

**Ильин С.Р.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)  
**Радченко В.К.**, инженер  
(Госгорпромнадзор Украины, ООО «АГАТ»)  
**Адорская Л.Г.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Самуся С.В.**, канд. техн. наук, мл. научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины);  
**Ильина И.С.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Ильина С.С.**, канд. техн. наук, доцент  
(ГВУЗ НГУ МОН Украины)

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМОВ В СТВОЛАХ ПРИ СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**Ильїн С.Р.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
(ІГТМ НАН України)  
**Радченко В.К.**, інженер  
(Держгіртехнагляд України, ТОВ «АГАТ»)  
**Адорська Л.Г.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,  
**Самуся С.В.**, канд. техн. наук, мол. наук. співр.  
(ІГТМ НАН України);  
**Ільїна І.С.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Ільїна С.С.**, канд. техн. наук, доцент  
(ДВНЗ НГУ МОН України)

### **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РОБОТИ ШАХТНИХ ПІДЙОМІВ В СТОВОЛАХ ЗА СКЛАДНИХ ГІРСЬКО-ГЕОЛОГІЧНИХ І ГІРНИЧОТЕХНІЧНИХ УМОВ**

**Iljin S.R.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)  
**Radchenko V.K.**, M.Sc.(Tech)  
(State Technical & Mining Inspectorate  
of Ukraine, «AGAT» Ltd.)  
**Adorskaya L.G.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,  
**Samusya S.V.**, Ph. D. (Tech.), Junior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine);  
**Iljina S.S.**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor,  
**Iljina S.S.**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor  
(National Mining University)

### **PROVIDING OF MINING HOISTS SAFETY WORK IN SAFTS AT DIFFICULT GEOLOGIC AND TECHNOLOGIC CONDITIONS**

**Аннотация.** В статье приведены результаты анализа потенциально неустойчивых динамических процессов в звеньях механических систем шахтных подъемных установок. Показано, что из-за деградации оборудования ствола, при длительной эксплуатации в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, рассмотренные процессы могут приводить к существенному снижению уровня безопасности работы систем «сосуд – армировка» вертикальных стволов. Показано, что шахтная подъемная установка является многосвязной полиосцилляторной динамической системой. В ее силовой передаче все динамические процессы энергетически взаимосвязаны между собой. При длительной эксплуатации повышенный износ и нарушение проектных параметров звеньев в определенных условиях вызывают внутренние или внешние резонансы с возбуждением ударно-циклического взаимодействия подъемных сосудов с армировкой аварийно опасного уровня. Источниками таких резонансов являются механические процессы взаимодействия барабана подъемной машины с головными канатами, отклонения геометрических и физико-механических параметров армировки от проектных значений, эксцентриситет подъемного сосуда, несоответствие параметров направляющих устройств сосуда и диаграммы скорости подъема условиям минимизации динамических нагрузок на армировку в условиях конкретного грузоподъемного отделения. В статье приведены результаты исследований, показывающие, что на протяженном участке в средней части ствола, где частоты вертикальных колебаний сосудов 2-х концевой подъемной установки становятся близкими по значению, возникает интенсивный энергетический обмен между колебаниями поднимающейся и опускающейся ветвей канатов через шкив подъемной машины. Он вызывает рост амплитуд горизонтальных колебаний подъемных сосудов и провоцирует ударный режим взаимодействия сосуда с армировкой. К такому же эффекту приводит нарушение цилиндрической формы ведущего шкива подъемной машины вследствие внешнего резонанса. Наличие резких изгибов на переходных участках диаграммы скорости подъема так же повышает горизонтальные нагрузки на армировку из-за создания знакопеременного вертикального ускорения сосуда. Это явление имеет наибольшую интенсивность при аварийном торможении подъемной машины. В стволах с нарушенной геометрией в зоне сдвижения горных пород сочетание глобальных протяженных отклонений от вертикали со знакопеременными отклонениями на коротких участках, сравнимых по длине с 2 – 3 длинами сосуда, неоптимальный выбор жесткости роликовых направляющих вызывают одностороннее поджатие башмаков к проводникам. Это резко интенсифицирует ударное взаимодействие сосудов с армировкой из-за учащения встречи башмаков с набегающими гранями рабочих поверхностей искривленных проводников. Процесс может иметь характер лавинообразного нарастания ударных нагрузок на коротких участках ствола. Одновременное возникновение описанных негативных взаимодействий звеньев на участке ствола с изношенной армировкой может стать причиной спонтанного ускорения ее деградации, накопления усталостных повреждений несущих конструкций сосуда и первопричиной аварии с тяжелыми материальными последствиями. В статье обоснован ряд технических мероприятий по снижению уровня аварийной опасности стволов, находящихся в длительной эксплуатации в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях.

**Ключевые слова:** шахтная подъемная установка, шахтный ствол, шахтный подъемный сосуд, диагностика армировки шахтного ствола, армировка шахтного ствола, динамика шахтных подъемных установок.

Шахтные стволы должны выполнять свои функции на все время отработки месторождения. Они должны эксплуатироваться от момента начала вскрытия месторождения на стадии проходки и еще долгое время после прекращения добычи для целей откачки воды, обслуживания мероприятий по консервации горных выработок и предотвращения несанкционированных обрушений земной поверхности. Поэтому шахтные стволы являются непрерывно эволюциони-

рующими системами, в разный период времени находящимися в разных видах технического состояния – от исправного до аварийно опасного. С увеличением срока их эксплуатации скорость возможного локального перехода из исправного в аварийно опасное состояние растет из-за параллельного накопления сопутствующих деградиционных явлений во все большем числе элементов стволового оборудования.

Физико-механические характеристики отдельных элементов оборудования подъема и их целых систем непрерывно подвергаются деградиционным изменениям вследствие механического и коррозионного износа, смещения горных пород, ремонтных работ и пр. Это является главным источником аварий в шахтных стволах с тяжелыми материальными последствиями и угрозой для жизни людей.

Такие изменения происходят случайным образом. Они могут носить монотонный длительный характер, а могут происходить достаточно быстро за несколько десятков рабочих смен. Причем, с ростом степени деградации ее скорость значительно увеличивается. Это приводит к многократному нарушению проектной сбалансированности физико-механических параметров ШПУ и созданию условий для локальной активизации динамических процессов в ее отдельных звеньях.

Интенсификация процессов старения, деградации, химической и электрохимической коррозии металлоконструкций в шахтных стволах привела к резкой потере несущей способности армировки, копров, подъемных сосудов, их подвесных устройств и других элементов шахтного подъема. В силу технических причин более 90% подъемных установок в горнорудной и угледобывающей промышленности стран СНГ в настоящее время не могут работать на проектных режимах из-за невозможности обеспечения эксплуатационной безопасности.

Стволы во многих случаях стали «узким местом» в транспортной цепочке горнодобывающих предприятий. Сочетание необходимости повышения интенсивности эксплуатации с уже имеющимся в наличии уровнем деградации эксплуатационных свойств параметров основного оборудования является основной причиной снижения устойчивости и стабильности работы систем шахтного подъема в целом и требует нового подхода к обеспечению безопасности путем управления техническим состоянием систем шахтного подъема в условиях непрерывной деградации (эволюционный фактор).

Потеря устойчивости и стабильности работы шахтных подъемных установок напрямую связана со спецификой функционирования современного большегрузного и скоростного подъемного оборудования (технический фактор). Особенностью работы любой шахтной подъемной установки является то, что центром управления механическим движением всех ее звеньев является барабан (шкив) подъемной машины, к которому в разные моменты время и с разной интенсивностью могут прикладываться механические воздействия в виде вращающего момента электропривода, рабочего или предохранительного тормозных моментов. При этом горизонтальное взаимодействие подъемных сосудов со

стационарными металлоконструкциями шахтного ствола (проводниками и расстрелами армировки) происходит на большом удалении от барабана.

Управляющее воздействие на подъемные сосуды со стороны привода или тормоза ШПУ возможно осуществить только через барабан посредством гибких и очень податливых в продольном и поперечном направлениях головных канатов. Такая схема системы силовой передачи ШПУ (особенно для глубин свыше 1000 м) является главной технической причиной сложности в обеспечении синхронности и синфазности между движением барабана и сосудов, создает условия для свободного перехода кинетической энергии между звеньями системы. При определенных соотношения параметров звеньев системы в ней реализуются внутренние или внешние резонансы с потерей устойчивости движения и нарушением условий безопасности. Примером является общеизвестная цепочка аварий на угольных подъемах в 60-х годах прошлого века, вызванная перекачкой энергии вертикального движения сосудов в их горизонтальные колебания при параметрически резонансных соотношениях между скоростью подъема, шагом армировки и массивностью подъемных сосудов [1].

Так как звенья силовой передачи подъемной установки объединены между собой в систему с последовательным и параллельным включениями, то выход из строя хотя бы одного из последовательных звеньев нарушает работу всей системы подъема и вызывает аварийную ситуацию (например, разрушение одного из пролетов проводников, обрыв головного каната, сбой в работе предохранительного тормоза). Выход из строя одного из параллельных звеньев (например, разрушение одного из роликовых амортизаторов сосуда, разрушение одного из расстрелов (не находящегося в узле стыковки ниток проводников)), приводит к перераспределению общей нагрузки на другие звенья параллельной цепочки и их временной перегрузке (иногда до аварийно опасного уровня), сохраняющейся вплоть до проведения ремонтно-восстановительных работ.

Появление таких факторов вызывает неустойчивость в режимах работы подъемной установки и является одной из основных причин перехода непрерывно эволюционирующей технологической системы шахтного подъема из работоспособного в аварийно опасное техническое состояние.

Сложность решения этой проблемы заключается в том, что в настоящее время отсутствует научно-методическая и нормативная база, которая бы учитывала реальные условия эксплуатации подъемов в условиях существенной взаимосвязанности процессов, неоднородности распределения по глубине ствола физико-механических, геометрических, динамических, прочностных и деформационных параметров оборудования.

**Анализ взаимосвязанных процессов в звеньях ШПУ, определяющих безопасность работы подъема.** Свойство динамических звеньев подъемной установки как многосвязной системы заключается в том, что постоянно накапливающиеся диспропорции могут неожиданно сойтись в ее неустойчивой точке и начать обрушивать всю конструкцию. Наиболее неустойчивым звеном ШПУ является система «сосуд – армировка». На сосуд действуют факторы возмущений: от барабана подъемной машины (изменение вертикальной скорости и ус-

корения по глубине ствола, разбаланс натяжений канатов); от груза (смещение центра масс груза в сосуде в бок и в лоб); от армировки (искривления проводников по глубине, изменчивость опорной жесткости по глубине).

В результате этого на сосуде суммируется действие всех факторов в каждой точке по длине ствола. Под их действием формируются мгновенные зазоры по 4-м опорам в 2-х плоскостях. Они, в зависимости от горизонтальной скорости соударения башмаков с проводниками, вертикальной скорости и ускорения сосуда формируют мгновенную картину динамических контактных усилий. Малые изменения любого из внешних факторов в серии циклов вызывают непредсказуемо большие изменения мгновенных контактных нагрузок (от 0 до максимального значения).

**Влияние канатоведущего шкива.** Канатоведущий шкив (или барабан навивки) подъемной установки является ее главным движущим органом. В то же время его влияние на динамику системы «канаты – сосуды – армировка» кроме позитивного, технически необходимого воздействия, имеет так же ряд негативных составляющих, которые способны в определенных условиях нарушить устойчивость работы систем «сосуд – армировка». Примерами таких негативных воздействий служат явления, рассмотренные в работах [2 – 9]. Их влияние на параметры безопасности систем «сосуд – армировка» проиллюстрировано в форме «динамического графа» и описано общей диагностической моделью ШПУ [10, 11].

