

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ СОСУДОВ В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ С ЖЕСТКОЙ АРМИРОВКОЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В. И. Самуся, докт. техн. наук, И. С. Ильина, асп. (НГУ, Днепрпетровск)

Викладено методику та окремі результати експериментальних досліджень взаємодії шахтних підйомних посудин в режимі гальмування з провідниками жорсткого армування вертикальних стовбурів у промислових умовах.

При работе шахтных подъемных установок движение скипов, клетей и контрвесов в проводниках армировки вертикальных стволов в силу различных причин приводит к возбуждению их горизонтальных колебаний. Эти колебания могут происходить в различных режимах динамического взаимодействия с проводниками (плавном или ударно-динамическом) [1].

При взаимодействии с армировкой подъемные сосуды совершают малое пространственное движение с шестью степенями свободы, при котором могут возникать значительные динамические нагрузки на проводники армировки, представляющие опасность для эксплуатации подъема. Причиной появления таких нагрузок являются пространственные отклонения профиля проводников от вертикали и определенные сочетания жесткостных и инерционных параметров системы канат–сосуд–армировка, при которых возникает перекачка кинетической энергии вертикального движения сосуда в его горизонтальные колебания (поступательные перемещения центра масс сосуда в горизонтальной плоскости и повороты вокруг центра масс).

Наибольшие динамические перегрузки подъемной системы возникают при предохранительном торможении на участке ствола с максимальной скоростью движения сосуда из-за срабатывания какого-либо аппарата защиты при нарушении нормального режима работы подъема, что может произойти в любой точке ствола. В связи с этим целесообразно провести исследования с помощью аппаратных измерений динамических параметров подъемных сосудов и барабана подъемной машины на характерных участках, расположенных в контрольных точках ствола: в его верхней, средней и нижней частях при спуске и подъеме сосуда с вариацией по нагрузке и начальной скорости в момент торможения.

В работе [2] были проведены теоретические исследования взаимодействия сосуда с армировкой при торможении. Из их результатов следует, что при проведении динамических инструментальных исследований информативными параметрами, дающими достаточно полное представление о характере движе-

ния подъемного сосуда в режиме торможения являются мгновенные значения следующих параметров, регистрируемых в развертке по временной координате:

горизонтальные ускорения направляющих подъемного сосуда на его верхнем и нижнем поясах;

вертикальное ускорение подъемного сосуда;

угловая частота вращения (окружная скорость) барабана подъемной машины;

время включения предохранительного тормоза;

длина головного каната в момент торможения (координата подъемного сосуда);

натяжение головного каната;

время с начала торможения.

Данный набор параметров обладает свойством избыточности и в условиях конкретных измерений может быть сокращен в зависимости от технических возможностей применяемой аппаратуры в части количества одновременно измеряемых динамических параметров горизонтального движения сосуда (ускорений, усилий) при соблюдении условий сохранения полноты качественной картины. Это значит, что без потери достоверности информации можно ограничиться измерениями только ускорений в лобовой и боковой плоскостях или соответствующих контактных усилий на каком-либо поясе подъемного сосуда. Информацию о вертикальном движении сосуда можно регистрировать либо с помощью датчиков ускорений, скорости или перемещения на сосуде, либо датчика натяжений каната, установленного в районе барабана, либо датчика угловой скорости барабана, либо датчика окружной скорости барабана с последующей обработкой записанных данных.

При проведении динамических измерений первый (подземный) измерительный комплекс устанавливается на подъемном сосуде.

Датчик вертикальных колебаний сосуда (датчики перемещений, скорости или ускорений) закрепляется на корпусе сосуда так, что его измерительная ось проходит вдоль вертикальной оси сосуда. Возможно применение укороченной схемы измерений с установкой датчиков только на верхнем поясе сосуда, если его вертикальный размер не намного больше горизонтального.

При использовании контактных силоизмерительных датчиков последние монтируются взамен рабочих башмаков скольжения по три датчика в каждом (два боковых и один лобовой) измерительном башмаке на верхнем или нижнем поясе сосуда [3].

