного движения поднимающихся сосудов.

Поскольку величина S_1 переменная, следовательно, силы инерции в процессе работы подъёмной машины так же изменяются. Изменение сил инерции обусловлено изменением массы ветви подъёмного каната. Так, для поднимающейся сосуда, максимальные значения сил инерции возникают в начале ускоренного движения, а для опускающегося – в конце замедления. При движении с постоянной скоростью силы инерции равны нулю.

Силы сопротивления движению сосуда в стволе определяются по следующей формуле:

$$S_3 = \pm k_c S_1, \quad (5)$$

где

$k_c = 0,06-0,15$ – коэффициент сопротивления; знак «+» для поднимающегося сосуда; знак «-» для опускающегося сосуда.

Динамические усилия S_4 от колебания подъёмных сосудов относительно положения статического или динамического равновесия определяются по следующей формуле:

$$S_4 = (S_1 + S_2) (k_d - 1), \quad (6)$$

где

k_d – коэффициент динамичности для соответствующего режима работы подъёмной установки.

Расчётные значения коэффициентов динамичности определяются с учётом случайного характера колебаний в системе «сосуд – канат» при характеристике безопасности $\gamma = 3$ по формуле [18]:

$$K_d = m(K_d)(1 + \gamma A_{K_d}), \quad (7)$$

где

$A_{K_d} = \sigma(K_d) / m(K_d)$ – коэффициент вариации коэффициента динамичности; $\sigma(K_d)$, $m(K_d)$ –

соответственно стандарт и математическое ожидание коэффициента динамичности.

Числовые характеристики коэффициентов динамичности для различных стадий цикла работы подъёмной машины принимаются в соответствии с результатами статистической обработки экспериментальных данных (см. табл. 3).

Средние и расчётные значения коэффициентов динамичности и надёжности по нагрузке для различных стадий цикла работы подъёмной машины приведены в табл. 7.

С учётом формул (2)-(7) формула (1) для определения расчётного значения усилия приводится к следующему общему виду:

$$S_p = S_1 (1 \pm a/g \pm k_c + k_d) = \\ = (m_c \gamma_f + m_Q \gamma_f + p_k L \gamma_f) g [1 \pm a/g \pm k_c + (k_d - 1)] \quad (8)$$

В таблице 8 для различных стадий цикла работы ШПУ приведены средние значения безразмерного параметра $\xi = S_p / S_{1max}$, который показывает, как амплитуды динамических усилий в подъёмных канатах определённые по формуле (8) соотносятся с максимальным статическим рабочим натяжением на различных стадиях цикла работы ШПУ.

Расчётные значения нагрузок шахтных копров от натяжения подъёмных канатов определяются следующими условиями: 1) абсолютный максимум натяжения одной из ветвей подъёмного каната; 2) максимальное суммарное натяжение ветвей; 3) максимальная разность натяжения ветвей.

В соответствии с данными табл. 8 для копров клетевых подъёмных установок указанные расчётные параметры нагрузок от натяжения подъёмных канатов соответствуют случаю снятия с кулаков или манёвров гружённого подъёмного сосуда на уровне нижней приёмной площадки:

$$S_p = (m_c \gamma_f + m_Q \gamma_f + p_k L_{max} \gamma_f) g \times \\ \times [1 + a/g + k_c + (k_d - 1)] = \\ = S_{1p} (1 + a/g + 0,15 + 1) = 2,21 S_{1p}, \quad (9)$$

Соответствующее усилие натяжения смежной ветви $S_{рсм}$, определяется по следующей формуле:

$$S_{рсм} = (m_c \gamma_f + m_Q \gamma_f + p_k L_{min} \gamma_f) g [1 - a/g - k_c + (k_d - 1)] = \\ = S_{1рсм} (1 - a/g - 0,15 + 0,65) = 1,4 S_{1рсм}. \quad (10)$$

Таблица 7. Данные для расчёта динамической составляющей усилий натяжения подъёмных канатов.