Физический механизм этого влияния имеет две составляющие:

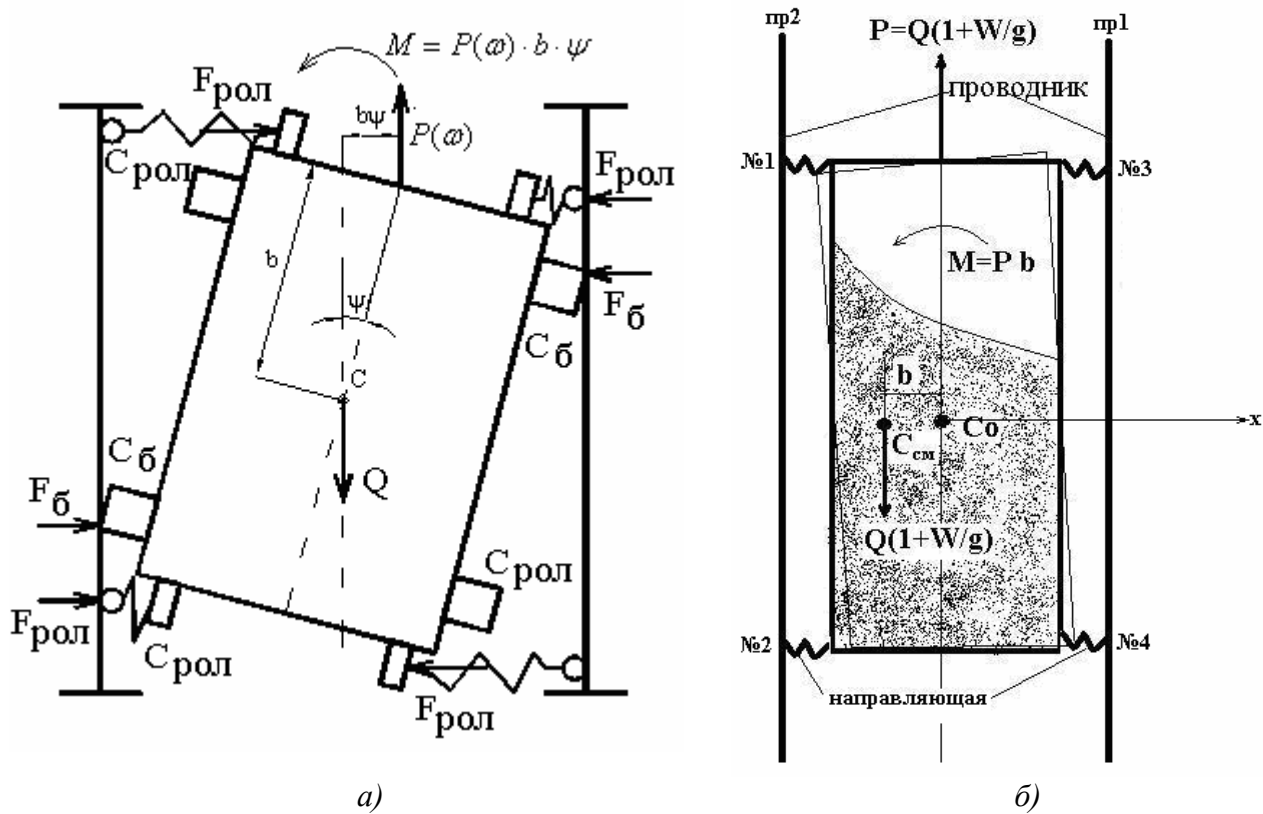
- периодическое горизонтальное отклонение точки подвеса каната от общей вертикали с центром масс сосуда, имеющее частоту его угловых колебаний (периодическое образование переменного плеча силы натяжения каната относительно центра масс в сочетании с периодическим изменением натяжения каната, имеющего частоту вертикальных колебаний сосуда);

- статическое или квазистатическое (медленно меняющееся в процессе подъема) смещение точки подвеса каната в одноканатной или «центра подвеса» в многоканатной установке от общей вертикали с центром масс сосуда и образование его перекоса в проводниках с постоянным поджатием к проводникам башмаков скольжения, диагонально расположенных на верхнем и нижнем поясах рамы из-за смещения груза в сосуде, перекоса рамы сосуда, неправильного монтажа башмаков скольжения, квазистатического разбаланса натяжений головных канатов.

Схемы взаимодействия показаны на рис. 1.

В первом случае на сосуд действует периодический опрокидывающий момент силы  $P(\omega)$  натяжения каната относительно центра масс  $C$ , изменяющейся с частотой вертикальных колебаний сосуда  $\omega$ .

$$M = P(\omega) \cdot b \cdot \psi.$$



: (а) – влияние переменного опрокидывающего момента от каната;  
 (б) – влияние смещения центра масс сосуда

Рисунок 1 – Расчетные схемы влияния натяжения каната на угловые перемещения подъемного сосуда

В такой системе при кратных соотношениях частот вертикальных системы «канат – сосуд» и угловых колебаний сосуда наступает явление параметрического резонанса, которое в системе с жесткой арматурой вызывает ударно-циклические взаимодействия башмаков с проводниками, а в системе с канатными проводниками - угловую раскачку подъемного сосуда и снижения зазоров безопасности между соседними сосудами при их встречном движении [12, 13].

Во втором случае перекус сосуда приводит к непроектному снижению кинематических зазоров между рабочими поверхностями башмаков и пары пространственно искривленных проводников. При вертикальном движении сосуда такой перекус под действием силы натяжения каната (даже постоянной) приводит к жесткому столкновению граней башмаков с набегающими навстречу движению сосуда гранями проводников и возбуждению в системе ударно-циклического режима взаимодействия [14].

**Влияние диаграммы окружной скорости вращения барабана.** Наиболее сильное влияние со стороны подъемной машины проявляется при вращении барабана с переменным ускорением в рабочем режиме и во время аварийного торможения. Замеренные экспериментально осциллограммы окружной скорости и ускорения барабана приведены на рис. 2.

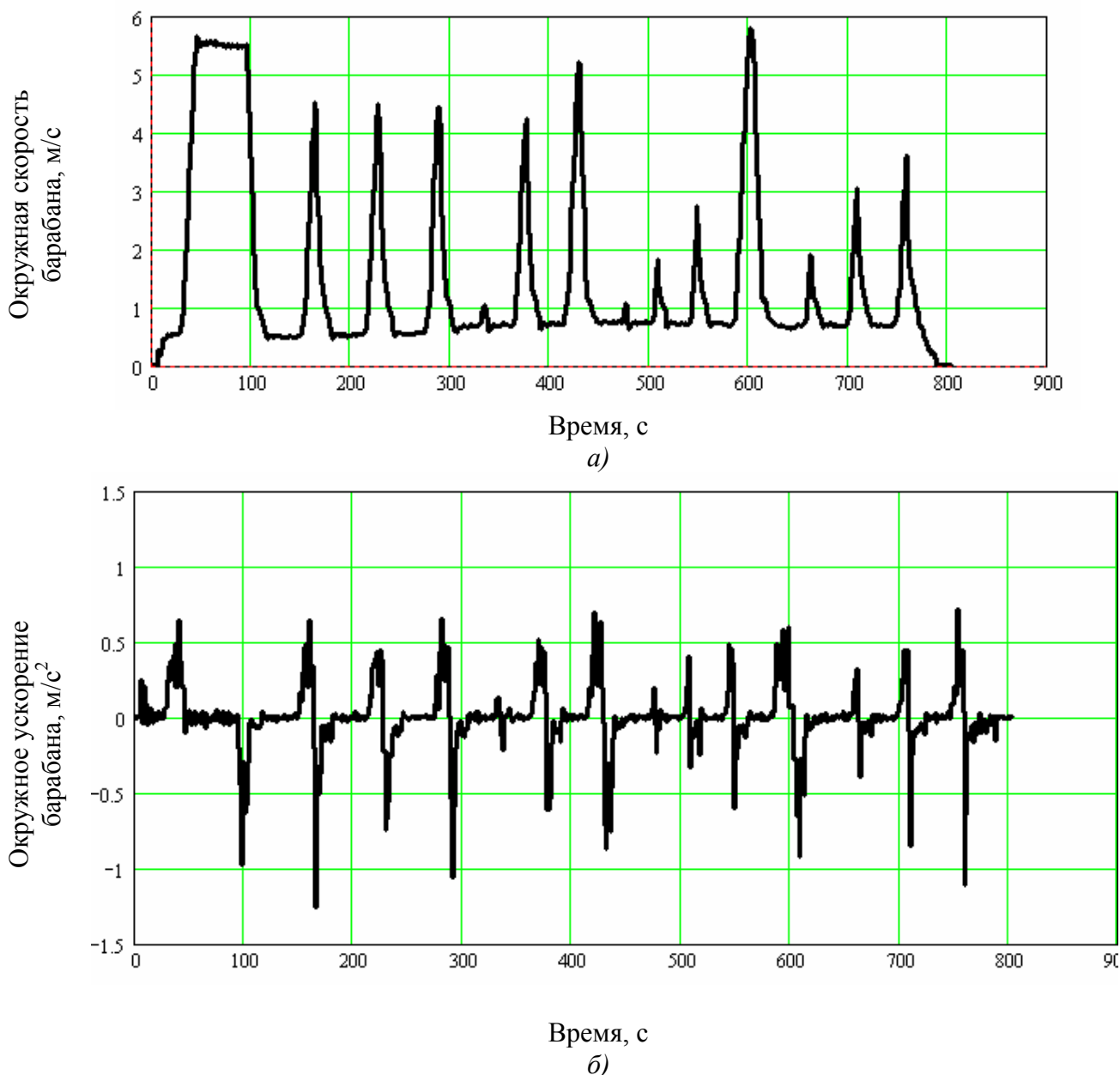


Рисунок 2 – Диаграммы окружной скорости (а) и ускорения (б) барабана клетевой подъемной машины

Из анализа графиков на рис. 2 понятно, что в точках изгиба диаграммы скорости появляется ускорение или замедление движения сосуда, которое неизбежно приводит к кратковременному упругому растяжению каната и появлению дополнительных вертикальных колебаний сосуда.

Видно, что в данной подъемной установке максимальные окружные ускорения барабана достигают 1,2 – 1,3 м/с<sup>2</sup>. Эти рывки передаются на верхний конец головного каната установки и через него на подъемный сосуд.

На рис. 3 приведены замеренные экспериментально осциллограммы вертикального ускорения клетки и ее контактные нагрузки на армировку.

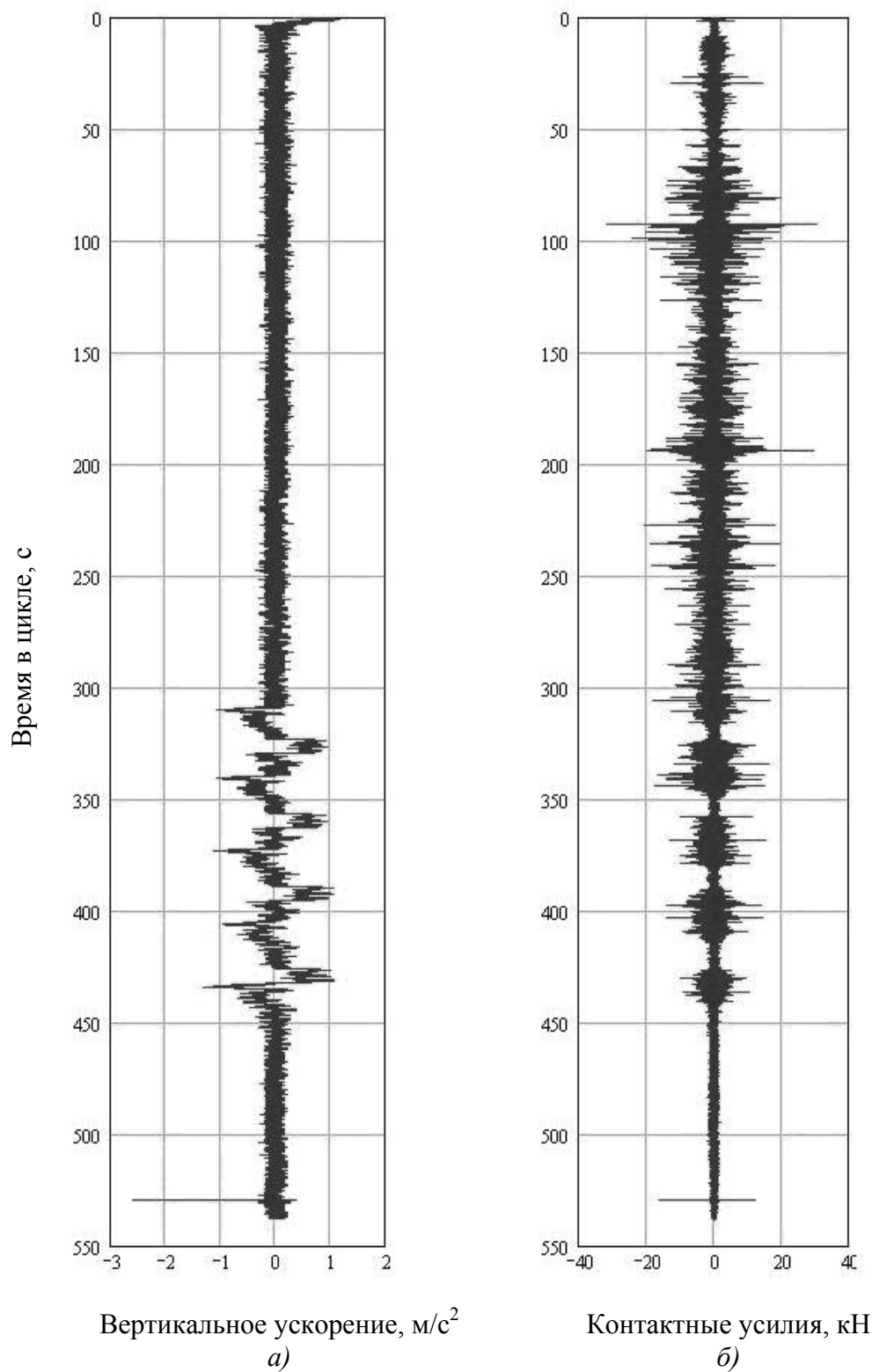


Рисунок 3 – Вертикальные ускорения (а) и горизонтальные нагрузки (б) на армировку при спуске клетки

Видно, что при каждом изменении (снижении с последующим ускорением) скорости при проходе мимо рабочих горизонтов от 300-й до 450-й секунды движения синхронно возникали всплески вертикального ускорения клетки до 1,0 – 1,2 м/с и горизонтальные нагрузки на проводники до 15 – 18 кН. На вы-



шележащих участках всплески горизонтальных нагрузок до 25 – 30 кН происходили на участке движения с постоянной максимальной скоростью 4 м/с и были вызваны нарушениями вертикальности проводников.