Датчик-акселерометр крепится на сосуде своей измерительной осью вдоль вертикальной оси сосуда. Взамен вертикального акселерометра может использоваться датчик натяжений головного каната, навешиваемый на канат на расстоянии 0,5...1,0 м выше коуша, или датчик усилий, встроенный в подвесное устройство.

Второй (наземный) измерительный комплекс устанавливается в машинном здании. В его состав входит датчик (канал информационной цепи подъемной машины) окружной скорости барабана на подъемной машине, датчик сигнала в цепи включения предохранительного тормоза (ТП),

регистратор со встроенным таймером, канал ввода сигнала с указателя глубины подъемной машины.

Цель обработки и анализа этих измерений состоит в определении качественных и количественных отличий процесса динамического взаимодействия сосуда с армировкой во время торможения от такого же процесса во время прохождения участка торможения с рабочей скоростью. Количественно эти отличия могут быть охарактеризованы «коэффициентом динамической перегрузки», который определяется как отношение максимальных значений динамических параметров горизонтальных колебаний сосуда во время торможения к таким же значениям при прохождении данного участка ствола с постоянной скоростью.

$$K_{din,a}^{lob(bok)} = \frac{A_{max,tor}^{lob(bok)}}{A_{max,rab}^{lob(bok)}}, \quad (1)$$

$$K_{din,F}^{lob(bok)} = \frac{F_{max,tor}^{lob(bok)}}{F_{max,rab}^{lob(bok)}}, \quad (2)$$

где $K_{din,a}^{lob(bok)}$ и $K_{din,F}^{lob(bok)}$ – коэффициенты динамической перегрузки системы сосуд–армировка при срабатывании ТП соответственно по максимальным измеренным горизонтальным ускорениям башмаков и контактными усилиями в парах башмак–проводник в лобовой (боковой) плоскости; $A_{max,tor}^{lob(bok)}$ и $F_{max,tor}^{lob(bok)}$ – максимальные горизонтальные ускорения направляющих и максимальные контактные усилия в лобовой (боковой) плоскости за время торможения; $A_{max,rab}^{lob(bok)}$ и $F_{max,rab}^{lob(bok)}$ – максимальные значения горизонтальных ускорений и контактных усилий на участке торможения во время движения с рабочей скоростью.

Для качественной характеристики процесса взаимодействия сосуда с армировкой в процессе торможения необходимо определить закон изменения максимальных амплитуд динамических параметров горизонтальных колебаний сосуда во времени и установить, является это изменение убывающей, возрастающей, возрастающе-убывающей или постоянной во времени функцией и от каких параметров системы это зависит.

Как показано в работе [4], процесс горизонтального взаимодействия сосуда с армировкой носит случайный стационарный, эргодический характер. То есть количественные значения динамических параметров взаимодействия сосуда с армировкой на различных циклах спуска–подъема могут отличаться друг от друга, но средние показатели сохраняют приблизительно одинаковые значения от цикла к циклу. Поэтому в качестве базы сравнения для определения степени перегрузки армировки при торможении, кроме максимальных значений, можно выбирать значения показаний динамических датчиков отдельно для лобовой и для боковой плоскости проводников, усредненные по всем выборкам контрольных циклов спуска и подъема сосуда

по каждому участку предохранительного торможения с соответствующей рабочей скоростью.

Обработка данных эксперимента состоит из двух основных этапов:

подготовительная обработка данных (расшифровка записей и перевод данных в значения физических параметров, регистрируемых датчиками; нахождение максимальных значений динамических параметров для каждого спуска и подъема сосуда в контрольных точках ствола и т.д.);

математическая обработка данных (вычисление среднестатистических значений максимальных динамических параметров; выбор максимальных значений параметров отдельно для лобовых и боковых датчиков; присвоение выбранных максимальных значений параметрам, выбранным по формулам (1) и (2) в качестве базы сравнения: $A_{\max, \text{rab}}^{\text{lob}(\text{bok})}$ и $F_{\max, \text{rab}}^{\text{lob}(\text{bok})}$; расчет значений коэффициентов динамической перегрузки $K_{\text{din}, a}^{\text{lob}(\text{bok})}$ и $K_{\text{din}, F}^{\text{lob}(\text{bok})}$ для каждой контрольной точки отдельно для спуска и подъема сосуда; расчет мгновенного и среднего (до остановки) окружных замедлений барабана подъемной машины; анализ зависимости коэффициентов динамичности от координаты контрольной точки срабатывания предохранительного тормоза отдельно для лобовой и для боковой плоскости спуска и подъема сосуда и т.д.).