№ п.п.	Наименование стадии цикла работы ШПУ	$m(K_d)$	$1+\gamma A_{Kd}$	$K_d(1+\gamma A_{Kd})$
1	Подъём - манёвры внизу (клеть)	1,3	1,43	1,86
2	Подъём - снятие с загрузочного устройства	1,12	1,2	1,35
3	Подъём – ускоренное движение	1,14	1,2	1,37
4	Подъём – равномерное движение	1,1	1,15	1,27
5	Подъём – торможение	1,18	1,36	1,61
6	Спуск - манёвры сверху (клеть)	1,21	1,27	1,54
7	Спуск – снятие с разгрузочного устройства	1,12	1,2	1,35
8	Спуск – ускоренное движение	1,14	1,23	1,4
9	Спуск – равномерное движение	1,1	1,14	1,26
10	Спуск - торможение	1,17	1,18	1,38

Таблица 8. Средние значения отношения амплитуд динамических усилий в подъёмных канатах к максимальному статическому рабочему натяжению.

№ п.п.	Наименование стадии цикла работы ШПУ	ξ
1	Подъём – манёвры внизу (клеть)	1,96
2	Подъём - снятие с загрузочного устройства	1,4
3	Подъём – ускоренное движение	1,7
4	Подъём – равномерное движение	1,2-0,9
5	Подъём – торможение	1,3
6	Спуск – манёвры сверху (клеть)	1,2
7	Спуск – снятие с разгрузочного устройства	1,1
8	Спуск – ускоренное движение	0,98
9	Спуск – равномерное движение	1,1-1,2
10	Спуск - торможение	1,3

Примечание: в таблице 8 значения параметра ξ даны для случая спуска груженого сосуда.

Для скиповых подъёмных установок наиболее неблагоприятному сочетанию расчётных натяжений подъёмного каната соответствует случай начала разгона, движущегося вверх груженого сосуда (см. табл. 8):

$$S_p = (m_c \gamma_f + m_Q \gamma_f + p_k L_{\max} \gamma_f) g \times [1 + a/g + k_c + (k_d - 1)] = S_{1p} (1 + a/g + 0,15 + 0,4) = 1,65 S_{1p} \quad (11)$$

Соответствующее усилие натяжения смежной ветви $S_{рсм}$, определяется по следующей формуле:

$$S_{рсм} = (m_c \gamma_f + p_k L_{\min} \gamma_f) g \times [1 - a/g - k_c + (k_d - 1)] = S_{1рсм} (1 - a/g - 0,15 + 0,45) = 1,2 S_{1рсм} \quad (12)$$

Для уравновешенных подъёмных машин скипового подъёма расчётные усилия в подъёмных канатах определяются с учётом массы

Таблица 9. Сопоставление уточнённых значений расчётных усилий натяжения подъёмных канатов с нормативными данными.

№ п.п.	Классификация ШПУ по типу сосудов	$S_{\max}/S_{\max 0}$	$S_{\text{см}}/S_{\text{см}0}$
1	Клетевые	1,8	1,5
2	Скиповые	1,5	1,3

уравновешивающих канатов. При определении расчётных нагрузок от натяжения подъёмных канатов, для каждой подъёмной машины необходимо рассматривать два варианта: 1) максимальное натяжение нижнего каната; 2) максимальное натяжение верхнего каната. Первый вариант даёт максимальное значение горизонтальной составляющей, а второй вертикальной составляющей (см. рис. 2).

Если подъёмная шахтная подъёмная установка - одно-концевая, расчётное усилие от натяжения подъёмного каната определяется в зависимости от типа подъёмного сосуда по формулам (9) или (10). В табл. 9 приведены результаты сопоставления уточнённых расчётных значений усилий в подъёмных канатах двух концевых подъёмных машин барабанного типа без уравновешивающих канатов, со значениями определёнными по нормативной методике: $S_{\max 0}$; $S_{\text{см}0}$ [4, 5].

Заключение

1. Нормативная методика определения нагрузок шахтных копров от работы подъёмной машины [1-4] даёт существенно заниженные значения нагрузок: а) для копров клетевых подъёмов по суммарному усилию натяжения ветвей в 1,6-1,7 раза; б) для копров скиповых подъёмов - в 1,3-1,4 раза. Тенденция нормативной инженерной методики [1-4] к занижению нагрузок обусловлена, тем, что она не учитывает динамическую составляющую усилий натяжения подъёмных канатов обусловленную колебаниями подъёмных сосудов.
2. Расчётные значения нагрузок от рабочих режимов подъёмных машин для копров клетевых подъёмов соответствуют режимам маневрирования грузённого подъёмного сосуда на уровне нижнего загрузочного устройства. Для

этих режимов теоретические результаты и экспериментальные данные показывают предельное значение коэффициента динамичности усилия в ветви подъёмного каната близкое к 2. Коэффициент динамичности для смежной ветви в соответствии с результатами экспериментальных данных равен 1,4.