Последствиями таких рывков могут быть систематически возникающие в одних и тех же точках ствола вертикальные колебания сосуда на канате, которые вызывают возбуждение его горизонтальных колебаний и повышенные динамические нагрузки на жесткую армировку.

На рис. 4 приведены графики горизонтальных нагрузок на армировку в за

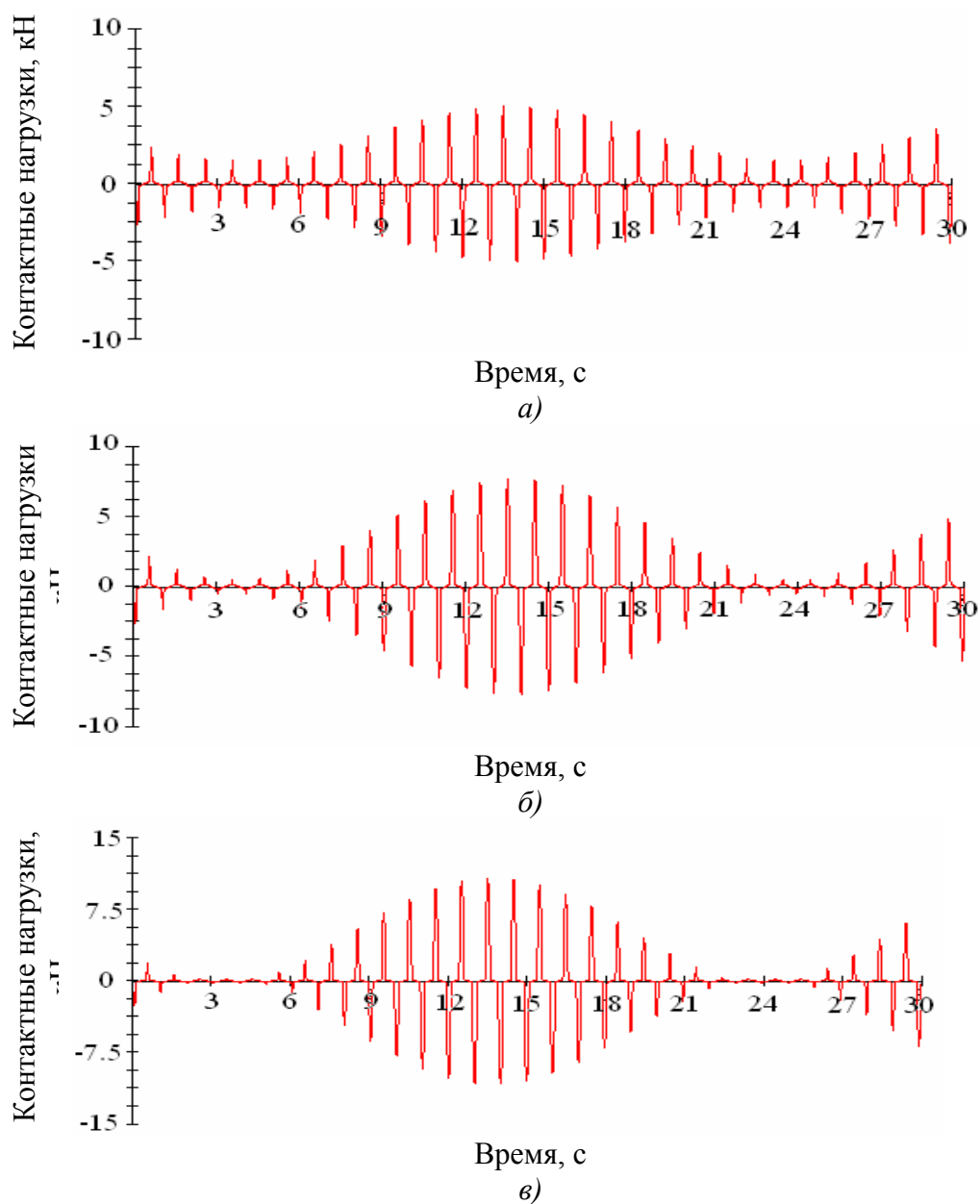


Рисунок 4 – Контактные нагрузки на армировку при вертикальном ускорении/замедлении подъемного сосуда: (а) – 1 м/с<sup>2</sup>; (б) – 2 м/с<sup>2</sup>; (в) – 3 м/с<sup>2</sup>

висимости от величины окружного ускорения/замедления барабана для вариации значений вертикального ускорения (замедления подъемной машины) от

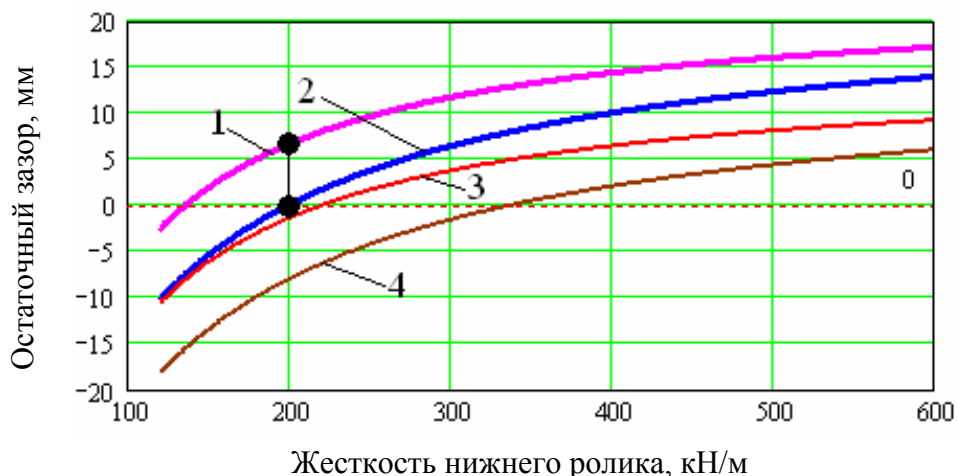
Эти результаты показывают, что параметрическая модуляция вертикальными колебаниями подъемного сосуда горизонтальных приводит к возникновению перекачки энергии вертикальных колебаний в горизонтальные, носящий характер, похожий на режим «биения». Амплитуда максимальных контактных нагрузок на проводники растет с увеличением амплитуды вертикальных ускорений/замедлений сосуда. Это значит, что чем более неравномерной будет диаграмма скорости вращения барабана подъемной машины, тем большими в этих местах ствола будут всплески горизонтальных нагрузок направляющих сосуда на проводники армировки или сверхнормативные упругие деформации гибких канатных проводников.

**Влияние разбаланса натяжений головных канатов.** Причиной создания неблагоприятного воздействия разбаланса натяжений головных канатов на динамику системы «сосуд – армировка», которое может привести к созданию аварийно опасной ситуации, является то, что в нормативных документах [15, 16], регулирующих этот процесс, каких-либо ограничений на распределение перегрузок между канатами, расположенными по разные стороны от вертикальной оси симметрии сосуда не устанавливается и не учитывается, что разбаланс натяжений создает опрокидывающий момент, действующий на верхний пояс сосуда, и вызывает его перекос в колее проводников.

Согласно п. 439 [15] и п. 399 [16] допускается максимальная относительная перегрузка головных канатов на 25% при верхнем положении сосуда и на 15% при нижнем. При этом в [16] указывается, что если «относительная перегрузка одного из канатов превысила указанные пределы, то установка должна быть остановлена для регулировки распределения нагрузок». В [15] говорится только об «относительной перегрузке канатов» и не уточняется их количество. Таким образом, данные формулировки допускают эксплуатацию многоканатных ШПУ с относительными перегрузками нескольких канатов, находящихся по одну сторону от вертикальной оси сосуда, незначительно меньших указанных предельных значений и с такими же ослаблениями с противоположной.

Данные положения направлены на обеспечение непроскальзывания отдельных канатов по шкиву трения во всех возможных режимах работы установки. При перекосе сосуда значительно уменьшаются кинематические зазоры в парах «башмак – проводник» в сторону перегруженных канатов (вплоть до расклинивания сосуда в проводниках) из-за чего в худшую сторону меняется картина динамического взаимодействия сосуда с армировкой [17].

Изменение остаточного кинематического зазора при подъеме сосуда в зависимости от жесткостей упругих роликовых направляющих показано на рис. 5. Выбрав на кривой 1 точку, соответствующую фактической жесткости роликов на нижнем поясе сосуда и опустив от нее по вертикали перпендикуляр на ось абсцисс до кривой 2, мы получим значение остаточного зазора, с которым сосуд придет в разгрузочные устройства.



- 1 – остаточный зазор в нижнем положении сосуда в стволе при начальном зазоре 23 мм;  
 2 – остаточный зазор в верхнем положении сосуда в стволе при начальном зазоре 23 мм;  
 3 – остаточный зазор в нижнем положении сосуда в стволе при начальном зазоре 15 мм;  
 4 – остаточный зазор в верхнем положении сосуда в стволе при начальном зазоре 15 мм

Рисунок 5 – Графики зависимости остаточного кинематического зазора в нижнем и верхнем положениях поднимающегося сосуда от жесткости нижних роликовых направляющих

Рассмотрим пример 4-х канатной установки с жесткостью роликов 200 кН/м, базовом зазоре 23 мм (соответствует предельно допустимому значению для изношенных вкладышах предохранительных башмаков), допустимом разбалансе натяжений 24,9% в нижнем положении сосуда, когда 2 правых каната перегружены, а 2 левых ослаблены. По кривой 1 видим, что от базового значения 23 мм остаточный зазор уменьшится до 6,5 мм уже при старте сосуда. Кривая 2 для этой же жесткости 200 кН/м показывает, что в разгрузку сосуд придет с нулевым значением зазора, то есть в расклиненном состоянии. Аналогичные результаты дает анализ этого процесса для случая, когда на сосуде установлены новые вкладыши башмаков с номинальным зазором 15 мм на сторону (кривые 3 и 4).

Отрицательные значения остаточного зазора на рис. 4 соответствуют подъему сосуда по стволу в режиме расклинивания с постоянным скольжением нижнего башмака по проводнику в ударно-циклическом режиме.

**Влияние нарушения цилиндричности шкива.** Еще одним источником негативного воздействия подъемной машины на динамику системы «сосуд – армировка» является периодическое возбуждение верхних концов канатов барабаном, имеющим нарушение цилиндричности канатоведущих канавок в следствии его эллиптичности или неравномерного износа футеровки по окружности. Это возбуждение передается во время всего движения подъемного сосуда по стволу на канатов с определенной амплитудой. Его частота равна частоте вращения барабана и пропорциональна скорости подъема [2].

Так как частота вертикальных колебаний системы «канат – сосуд» непрерывно меняется при подъеме (от минимума внизу ствола до максимума вверху), то на некотором участке, соответствующем их совпадению, возникает

внешний резонанс.

При этом может возникнуть два типа аварийных ситуаций. Во-первых, из-за ослабления каната выше определенной величины может осуществиться ошибочное срабатывание системы защиты установки от обрыва каната находящимся в клетке парашютным устройством и на полной скорости произойти ее зависание на тормозных канатах в стволе. В результате этого произойдет резкое торможение клетки и динамический удар по тормозным канатам, головному канату и подъемной машине. При наличии людей в клетке такое резкое замедление может привести к их падениям и травмам.

Во вторых, вертикальная раскачка сосуда на упругом канате, как было описано выше, создает возбуждения интенсивных горизонтальных колебаний сосуда и удары по армировке. Их появление и интенсивность не зависят от геометрических параметров кривизны проводников и являются исключительно следствием нарушений в подъемной машине.

На рис. 6 приведен график зависимости амплитудных коэффициентов вертикальных колебаний сосуда от его положения в стволе в описанном случае. Из него видно, что при совпадении частот возмущений с собственными частотами горизонтальных колебаний сосуда возникает кратковременный рост амплитуд вертикальных колебаний сосуда, который может инициировать жесткие удары предохранительных башмаков по проводникам армировки на резонансном участке по глубине ствола.