На основе разработанной методики проведения экспериментальных исследований взаимодействия шахтных подъемных сосудов в режиме торможения с проводниками жесткой армировки вертикальных стволов были проведены эксперименты по измерению горизонтальных ускорений колебаний контрвеса при торможении в стволе «Вспомогательный» шахты «Эксплуатационная» Запорожского железорудного комбината. Измерения проводились с использованием аппаратуры «МАК» ИГТМ им. Н. С. Полякова НАН Украины. Применялась схема расположения датчиков ускорений на верхнем и нижнем поясах сосуда. Подъемная машина имела следующие характеристики: высота подъема – 940 м; масса сосуда – 17610 кг; высота контрвеса от верхнего до нижнего пояса – 12,63 м; рабочая скорость движения – 6 м/с; наибольшая скорость при срабатывании предохранительного тормоза – 6 м/с; два проводника коробчатого типа двустороннего расположения; торможение производилось при спуске и подъеме контрвеса в средней и нижней частях ствола на уровне отметок 440 и 690 м, при этом среднее замедление достигало 4 м/с².

Данные измерений показали, что при аварийном торможении происходит значительное нарастание амплитуд горизонтальных колебаний сосуда. Из анализа полученных при торможении осциллограмм следует, что колебания сосуда при торможении носят сложный полигармонический характер.

Спектральный анализ осциллограмм на рис. 1–6 показывает, что для данной системы контрвес–армирование при реализации ударно-динамического режима доминируют колебания с частотой вибраций сосуда 10 Гц в боковой плоскости и частотой вибраций 11 Гц в лобовой плоскости проводников.

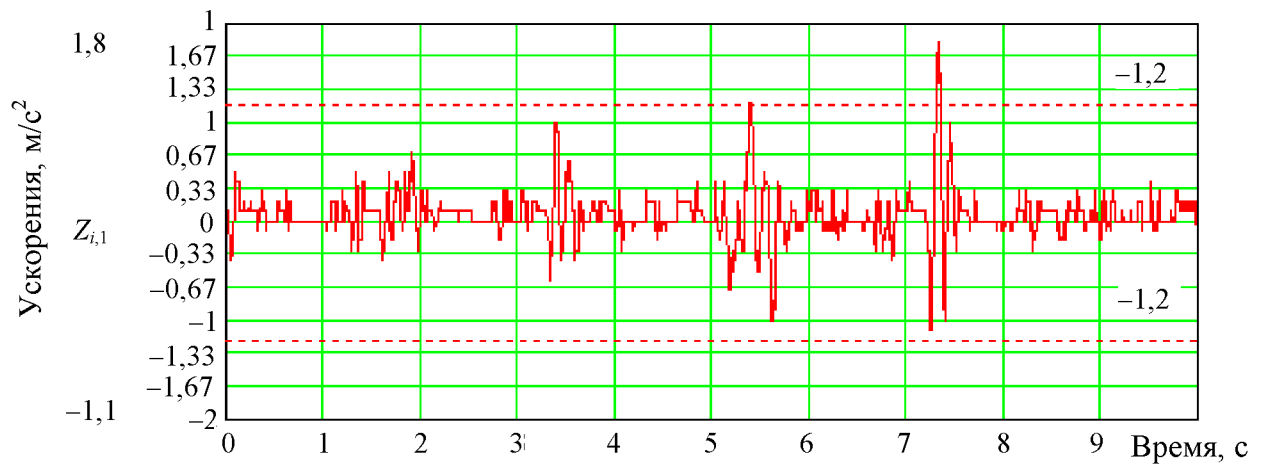


Рис. 1. Горизонтальные ускорения сосуда в боковой плоскости верхнего пояса при торможении на спуске в районе отметки 440 м