3. Расчётные нагрузки от рабочих режимов подъёмных машин скиповых подъёмов соответствуют режимам разгона подъёмной машины для положения грузённого сосуда на уровне нижнего загрузочного устройства. Коэффициент динамичности для усилий в поднимающейся ветви составляет 1,65. Коэффициент динамичности для смежной ветви – 1,2.
4. Для конструкций шахтных копров при работе подъёмной машины наблюдаются изгибные поперечные колебания в направлении подъёмной машины, изгибно-крутильные в ортогональном направлении, продольные колебания. Анализ спектрограмм виброперемещений и динамических напряжений показывает значения коэффициентов динамичности для горизонтальных составляющих равнодействующих от натяжения ветвей подъёмных канатов 1,01-1,03.

Литература

1. Бровман Я. В. Надшахтные копры. – М.: Гостехиздат, 1961. – 239 с.
2. Розенблит Г. Л. Стальные конструкции зданий и сооружений угольной промышленности. – М.: Углетехиздат, 1953. – 272 с.
3. Максимов А. П. Горнотехнические здания и сооружения. – 3-е изд. – М.: Недра, 1970. – 313 с.
4. РД 12.005-94 Металлические конструкции шахтных копров. Требования к эксплуатации. Госуглепром Украины. – Киев, 1994. – 68 с.
5. ВСН 46-75. Инструкция по определению нагрузок на здания и сооружения угольной промышленности. – Донецк, 1977. – 89 с.

6. Указания по определению нормативных нагрузок и коэффициентов перегрузки для надшахтных зданий и сооружений предприятий угольной промышленности. – К.: Будівельник, 1964. – 81 с.
7. Динник А. Н. Статьи по горному делу. – М.: Углетехиздат, 1957. – 195 с.
8. Глушко Я. М. Динамические усилия в шахтных подъёмных канатах переменной длины в основном режиме подъёма // Стальные канаты. – Киев, 1966. – Вып. 3. – С. 59-63.
9. Савін Г. М. Динамічні зусилля в підймальних канатах деяких діючих шахт // ДАН УССР, 1951. – № 6. – С. 446-450.
10. Журавлёв П. А., Захаревич А. Ф. Приближённый метод определения наибольшего натяжения шахтного каната за весь период подъёма. / Записки Ленинградского горного института. // Теоретическая механика. Теория упругости. – М., 1961. – Т. 39. – Вып. 3. – С. 15-20.
11. Неронов Н.П. О максимальных напряжениях в подъёмно-шахтном канате // Изв. вузов. Горный журнал, 1959. – №10. – С. 107-113.
12. Носырев Б. А., Кубарев С. М., Пивоваров В. П. Оценка нагрузочных характеристик подъёмных машин по условиям прочности // Цветная металлургия, 1983. – № 20. – С. 33-34.
13. Дворников В. И., Кърцелин Е. Р. Теоретические основы динамики шахтного подъёмного комплекса. – София, 1997. – 364 с.
14. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъёмных установок / В. Р. Бережок, Б. Н. Чайка, Н. Ф. Кузьменко и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 391 с.
15. Кулик Н. Г. Экспериментальное исследование напряжений в элементах стальных канатов // Стальные канаты. – Киев, 1968. – Вып. 5. – С. 199-201.
16. Белый В. Д., Лесин К. К., Самарский Выбор А. Ф. Выбор, навеска, эксплуатация и контроль состояния шахтных канатов. – М.: Недра, 1967. – 228 с.
17. Куценко В. Н., Кострицкий А. С., Некрасов Ю. П. Методика и результаты динамических испытаний укосного шахтного копра // Вісник Донбаської Державної академії будівництва та архітектури. Будівельні конструкції, будівлі та споруди, 2003-2. – С. 116-125.
18. Ржаницын А. Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
19. Справочник горного инженера. Под общ. ред. В. К. Бучнева. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 790 с.

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 a Docent of Metal Structures department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of Ukrainian Association of Metal Construction. Scientific concerns: research of real activity and, perfecting of methods of calculation of building designs of mine technical facilities.