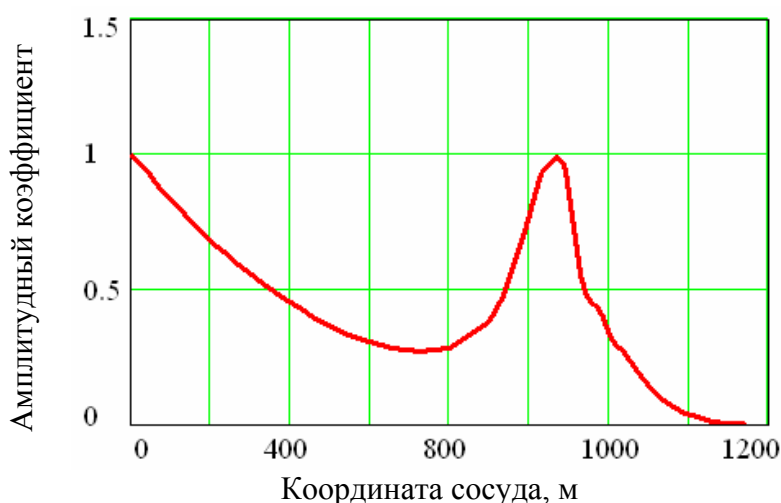
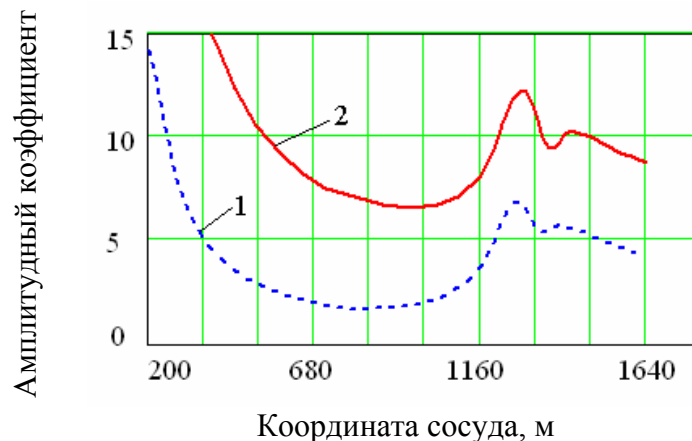


Рисунок 6 – График зависимости амплитудных коэффициентов вертикальных колебаний сосуда от его положения в стволе

**Влияние характера сцепления каната с футеровкой.** Аналогичная картина наблюдается в двухконцевой подъемной установке со шкивом трения. Оно происходит из-за того, что при перематке в точке набегания на шкив происходит фрикционное сцепление профилированной поверхности каната с притертой к ней и такой же профилированной поверхностью футеровки. В этом случае перейдя через шкив в точку схода, канат набегающей ветви передает в сбегающую ветвь свои упругие деформации, имеющие знакопеременную со-

ставляющую и сформировавшиеся от вертикальных колебаний поднимающегося сосуда. Это возбуждает на верхних концах опускающейся ветви постоянное возбуждение с амплитудой и частотой поднимающейся, непрерывно изменяющиеся во время подъема [2].

На рис. 7 приведен график зависимости амплитудных коэффициентов вертикальных колебаний опускающегося сосуда по угловой и вертикальной степеням свободы.



1

1 – вертикальные колебания сосуда; 2 – угловые колебания сосуда

Рисунок 7 – Графики зависимости амплитудных коэффициентов колебаний опускающегося сосуда от его положения в стволе

Видно, что в зоне, где частоты колебаний в обеих ветвях становятся близкими по значению, влияние динамики поднимающейся ветви на колебания опускающейся приобретает существенное значение. Амплитуды первых гармоник главных колебаний увеличиваются. На этих участках в опускающейся ветви реализуется параметрический резонанс по продольным колебаниям системы «канат – сосуд». Величины роста амплитуд колебаний и интенсивность ударов по арматуре зависят от параметров системы, скорости подъема и диссипации энергии.

**Влияние податливости приводных устройств.** Приводные устройства двухконцевой многоканатной подъемной машины (шкив, вал, редуктор) являются достаточно массивными элементами, совершающими вращательное движение. Однако в большегрузных установках, работающих с глубин, превышающих 1,5 км при снаряженной массе сосудов до 100 т инерционность поступательно движущихся частей (канаты, сосуды) настолько велика, что может оказывать существенное влияние на возможность жесткой отработки заданной диаграммы скорости. Колебательные процессы, происходящие в обеих ветвях установки, имеют неизбежное взаимовлияние через ведущий шкив [2]. В результате этого взаимовлияния, при определенном соотношении частот колебаний, между ними становится возможным нарастание интенсивности энергетического обмена между вертикальными колебаниями поднимающегося и опускающегося сосудов.

На рис. 8 приведены графики зависимости амплитудных коэффициентов вертикальных колебаний сосудов двухконцевой многоканатной установки. Представленные кривые показывают характер изменения амплитудных коэффициентов колебаний сосудов поднимающейся и опускающейся ветвей установки, вызванных податливостью приводных устройств подъемной машины на частотах первых гармоник продольных колебаний канатов.

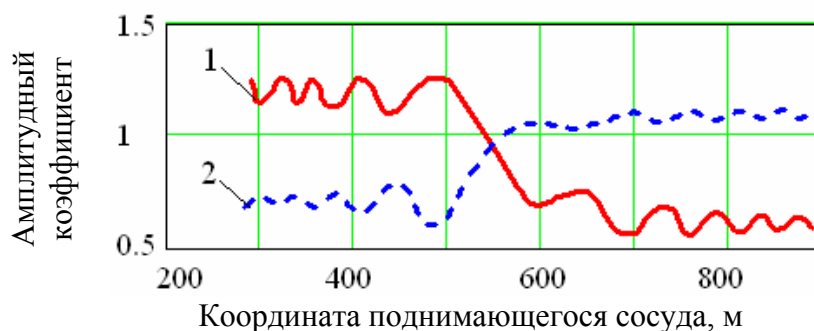


Рисунок 8 – Графики амплитудных коэффициентов вертикальных колебаний опускающегося (кривая 1) и поднимающегося (кривая 2) сосудов

Видно, что при прохождении сосуда участками ствола, где частоты собственных колебаний обеих ветвей становятся близкими по значению, характер их вертикальных колебаний меняется. Амплитуда вертикальных колебаний поднимающегося сосуда уменьшается с одновременным увеличением амплитуды опускающегося. В данном случае энергия колебаний поднимающегося сосуда переходит в энергию колебаний опускающегося.

Так как вертикальные колебания канатов в силу параметрических свойств системы «канаты – подъемный сосуд» неизбежно влияют на поворотные колебания сосудов, то любой рост амплитуд вертикальных колебаний вызовет аналогичный рост амплитуд колебаний сосуда в горизонтальной плоскости и появление жестких соударений с проводниками.

Описанное выше явление может быть первоисточником нарушений горизонтальной плавности движения опускающегося сосуда, которое будет систематически на каждом цикле спуска – подъема возникать в одной и той же точке ствола, создавать дополнительные динамические нагрузки на армировку и вызывать усиленный износ проводников.

Выявление этого источника нарушений плавности движения сосуда возможно только на основании расчетов путем математического моделирования. Для уменьшения его негативного влияния на подъемную систему необходимо обеспечить максимальное снижение начальных вертикальных колебаний сосуда на этом участке армировки, вызванных уступами на стыках проводников или местными искривлениями их профиля.

**Влияние параметров расположения груза в сосуде.** При эксплуатации центр масс подъемного сосуда из-за неоднородности засыпанного груза или погрешностей в расположении жестких башмаков скольжения всегда имеет некоторое горизонтальное смещение от вертикальной оси головного каната

(или центра подвеса для многоканатных установок). Это создает момент пары сил «натяжение каната – сила веса груза», который наклоняет сосуд в вертикальной плоскости и уравнивается моментом сил реакции упругих направляющих. Это касается и скиповых и клетевых подъемных установок, причем на клетевых подъемах эксцентриситет расположения центра масс может иметь гораздо большую величину, чем на скиповых при спуске/подъеме негабаритного груза (рис. 1б).

В этих условиях любые изменения окружной скорости барабана неизбежно возбуждают гармонические вертикальные колебания сосуда на фоне его стационарного монотонного движения по стволу с вертикальным ускорением  $W$ . Вертикальные колебания сосуда возбуждают горизонтальные угловые колебания вокруг его главных осей инерции, сопровождающиеся повышенными контактными нагрузками на армировку, не связанными с кривизной проводников, но зависящими от величины горизонтального смещения груза в сосуде. Результат исследования зависимости контактных нагрузок от величины смещения груза при подъеме по одной и той же диаграмме скорости показан на рис. 9. На рис. 9 приняты следующие обозначения кривых: 1 – направляющая №1; 2 – направляющая №2; 3 – направляющая №3; 4 – направляющая №4 [14].

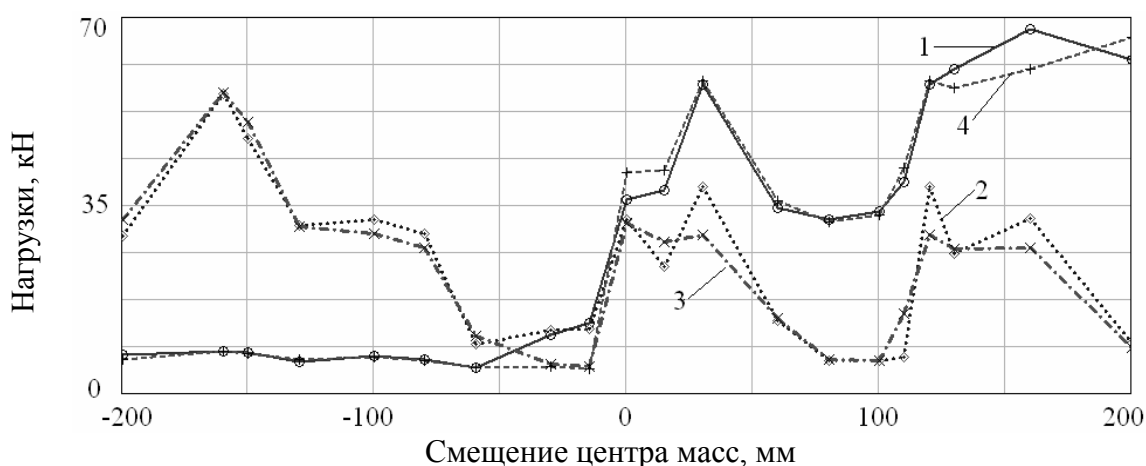


Рисунок 9 – Зависимость максимальных контактных нагрузок на армировку при подъеме скипа в зависимости от смещения центра масс груза

Данный пример характерен тем, что иллюстрирует поведение скипа с вариацией смещения от минимально значения до максимального  $\pm 200$  мм. При большом смещении груза ролики не могут удержать его от расклинивания в проводниках и скип движется в состоянии близком к расклиниванию в проводниках диагональными башмаками №1, №4 или №2, №3 с очень малыми кинематическими зазорами. В этом случае в реакции скипа доминирует отклик на возмущения со стороны проводников в виде ударно-колебательного режима взаимодействия.

Уровень максимальных нагрузок имеет явно выраженную тенденцию к росту с увеличением смещения груза в обе стороны, но после величины около 150 мм начинает снижаться. Это происходит когда скип под действием смещенного

груза сдавливает пружины диагонально расположенных на скипе роlikоопор, и взаимодействие происходит при доминирующем контакте скольжения. Динамические нагрузки при скольжении меньше, чем при чисто ударном взаимодействии с возможностью раскачки в пределах большого кинематического зазора. То есть, в режиме ударного взаимодействия уровень максимальных нагрузок на конкретном башмаке сосуда изменяется в обратной зависимости от величины базового кинематического зазора между ним и проводником.

**Влияние параметров армировки ствола.** Наибольшее возмущающее воздействие на подъемный сосуд в рабочих режимах движения оказывает профиль системы проводников отделения. Назначение роликовых амортизаторов состоит в том, чтобы нейтрализовать возмущения, вызванные нарушением вертикальности проводников и обеспечить проектный бесконтактный режим движения. Практика эксплуатации показывает, что в стволах с нарушенной геометрией при сроках службы более 40 – 50 лет достижение такого режима в подавляющем большинстве случаев очень проблематично.

На рис. 10 приведены графики лобовых профилей проводников отделения рудоподъемного ствола и контактных нагрузок на проводники со стороны скипа.