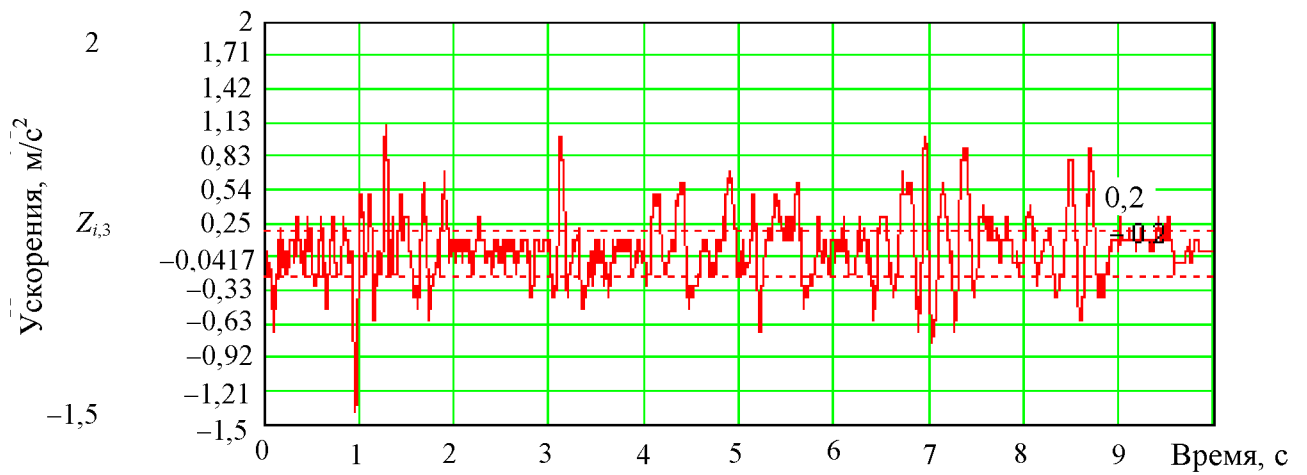


Рис. 2. Горизонтальные ускорения сосуда в лобовой плоскости верхнего пояса при торможении на спуске в районе отметки 440 м

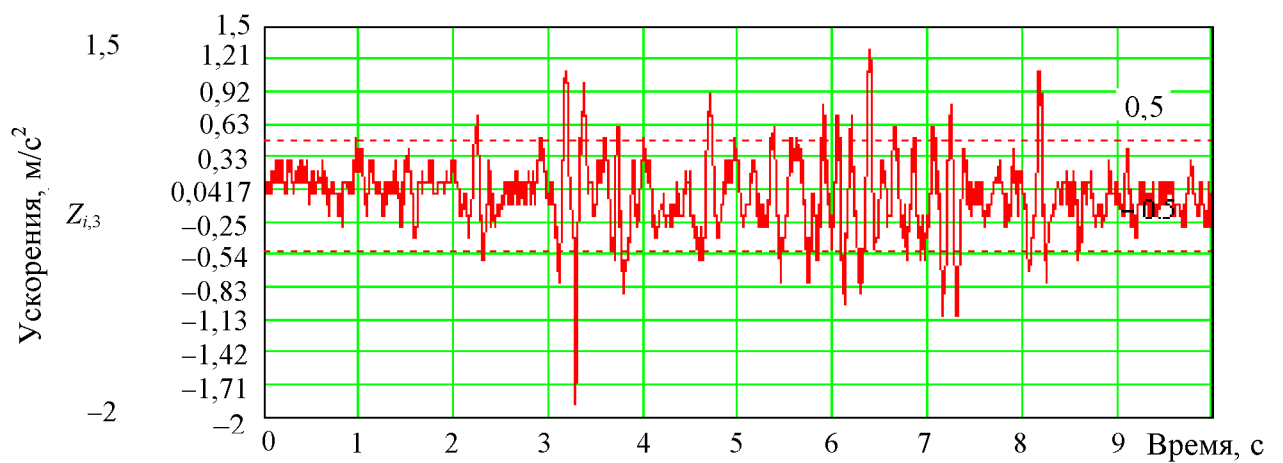


Рис. 3. Горизонтальные ускорения сосуда в лобовой плоскости верхнего пояса при торможении на подъеме в районе отметки 440 м