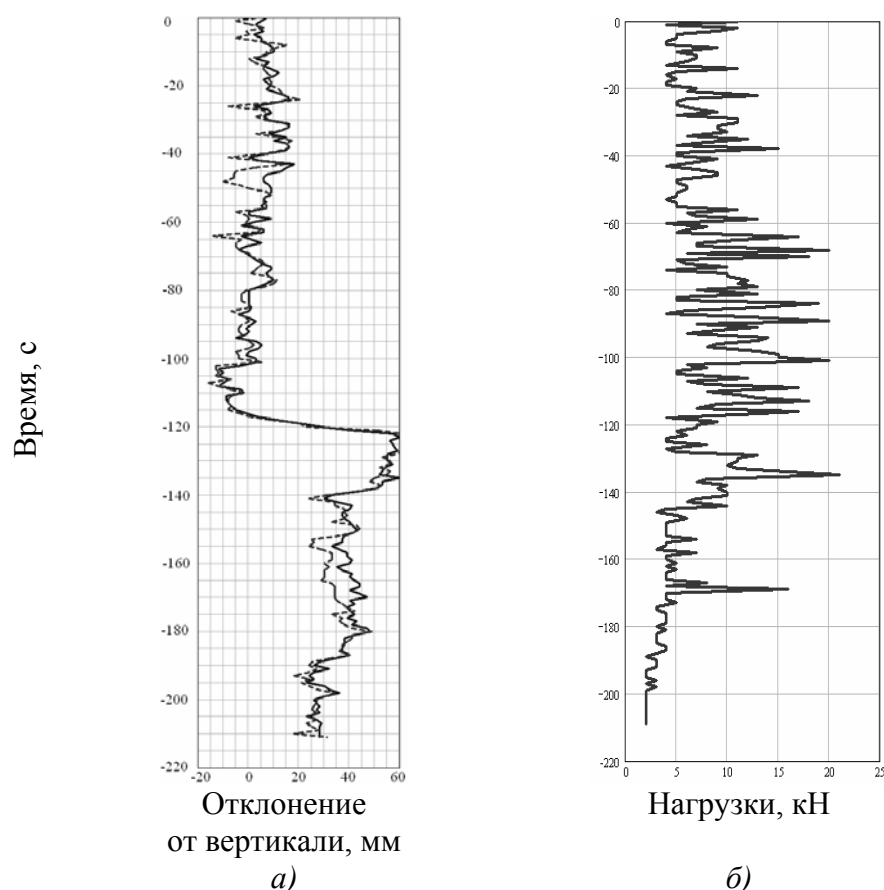


Рисунок 10 – Графики лобовых профилей проводников (а) и контактных нагрузок (б) при подъеме южном скипа в стволе ГС–2

Срок эксплуатации ствола более 50 лет. Ствол находится в области зоны сдвижения горных пород. Глубина ствола около 1200 м.



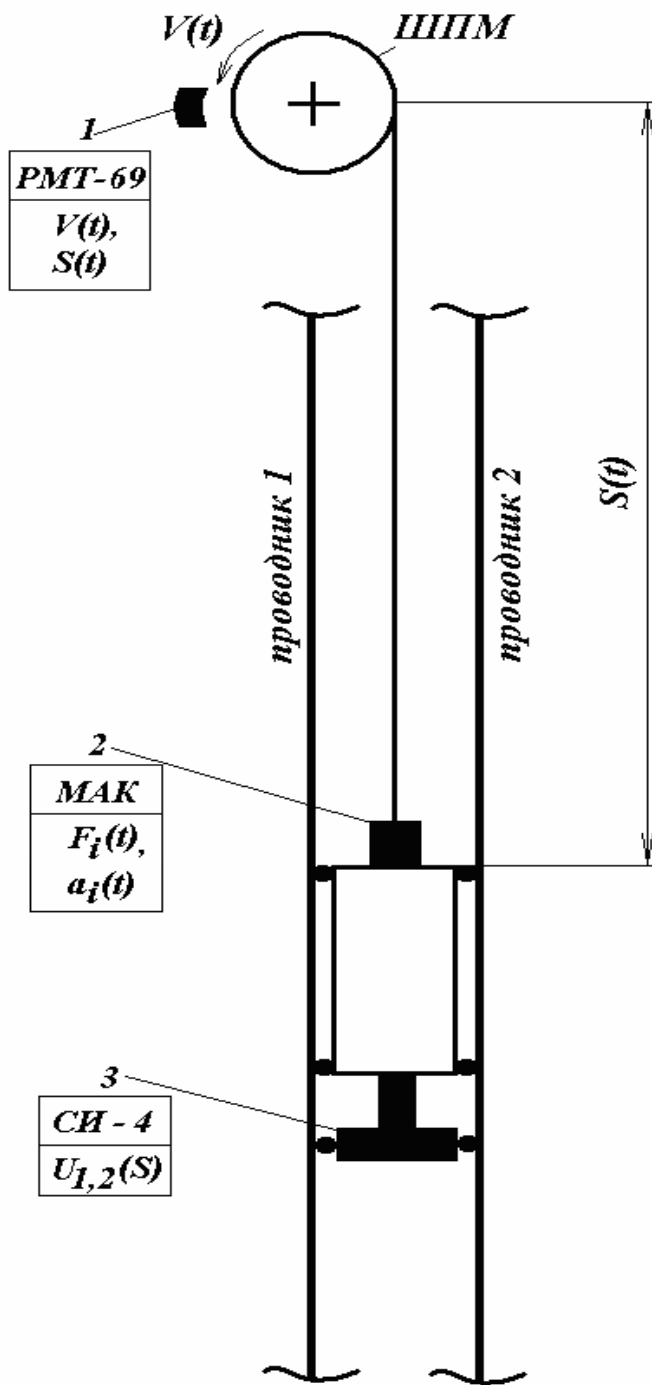
Видно, что абсолютные отклонения проводников от проектной вертикали достигают 60 – 80 мм, причем в средней части ствола на протяжении 40 ярусов (около 120 м) имеется глобальное знакопеременное искривление профиля. На подавляющем числе коротких участков стволов длиной 5 – 10 ярусов (2 – 3 длины сосуда) имеются значительные знакопеременные отклонения профилей от их плавных генеральных линий. Такие изломы профиля создают постоянные высокочастотные горизонтальные возмущения и инициируют повышенные ударные нагрузки сосудов на армировку (рис.9б). Амплитуды ударных нагрузок зависят от степени гладкости профилей проводников, кинематических зазоров и диссипативных параметров амортизаторов роликовых направляющих [18]. Такие нарушения вертикальности при скорости подъема свыше 6-7м/с могут вызывать аварийно опасные снижения запасов прочности армировки уже при 43-49% износа проводников и расстрелов.

**Обеспечение безопасности работы систем «сосуд – армировка» в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях.** Наиболее объективную картину динамического поведения системы «сосуд – армировка» по глубине ствола дают аппаратурные испытания. Они проводятся на серии тестовых циклов спуска – подъема груза на рабочих режимах и в режиме срабатывания предохранительного тормоза в заданных точках ствола. Такие испытания проводятся по специальной схеме, включающей вариацию скоростей движения сосуда и его загрузки в сочетании с геометрическими измерениями параметров профилей проводников. Схема размещения аппаратуры при испытаниях и регистрируемые параметры приведены на рис. 11.

На рис.12 приведена схема диагностирования системы «сосуд – армировка» с применением аппаратурных динамических испытаний и деформационно-прочностных расчетов.

Особенность данного метода заключается в том, что динамические испытания системы «подъемный сосуд – армировка» проводятся на серии рабочих циклов спуска/подъема сосуда по специальной программе и дополнительно проводятся испытания в режиме предохранительного торможения. Поярусные значения коэффициентов динамической перегрузки армировки, полученные в результате обработки данных испытаний, принимаются в качестве основных диагностических параметров для оценки технического состояния проводников и расстрелов ствола на участках с повышенным уровнем их износа.

Наибольшие динамические нагрузки испытывает армировка при срабатывании предохранительного тормоза подъемной машины на участке движения с максимальной скоростью, которое может произойти по сигналу любой из цепей защиты подъема при возникновении угрозы (реальной или ложной) аварийной ситуации. Практически, такое срабатывание может произойти в любой точке ствола. В связи с этим, для получения достоверной картины поведения конкретного подъемного сосуда при взаимодействии с армировкой целесообразно проводить исследования с аппаратурными измерениями динамических пара-



- 1 – аппаратура регистрации параметров вращения барабана ШПМ (окружная скорость  $V(t)$ , координата головного сосуда  $S(t)$ );
- 2 – аппаратура регистрации динамических параметров взаимодействия сосуда с проводниками (контактные усилия в башмаках скольжения  $F_i(t)$ , виброударные ускорения башмаков  $a_i(t)$ );
- 3 – маркшейдерская аппаратура для измерения отклонений профилей проводников от вертикали  $U_{1,2}(S)$ ;

Рисунок 11 – Схема измерений динамических и геометрических параметров системы «подъемная машина – сосуд – армировка»

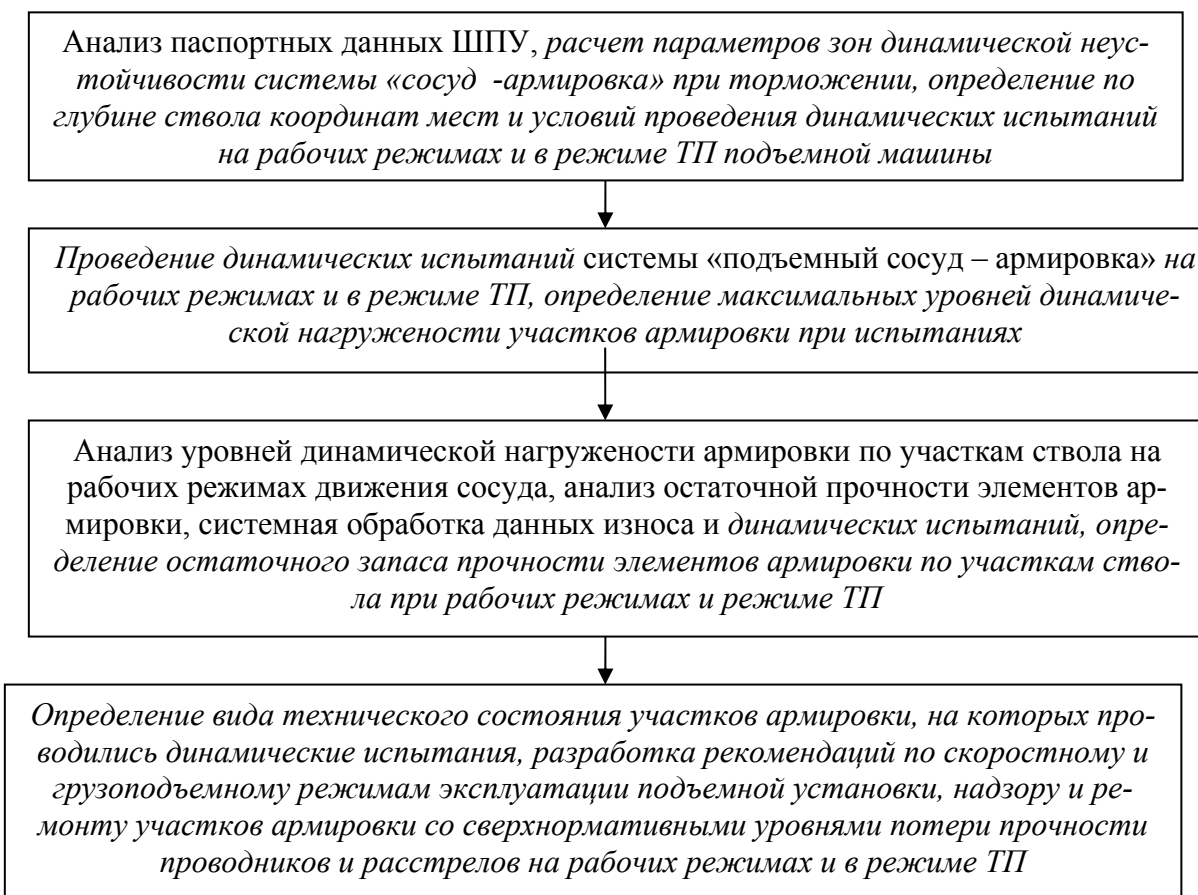


Рисунок 12 – Схема проведения диагностирования систем «подъемный сосуд – армировка»

метров подъемных сосудов и барабана подъемной машины на характерных участках, расположенных в контрольных точках верхней, средней и нижней частях ствола при спуске и подъеме сосуда с вариацией по загрузке и начальной скорости в момент торможения.

Реализация данного метода включает следующие этапы (рис. 12): предварительная обработка данных (анализ параметров ШПУ, выбор схемы и программы проведения динамических испытаний); проведение динамических испытаний системы «подъемный сосуд – армировка» (испытания в рабочих режимах работы подъемной машины и при предохранительном торможении); системная математическая обработка результатов динамических испытаний; разработка выводов и рекомендаций.

Основным этапом диагностирования системы является проведение ее динамических испытаний в рабочем режиме и режиме предохранительного торможения.

При проведении динамических инструментальных исследований информативными параметрами, дающими достаточно полное представление о характере движения подъемного сосуда в режиме торможения являются мгновенные значения следующих величин, регистрируемых в развертке по времени: горизонтальные ускорения направляющих подъемного сосуда на его верхнем и нижнем поясах; вертикальное ускорение подъемного сосуда; угловая частота вращения

(окружная скорость) барабана подъемной машины; сигнал включения предохранительного тормоза; длина головного каната в момент торможения (координата точки торможения подъемного сосуда в стволе); полное натяжение головного каната; время с начала торможения.

При системной обработке результатов динамических измерений совмещаются с данными маркшейдерской профилировки проводников для установления корреляционной связи между ними по участкам ствола.

Амплитудные значения динамических параметров для подавляющего большинства подъемных отделений отечественных шахтных стволов лежат в следующих диапазонах: линейных *горизонтальных* ускорений направляющих ( $0 - 10 \text{ м/с}^2$ ); линейных *вертикальных* ускорений направляющих ( $0 - 5, \text{ м/с}^2$ ); контактных усилий ( $0 - 90 \text{ кН}$ ).

Этап обработки данных, полученных при экспериментах, является не менее важным и трудоемким в сравнении с этапом проведения измерений

Цель обработки и анализа данных измерений состоит в определении качественных и количественных отличий процесса динамического взаимодействия сосуда с армировкой во время торможения от такого же процесса во время прохождения сосудом участка торможения с постоянной скоростью в рабочем режиме. Количественно эти отличия могут быть охарактеризованы с достаточной для практически точки зрения полнотой коэффициентом динамической перегрузки».

Качественная характеристика процесса взаимодействия сосуда с армировкой в процессе торможения состоит в определении закона изменений максимальных амплитуд динамических параметров горизонтальных колебаний сосуда во времени. При срабатывании ТП дополнительно определяется характер изменения этого параметра во времени колебательного процесса, то есть, является ли он убывающей, возрастающей, возрастающее – убывающей или постоянной во времени функцией и от каких параметров системы это зависит [19].

Поярусная синхронизация результатов динамических испытаний, данных измерений отклонений профилей проводников от вертикали, их параметрического анализа, данных измерений износа и расчетов несущей способности проводников и расстрелов дает возможность выявить наиболее слабые элементы в сечении каждого яруса армировки, а так же установить причины снижения остаточных запасов прочности металлоконструкций. На рис. 13 показан пример итоговой диаграммы безопасности, которая строится для каждого элемента конструкции яруса армировки и показывает поярусное соотношение между запасами прочности элементов, его остаточной прочности и уровнем фактического нагружения. Провалы на кривых допустимых нагрузок соответствуют потере прочности вследствие износа, пики на кривых фактических нагрузок соответствуют повышенным динамическим нагрузкам из-за нарушений вертикальности или других геометрических параметров системы проводников данного сосуда. Из графиков видно с каким фактическим запасом прочности эксплуатируется конкретный элемент армировки при данном режиме работы подъема.

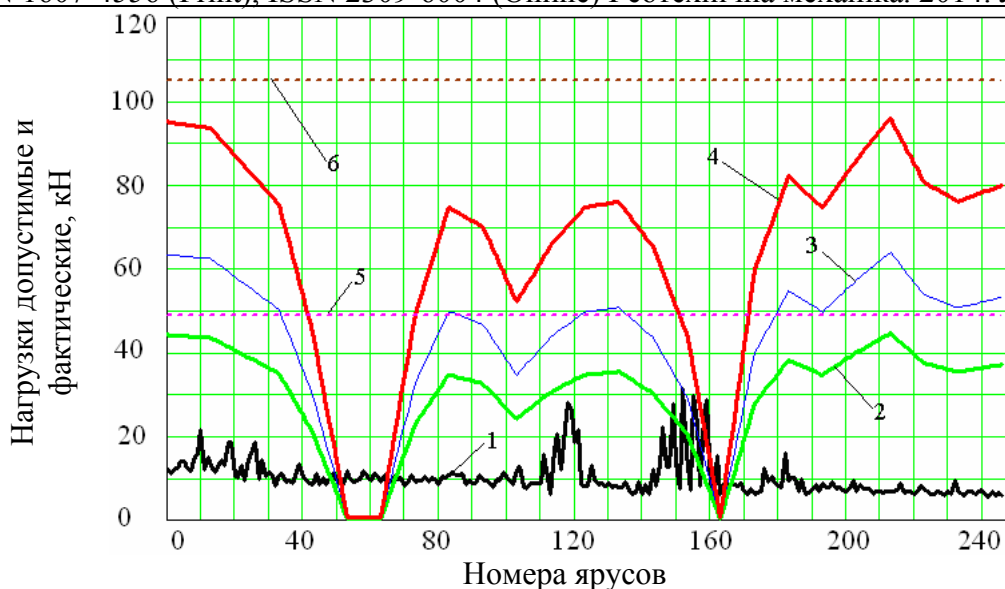


Рисунок 13 – Диаграмма безопасности нагружения армировки бокового расстрела контровесного отделения ствола

На рис. 13 приняты следующие обозначения: 1 – фактические максимальные нагрузки за все циклы динамических испытаний; 2 – допустимые нагрузки при запасе прочности 2,15; 3 – допустимые нагрузки при запасе прочности 1,5; 4 – допустимые нагрузки при запасе прочности 1,0; 5 – допустимые нагрузки при запасе прочности 2,15 для неизношенного расстрела; 6 – допустимые нагрузки при запасе прочности 1,0 для неизношенного расстрела.

Диаграмма показывает, что на участках ярусов 53..63 и 150..172 несущая способность расстрела резко снижена из-за повышенного износа и расчетный запас прочности меньше минимально допустимого 1,0 по пределу текучести. На участках ярусов 110..125 и 145..165 реализуется всплеск контактных нагрузок из-за нарушений вертикальности проводников. Однако на участке ярусов 110..125 этот всплеск не приводит к снижению запаса прочности ниже номинального значения 2,15, а на участке 157..172 он приводит к снижению запаса прочности ниже допустимого 1,0 из-за наложения нарушений профиля проводников на участок повышенно износа расстрела. Поэтому, на участке ярусов 53..63 необходимо восстановление несущей способности расстрела путем замены его балок или упрочнения существующей конструкции, а на участке 150..172 необходимо совместное восстановление несущей способности и спрямление проводников после местной профилировки.

Параметр «остаточный запас прочности» элементов металлоконструкции армировки под действием фактических эксплуатационных нагрузок является основным, определяющим степень аварийной опасности работы ствола. Минимально допустимым является значение запаса прочности равное 1,0, которое соответствует равенству фактических напряжений в наиболее нагруженном сечении металлоконструкции пределу текучести ее материала. Поэтому все мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации направляются на его повышение до номинальной величины 2,15, которое соответствует фактическим на-

пряжениям меньшим предела выносливости. При таком запасе прочности в металле не происходит накопления усталостных повреждений под действием циклических знакопеременных динамических нагрузений со стороны сосудов [11]. Достижение такого уровня может происходить несколькими способами.

Самым распространенным способом повышения запаса прочности является снижение скорости подъема на фиксированном участке ствола для уменьшения динамических нагрузок до безопасного уровня при неизменном профиле проводников и остаточной несущей способности армировки.

Для тех подъемных установок, на которых установлены компьютерные системы управления, эффективным способом снижения нагрузок является реализация сглаженных, минимизированных по рывку диаграмм скорости вращения барабана. На рис. 14 приведены графики традиционной и оптимизированной диаграмм скорости подъема и графики контактных нагрузок на армировку. Видно, что применение сглаженной диаграммы скорости позволяет почти 40 – 50% снизить контактные нагрузки на армировку за счет уменьшения вертикальных рывков верхних концов каната [14].

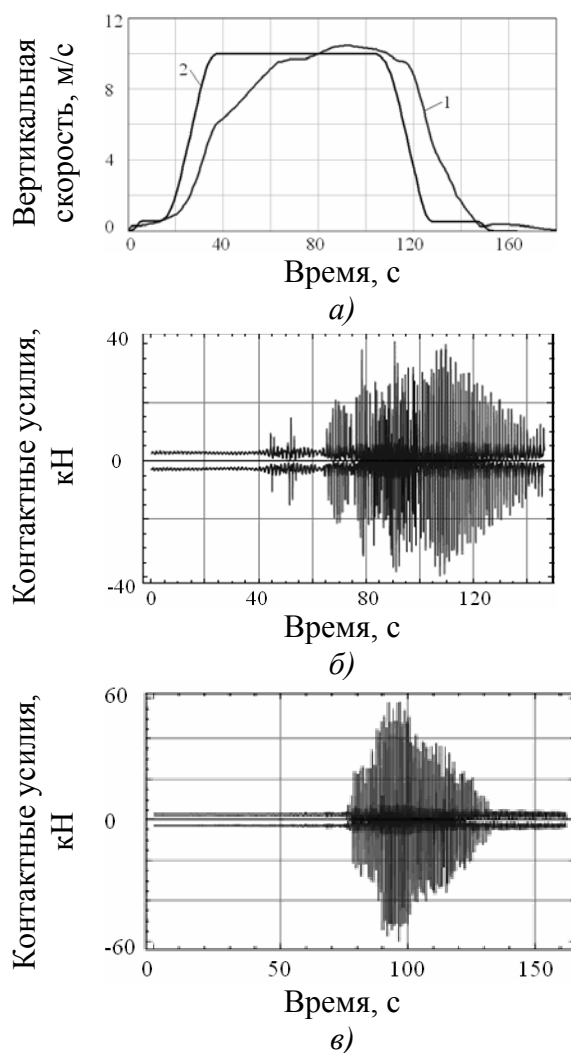


Рисунок 14 – Графики традиционной и оптимизированной диаграмм скорости подъема (а); графики контактных нагрузок на армировку при традиционной (б) и оптимизированной (в) диаграммам скорости

Бо́лее трудоемким является проведение местной профилировки и спрямление проводников на участках с наиболее сильными нарушениями вертикальности. Улучшению динамической ситуации также способствует применение роликовых направляющих с повышенными диссипативными свойствами амортизаторов. Самым трудоемким способом является замена изношенных балок расстрелов и проводников на новые. В некоторых случаях применяются балки с утолщенными по сравнению с проектом стенками, что приводит к необходимости дополнительных динамических расчетов и коррекции традиционных мероприятий по контролю их остаточной прочности в процессе износа [20].

На рис. 15 приведены примеры рекомендуемой нелинейной коррекции профилей проводников стволов, находящихся в зоне сдвижения горных пород.

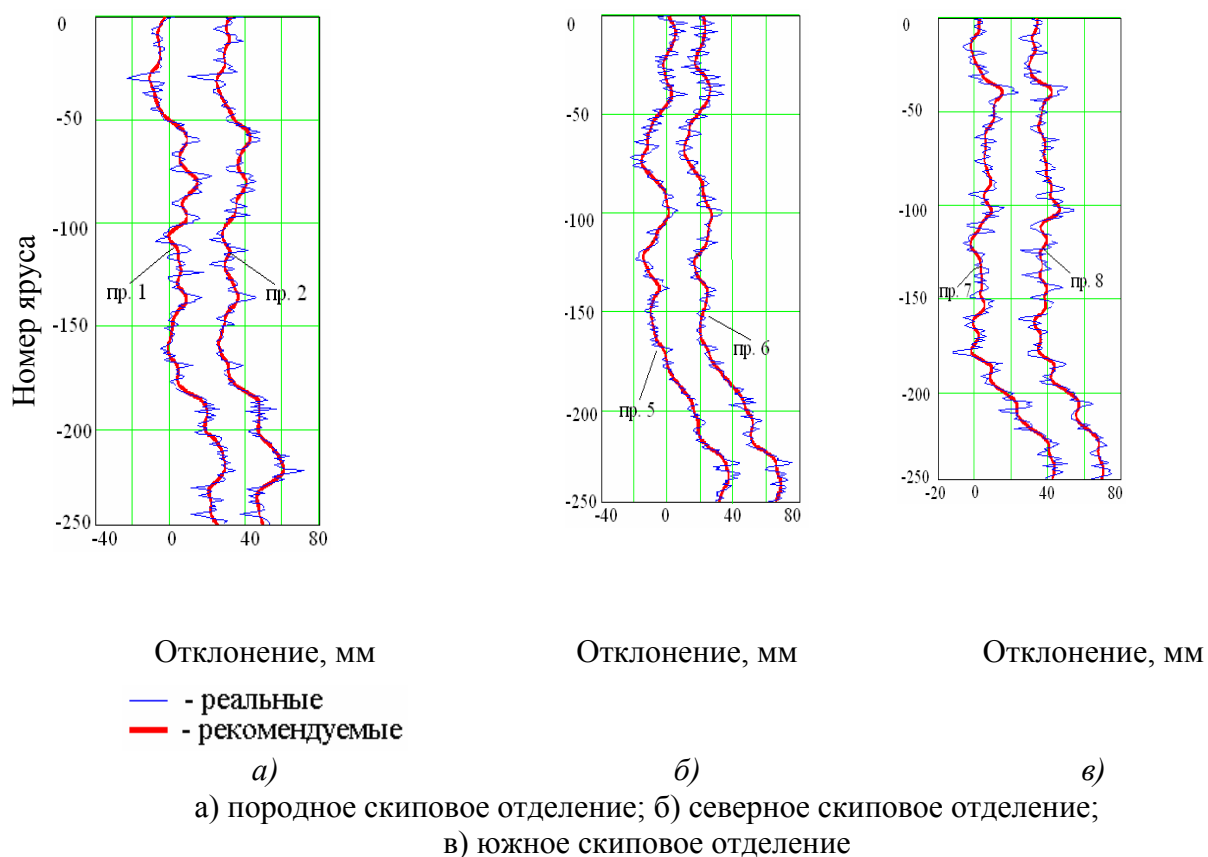
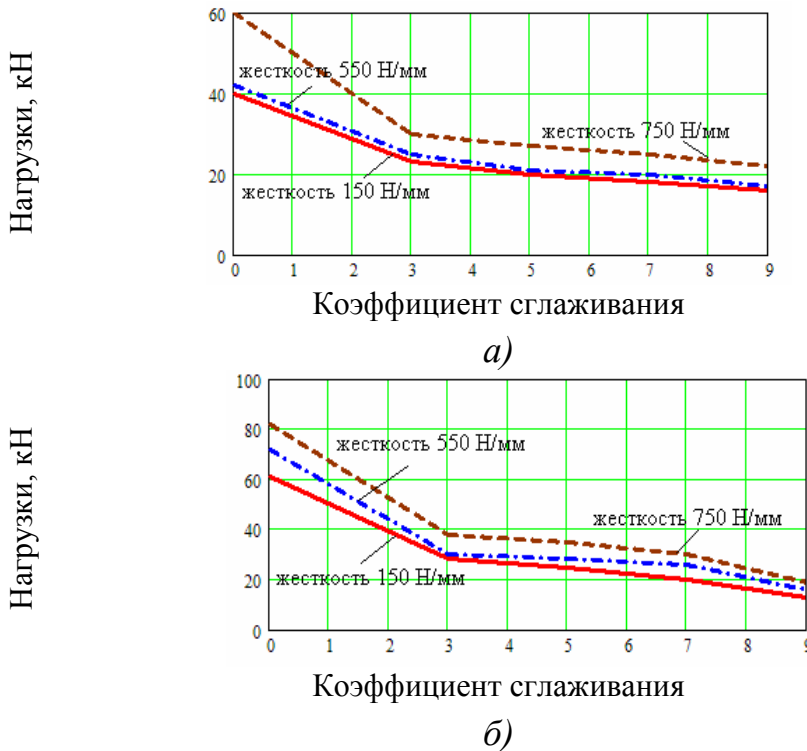