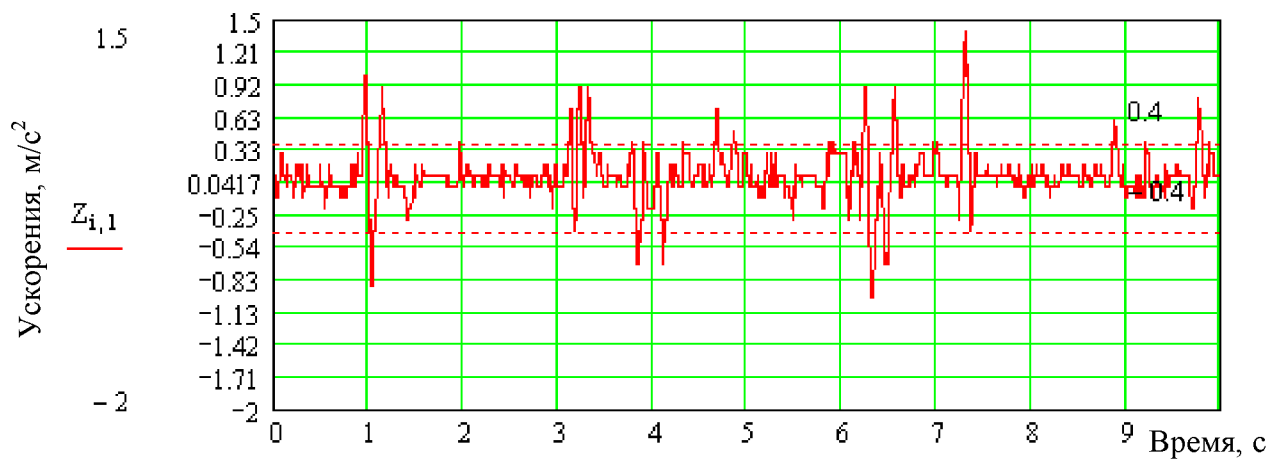


Рис. 4. Горизонтальные ускорения сосуда в боковой плоскости верхнего пояса при торможении на подъеме в районе отметки 440 м

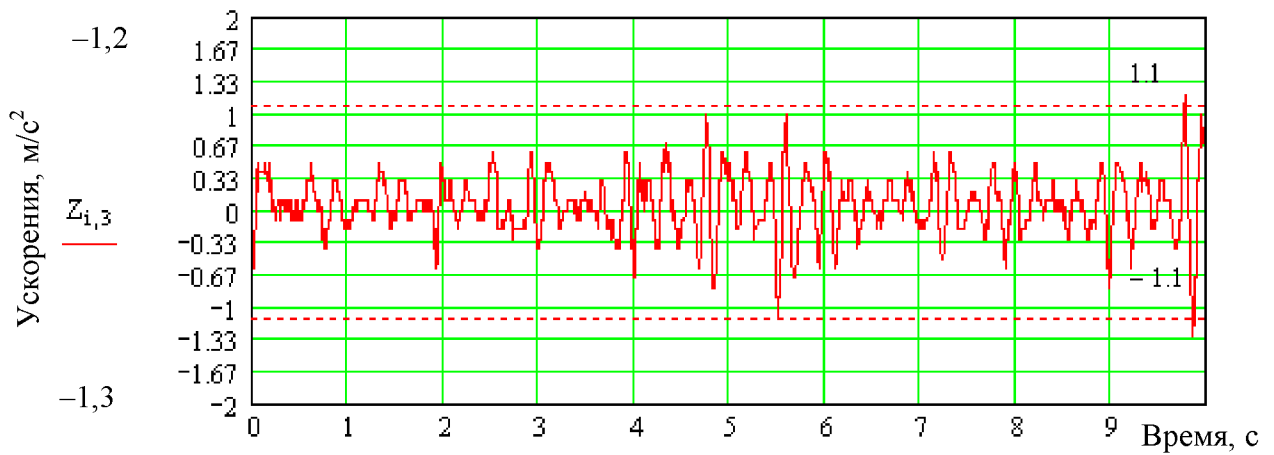


Рис. 5. Горизонтальные ускорения сосуда в лобовой плоскости верхнего пояса при торможении на спуске в районе отметки 690 м