Рисунок 15 – Графики фактических и рекомендуемых профилей проводников ствола ГС-1 шахты ЗЖРК, рассчитанных по методу Гаусса

На рис. 16 приведены графики зависимости максимальных контактных нагрузок от величины коэффициента сглаживания профиля при различных значениях коэффициента диссипации амортизаторов роликовых направляющих. Видно, что комплексное применение этих мероприятий позволяет существенно снизить ударные нагрузки на армировку и тем самым без проведения замены металлоконструкций на новые вывести систему «сосуд – армировка» из аварийно опасного технического состояния [21].

Благодаря переходу систем «сосуд – армировка» на более высокий уровень эксплуатационной безопасности на рабочих режимах с определенным запасом

становится возможным повышение максимальной рабочей скорости подъема. Не смотря на некоторое повышение контактных нагрузок с ростом вертикальной скорости, сбалансированное применение комплекса мероприятий при систематическом аппаратурном контроле позволяет удерживать фактические запасы прочности металлоконструкций на уровне, обеспечивающем отсутствие спонтанного возникновения разрушений и аварийных ситуаций.



(а) – ствол ГС–2, проводники 7 – 8, (б) – ствол ГС–2, проводники 9 – 10

Рисунок 16 – Максимальные контактные нагрузки в зависимости от коэффициента сглаживания профиля проводников

В том случае, когда избежать аварии в стволе не удалось, единственным выходом является применение автономных спасательных подъемных установок, клеть которых опускается в ствол с застрявшим основным сосудом для доставки людей на поверхность. В силу разнообразия условия в околоствольном пространстве их применение в каждом конкретном случае так же требует специальных расчетов для определения безопасных параметров настройки систем управления рабочим ходом и режимом предохранительно торможения [22].

Разработанные методы диагностирования и восстановления уровня эксплуатационной безопасности систем «сосуд – армировка» более 15 лет применяются и успешно себя зарекомендовали практически во всех рудоподъемных в стволах Украины с жесткой армировкой под руководством органов Криворожского горнопромышленного территориального управления Госгорпромнадзора Украины через его специализированную Комиссию анализа состояния стволов.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Гаркуша, Н.Г. Об истории разрешения одной крупной проблемы горной механики XX века / Н.Г. Гаркуша // Горная электромеханика и автоматика: Межвед. науч. – техн. сб. – 1999. – Вып. 2(61). – С. 5 – 8.
2. Белобров, В.И. Динамика шахтных подъемных установок / В.И. Белобров, В.А. Дзензерский, В.И. Самуся, С.Р. Ильин // Изд. Днепропетровского университета. – 2000. – 380 с.
3. Ильин, С.Р. Влияние параметров аварийного торможения подъемной машины на динамику системы «сосуд – армировка» / С.Р. Ильин // Горная электромеханика и автоматика: Межвед. науч. – техн. сб. – 1999. – Вып. 2(61). – С. 52 – 57.
4. Ильин, С.Р. Диагностическая модель влияния нарушений цилиндричности канатоведущих шкивов на уровень динамического взаимодействия подъемных сосудов с армировкой шахтных стволов / С.Р. Ильин С.Р. // Геотехническая механика. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2000. – Вып.22. – С. 118 – 121. – Режим доступа: <http://geotm.dp.ua/index.php/ru>.
5. Ильин, С.Р. Закономерности динамического взаимодействия сосудов с жесткой армировкой вертикальных стволов многоканатной шахтной подъемной установки при переходных процессах движения / С.Р. Ильин, И.С. Ильина // Вид-во НГУ, Сборник научных трудов Национального горного университета. – Вып. 25. – Днепропетровск. – 2006. – С.108 – 113.
6. Ильин, С.Р. Влияние параметров диаграмм скорости вращения подъемных машин на динамические усилия в канатах и усталостные явления в элементах армировки ствола / С.Р. Ильин // Стальные канаты. – Вып. 8. – Экология. – Одесса. – 2010. – С.30 – 61.
7. Ильин, С.Р. / С.Р. Ильин, Г.Д. Трифанов, С.В. Воробель // Комплексные экспериментальные исследования динамики скипов рудоподъемного ствола. – Горное оборудование и электромеханика. – Вып. 5. – 2011. – С. 30 – 35.
8. Воробель, С.В. Влияние диаграммы скорости на динамические нагрузки в системе «подъемный сосуд – жесткая армировка» и деформацию рамы подъемного сосуда / С.В. Воробель, Г.Д. Трифанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – Вып. 12 – С. 16 – 19.
9. Воробель, С.В. Динамическое обследование жесткой армировки шахтных стволов / С.В. Воробель, А.А. Князев // Проблемы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых в Пермском крае: материалы краевой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2007. – С. 195-201.
10. Ильин, С.Р. Разработка и обоснование общей диагностической модели оборудования шахтных подъемных установок / С.Р. Ильин // Геотехническая механика. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2008. – Вып. 76. – С.44 – 63. – Режим доступа: <http://geotm.dp.ua/index.php/ru>
11. Ijlin, S.R. The Experience Of Dynamic Apparatus Control And Estimation Of Exploitation System Safety “Vessel – Reinforcement” Of Vertical Mining Shafts / S.R. Ijlin, B.S. Posled, L.G. Adorskaja, V.K. Radchenko, I.S. Ijina, S.S. Ijina // Transport szybowy. Monografia. Instytut Techniki Gornicej. 2013. – PP. 163 – 175.
12. Ильин, С.Р. Об устойчивости движения грузов в упругих проводниках при пространственном расположении точек крепления канатов для многоканатного подъема / С.Р. Ильин // Publ. Techn. Univ. Heavy Ind. – Miskolc, – 1981. Ser. A – Vol. 35. Fasc. 3 – 4 – P. 197 – 204.
13. Ильина, И.С. Разработка и обоснование метода диагностирования состояния систем «подъемный сосуд – армировка» при предохранительном торможении: дис... канд. техн. наук / И.С. Ильина. – Днепропетровск: НГУ МОН Украины. – 2005. – 160 с.
14. Ильин, С.Р. Влияние параметров диаграммы скорости подъема и эксцентриситета груза на динамику системы «сосуд – армировка» шахтных стволов /С.Р. Ильин // Геотехническая механика. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2012. – Вып. 98. – С.322 – 349. – Режим доступа: <http://geotm.dp.ua/index.php/ru/year-2012/98/330-ru98-40>.
15. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом // М.: «Недра», 1977. – 223 с.
16. Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт // Изд. 2-е стереотип. М.: «Недра». – 1976. – 303 с.
17. Ильин, С.Р. Влияние износа футеровки многоканатного шкива на взаимодействие подъемного сосуда с проводниками армировки ствола / С.Р. Ильин // В кн. Техническое обслуживание и ремонт шахтных стволов. Донецк. Изд. Юго-Восток. 5-е издание. т. 2. – 2013. С. 264 – 273.

18. Ильина, С.С. Исследование влияния параметров профилей проводников на динамику скипов в стволах с нарушенной геометрией / С.С. Ильина // Динамика и прочность машин: Сб. науч. трудов. – Харьков, ХПИ. – 2011. – Вып. 52. – С. 85 – 93.

19. Самуся, В.И. Методика и проведение экспериментальных исследований взаимодействия шахтных подъемных сосудов в режиме торможения с проводниками жесткой армировки вертикальных стволов в промышленных условиях / В.И Самуся, И.С. Ильина // Вісник НТУУ «КПІ»: Гірництво. – Вып. 11. – К., 2004. – С. 57 – 64.

20. Ильин, С.Р. Анализ влияния геометрических параметров коробчатых проводников на динамические деформационно-прочностные характеристики армировки в условиях износа / С.Р. Ильин, В.И. Василькевич // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – Вып. 9. – С. 54-67.

21. Ильина, С.С. Разработка и обоснование методов и средств снижения динамических нагрузок в системах «сосуд – армировка» вертикальных стволов с нарушенной геометрией: дис... канд. техн. наук / С.С. Ильина. – Днепропетровск: НГУ МОН Украины, 2011. – 161 с.

22. Самуся, С.В. Обоснование рациональных параметров и режимов эксплуатации аварийно-спасательных мобильных подъемных установок: дис... канд. техн. наук / С.В. Самуся. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. -2011. -154 с.

#### REFERENCES

1. Garkusha N.G. (1999), *Ob istorii razresheniya odnoj krupnoj problemy gornoj mekhaniki XX veka* [About history of solution of one great problem of mining mechanics of XX century], *Mining electromechanics and automatics*, no. 2(61), pp. 5 – 8.

2. Belobrov V.I., Dzenzerskij V.A., Samusya V.I., Iljin S.R. (2000), *Dinamika shahtnyh pod"emnyh ustanovok* [Dynamics of mining hoists], Dnepropetrovsk university, Dnepropetrovsk, Ukraine.

3. Iljin S.R. (1999), *Vliyanie parametrov avarijnogo tormozheniya pod"emnoj mashiny na dinamiku sistemy «sosud – armirovka»* [Influence of hoisting machine emergency parameters braking on the dynamics of the system "vessel - reinforcement"], *Mining electromechanics and automatics*, no. 2(61), pp. 52 – 57.

4. Iljin S.R. (2000), *Diagnosticheskaya model' vliyaniya narushenij cilindrichnosti kanatovedushchih shkivov na uroven' dinamicheskogo vzaimodejstviya pod"emnyh sosudov s armirovkoj shahtnyh stvolov* [Diagnostic model of the influence of traction sheave cylindricity violations on the dynamic interaction of lifting vessels with mine shafts reinforcement], *Geo-Technical Mechanics*, no. 22, pp. 118 – 121.

5. Iljin S.R. (2006), *Zakonomernosti dinamicheskogo vzaimodejstviya sosudov s zhestkoj armirovkoj vertikal'nyh stvolov mnogokanatnoj shahtnoj pod"emnoj ustanovki pri perekhodnyh processah dvizheniya* [Regularities of dynamic interaction between vessels and hard reinforcement of vertical shafts mine multiple-rope hoist during transient motion], *Collection of scientific labours of National mining university*, no. 25, pp. 108 – 113.

6. Iljin S.R. (2010), *Vliyanie parametrov diagramm skorosti vrashcheniya pod"emnyh mashin na dinamicheskie usiliya v kanatah i ustalostnye yavleniya v ehlementah armirovki stvola* [The influence of parameters of the speed winding diagrams of hoisting machines on the dynamic efforts in ropes and fatigue effects in the shaft reinforcement elements], *Steel ropes*, no. 8, pp. 30 – 61.

7. Iljin S.R., Trifanov G.D., Vorobel S.V. (2011), *Kompleksnyje jeksperimental'nye issledovanija dinamiki skipov rudopodemnogo stvola* [Complex experimental examinations of rock shafts skips dynamics], *Mining equipment and electrical mechanics*, no. 5, pp. 30 – 35.

8. Vorobel S.V., Trifanov G.D. (2011), *Vliyanie diagrammy skorosti na dinamicheskie nagruzki v sisteme «podjomnyj sosud – zhestkaja armirovka» i deformaciju ramy podjomnogo sosuda* [The impact of the speed diagram on the dynamic loadings in system of “lifting vessel - hard reinforcement” and deformation of the lifting vessel frame], *Mining equipment and electrical mechanics*, no. 12, pp. 16 – 19.

9. Vorobel S.V., Trifanov G.D., Knjazev A.A. (2007), *Dinamicheskoe obsledovanie zhjostkoj armirovki shahtnyh stvolov*, [Dynamic examination of mine shafts hard reinforcement], *Problems of complex development of mineral deposits in Perm region*, pp. 195 – 201.

10. Iljin S.R. (2008), *Razrabotka i obosnovanie obshchej diagnosticheskoy modeli oborudovaniya shahtnyh pod"emnyh ustanovok* [Development and substantiation of the common diagnostic model of mining hoisting plants equipment], *Geo-Technical Mechanics*, no. 76, pp. 44 – 63.

11. Iljin S.R., Posled B.S., Adorskaja L.G., Radchenko V.K., Iljina I.S., Iljina S.S. (2013), *The Experience Of Dynamic Apparatus Control And Estimation Of Exploitation System Safety “Vessel – Reinforcement” Of Vertical Mining Shafts*, *Transport szybowy*, pp. 163 – 175.

12. Iljin S.R. (1981), *Ob ustojchivosti dvizheniya gruzov v uprugih provodnikah pri prostranstvennom*

*raspolozhenii toчек krepleniya kanatov dlya mnogokanatnogo pod"ema* [About stability of the loads movement in elastic guides with spatial location of the ropes fixing points for multiple-rope hoist], *Publ. Techn. Univ. Heavy Ind.*, no. 35, pp. 197 – 204.

13. Iljina I.S. (2005), *Razrabotka i obosnovanie metoda diagnostirovaniya sostoyaniya sistem «pod'emnyj sosud – armirovka» pri predohranitel'nom tormozhenii* [Development and substantiation of diagnostics method of systems "lifting vessel - reinforcement" condition during safety braking], National mining university, Dnepropetrovsk, Ukraine. – 2005. – 160 p.

14. Iljin S.R. (2012), *Vliyanie parametrov diagrammy skorosti pod"ema i ehkscentrisiteta gruzu na dinamiku sistemy «sosud - armirovka» shahtnyh stvolov* [The influence of hoisting speed diagram parameters and load eccentricity on the mine shafts system "vessel - reinforcement" dynamics], *Geo-Technical Mechanics*, no. 98, pp. 322 – 349.

15. *Edinye pravila bezopasnosti pri razrabotke rudnyh, nerudnyh i rossypnyh mestorozhdenij podzemnym sposobom* [Single safety rules in the development of ore, non-ore and placer deposits with underground method] (1977), Nedra, Moscow, Russia.

16. *Pravila tekhnicheskoy ehkspluatatsii ugol'nyh i slancevyh shaht* [Rules of technical exploitation of coal and shale mines] (1976), Nedra, Moscow, Russia.

17. Iljin S.R. (2013), *Vliyanie iznosa futerovki mnogokanatnogo shkiva na vzaimodejstvie pod'emnogo sosuda s provodnikami armirovki stvola* [The effect of multiple-rope sheave lining wear on the interaction of lifting vessel with shaft reinforcement guides], *Technical maintenance and repair of mining shafts*, pub.5, vol. 2, pp. 264 – 273.

18. Iljina S.S. (2011), *Issledovanie vliyanija parametrov profilej provodnikov na dinamiku skipov v stvolah s narushennoj geometrijej* [Research of the influence of guides profiles parameters on the skips dynamics in shafts with broken geometry], *Dynamics and strength of machines*, no. 52, pp. 85 – 93.

19. Samusya V.I., Iljina I.S. (2004), *Metodika i provedenie jeksperimental'nyh issledovanij vzaimodejstvija shahtnyh pod'emnyh sosudov v rezhime tormozhenija s provodnikami zhestkoj armirovki vertikal'nyh stvolov v promyshlennyh uslovijah* [The methodology and realization of mine hoisting vessels experimental investigations in braking mode with guides of vertical shafts hard reinforcement in industrial environment], *Mining*, no. 11, pp. 57 – 64.

20. Iljin S.R. (2014), *Analiz vliyanija geometricheskikh parametrov korobchatyh provodnikov na dinamicheskie deformacionno-prochnostnye harakteristiki armirovki v uslovijah iznosa* [Analysis of the influence of geometrical parameters box guides on the dynamic deformation-strength characteristics of reinforcement in terms of wear], *Mining equipment and electrical mechanics*, no. 9, pp. №9. – 2014. – pp. 54-67.

21. Iljina S.S. (2004), *Razrabotka i obosnovanie metodov i sredstv snizhenija dinamicheskikh nagruzok v sistemah «sosud - armirovka» vertikal'nyh stvolov s narushennoj geometrijej* [Development and substantiation of methods and facilities of dynamic loadings reduction in systems "vessel - reinforcement" of vertical shafts with broken geometry], National mining university, Dnepropetrovsk, Ukraine. 2011. – 161 p.

22. Samusya S.V. (2004), *Obosnovanie racional'nyh parametrov i rezhimov jekspluatatsii avarijno-spasatel'nyh mobil'nyh pod'emnyh ustanovok* [Substantiation of rational parameters and modes of operation of rescue mobile hoisting plants], IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine. - 2011. -154 p.

### Об авторах

**Ильин Сергей Ростиславович**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией проблем диагностики и испытаний шахтных подъемных комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [iljin\\_sr@mail.ru](mailto:iljin_sr@mail.ru).

**Радченко Владимир Константинович**, ответственный секретарь Комиссии анализа состояния стволов КО Госгорпромнадзора Украины, директор ООО «АГАТ».

**Адорская Лариса Георгиевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина.

**Самуся Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина.

**Ильина Инна Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики, Госу-

дарственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» МОН Украины (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина.

**Ильина Светлана Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» МОН Украины (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина.

#### About the authors

**Iljin Sergej Rostislavovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief of the laboratory of diagnostics and tests of mining hoisting plants problems, Institute of geotechnical mechanics named by N.S. Polyakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [iljin\\_sr@mail.ru](mailto:iljin_sr@mail.ru).

**Radchenko Vladimir Konstantonovich**, Executive Secretary of Board of shaft statement analysis of State Technical & Mining Inspectorate of Ukraine, «AGAT» Ltd.

**Adorskaya Larisa Georgievna**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Institute of geotechnical mechanics named by N.S. Polyakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine.

**Samusya Sergej Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Junior Researcher, Institute of geotechnical mechanics named by N.S. Polyakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine.

**Iljina Inna Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ass. Professor, Department of Mining Mechanics, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

**Iljina Svetlana Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.) Ass. Professor, Department of Mining Mechanics, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

---

**Анотація.** В статті приведені результати аналізу потенційно нестійких динамічних процесів в ланках механічних систем шахтних підйомних установок. Показано, що через деградацію устаткування при тривалій експлуатації в складних гірсько-геологічних і гірничотехнічних умовах розглянуті процеси можуть приводити до істотного зниження рівня безпеки роботи систем «посудина - армування» вертикальних стволів. Показано, що шахтна підйомна установка є багатозв'язковою поліосциляторною динамічною системою. В її силовій передачі всі динамічні процеси енергетично взаємозв'язані між собою. При тривалій експлуатації підвищений знос і порушення проектних параметрів ланок в певних умовах викликають внутрішні або зовнішні резонанси із збудженням ударно-циклічної взаємодії підйомних посудин з армуванням аварійно небезпечного рівня. Джерелами таких резонансів є механічні процеси взаємодії барабана підйомної машини з головними канатами, відхилення геометричних і фізико-механічних параметрів армування від проектних значень, ексцентриситет підйомної посудини, невідповідність параметрів напрямних пристроїв посудини і діаграми швидкості підйому умовам мінімізації динамічних навантажень на армування в умовах конкретного вантажопідйомного відділення. В статті приведені результати досліджень, які показують, що на протяжній ділянці в середній частині ствола, де частоти вертикальних коливань посудин 2-х кінцевої підйомної установки стають близькими за значенням, виникає інтенсивний енергетичний обмін між коливаннями гілок канатів, які підіймаються й опускаються через шків підйомної машини. Він викликає зростання амплітуд горизонтальних коливань підйомних посудин і провокує ударний режим взаємодії посудини з армуванням. До такого ж ефекту приводить порушення циліндрової форми провідного шківа підйомної машини внаслідок зовнішнього резонансу. Наявність різких вигинів на перехідних ділянках діаграми швидкості підйому так само підвищує горизонтальні навантаження на армування через створення знакозмінного вертикального прискорення посудини. Це явище має найбільшу інтенсивність при аварійному гальмуванні підйомної машини. В стволах з порушеною геометрією в зоні зсуву гірських порід поєднання глобальних протяжних відхилень від вертикалі зі знакозмінними відхиленнями на коротких ділянках, порівнянних по довжині з 2 - 3 довжинами посудини, неоптимальний вибір жорсткості роликів напрямних викликають одностороннє підтискання башмаків до провідників. Це різко інтенсифікує ударну взаємодію посудин з армуванням через почастищення зустрічі башмаків з набігаючими гранями робочих поверхонь викривлених провідників. Процес може мати характер лавиноподібного наростання ударних

навантажень на коротких ділянках ствола. Одночасне виникнення описаних негативних взаємодій ланок на ділянці ствола із зношеним армуванням може стати причиною спонтанного прискорення його деградації, накопичення втомних пошкоджень несучих конструкцій посудини і першопричиною аварії з важкими матеріальними наслідками. В статті обґрунтована низка технічних заходів щодо зниження рівня аварійної небезпеки стволів, які знаходяться в тривалій експлуатації в складних гірсько-геологічних і гірничотехнічних умовах.

**Ключові слова:** шахтна підйомна установка, шахтний ствол, шахтна підйомна посудина, діагностика армування шахтного ствола, армування шахтного ствола, динаміка шахтних підйомних установок.

**Abstract.** The results of the analysis of potentially unstable dynamic processes in parts of mechanical systems of mine hoisting plants are reviewed in the article. It is shown that because of the equipment degradation under long-term operation in difficult geological and mining conditions considered processes can significantly degrade the level of security vertical shafts systems "vessel - reinforcement". It is shown that the mine hoisting plant is a multiply connected priscillarenea dynamical system. In its power train all dynamic processes are energy-connected. In the long-term operating increased wear and violation of links design parameters in certain conditions cause the internal or external resonance with the initiation of shock-cyclic interaction of lifting vessels with reinforcement emergency dangerous level. The sources of such resonances are mechanical processes of interaction of the hoist drum with head ropes, deviations of geometrical and physically-mechanical parameters of reinforcement from design values, the eccentricity of lifting vessel, the mismatch of vessel guides devices parameters and hoisting speed diagram to the conditions of dynamic loadings minimizing on the reinforcement in terms of specific lifting department. The article contains the results of studies showing that the extended section in the middle of the shaft, where the rate of vessels vertical oscillation double-end hoisting plant become close by value, there is an intensive energy exchange between fluctuations of rising and falling rope branches through a hoisting machine sheave. It causes the increase of the amplitude of lifting vessels horizontal oscillations and causes shock mode of interaction of vessel with reinforcement. The violation of cylindrical form of hoisting machine sheave because of external resonance has the same effect. The presence of sharp bends on transient section of hoisting speed diagram also increases the horizontal loading on the reinforcement because of creating the alternating vertical acceleration of the vessel. This event has significant intensity on emergency braking of hoisting machine. In the shafts with broken geometry in the area of the rock movement combination of global and local long deviations from the vertical with alternating deviations short areas, comparable in length with 2 - 3 length of the vessel, non-optimal choice of roller directors rigidity cases one-way shoes waisting to the guides. It intensifies shock interaction of vessels with reinforcement, because of the increased frequency of meetings of shoe with the moving planes of curved guides working surfaces. The process may have the character of the growing shock loadings avalanche on shaft short sections. The simultaneous occurrence of described negative links interactions on the shaft section with worn reinforcement can cause spontaneous acceleration of its degradation, fatigue damage accumulation of vessel frameworks and the main cause of an accident with heavy financial consequences. The article contains the range of technical measures to reduce rate of dangerous accident in shafts with difficult geological and mining conditions.

**Keywords:** mine hoist plant, mine shaft, mine lifting vessel, diagnostics of mine shaft reinforcement, mine shaft reinforcement, dynamics of mine hoist plants.

*Стаття поступила в редакцію 8.08.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук А.П. Круковским*