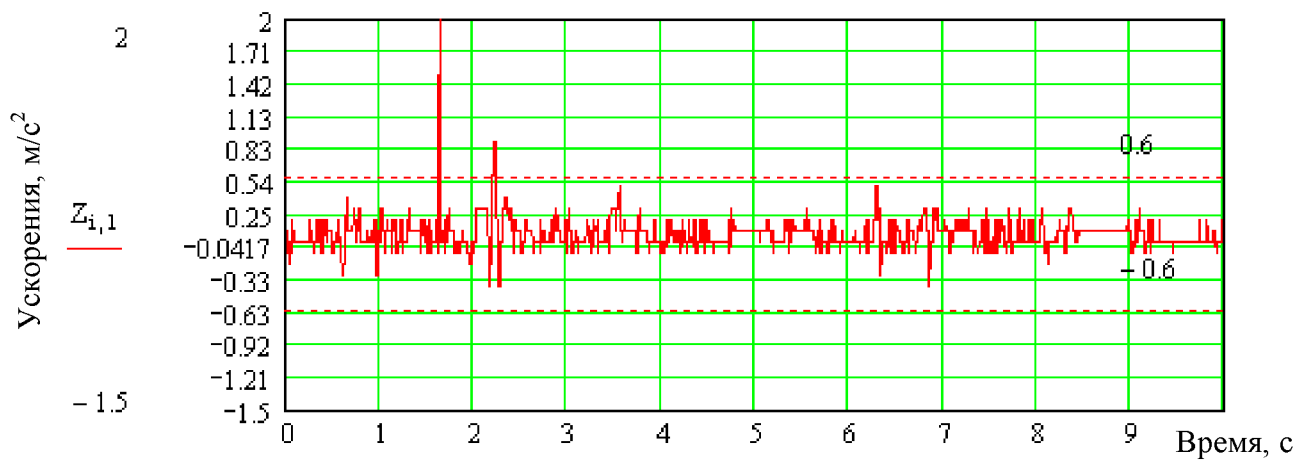


Рис. 6. Горизонтальные ускорения сосуда в боковой плоскости верхнего пояса при торможении на подъеме в районе отметки 690 м

На графиках приведены развертки горизонтальных ускорений сосуда по времени при аварийном торможении. Маркерами отмечены максимальные значения средних горизонтальных ускорений при рабочем режиме движения по стволу на участке торможения.

На основании формулы (1) были получены следующие наибольшие значения коэффициентов динамичности при торможении на спуске и подъеме контрвеса для лобовой и боковой плоскостей проводников.

На спуске при торможении на уровне 440 м: $K_{din,a}^{bok} = 1,5$; $K_{din,a}^{lob} = 1,3$.

На подъеме при торможении на уровне 440 м: $K_{din,a}^{bok} = 2,3$; $K_{din,a}^{lob} = 2,1$.

На спуске при торможении на уровне 690 м: $K_{din,a}^{bok} = 1,1$; $K_{din,a}^{lob} = 1,08$.

На подъеме при торможении на уровне 690 м: $K_{din,a}^{bok} = 1,4$; $K_{din,a}^{lob} = 1$.

Приведенные графики данных экспериментов показывают, что в режиме торможения амплитуды динамических перегрузок в кинематической паре башмак–проводник при одной и той же начальной скорости торможения 6 м/с в некоторых точках ствола имеют явную тенденцию к росту по сравнению с рабочим режимом движения по этим участкам. Максимальные значения горизонтальных ускорений при торможении контрвеса представлены в табл. 1.

Таблица 1. Максимальные значения перегрузок при торможении контрвеса

$h, \text{ м}$	$A_{\max,tor}^{bok}, \text{ м/с}^2$		$A_{\max,tor}^{lob}, \text{ м/с}^2$	
	Спуск	Подъем	Спуск	Подъем
100	0,7	0,5	1,2	1,5
440	1,8	1,4	1,4	1,9
690	1,1	2,0	1,3	1,3

Отсюда видно, что самым динамичным при торможении является участок в средней части ствола, максимальные ускорения направляющих сосуда в котором достигают $3,1 \text{ м/с}^2$. В табл. 2 представлены максимальные значения динамических перегрузок направляющих сосуда при движении контрвеса по этим же участкам на рабочей скорости 6 м/с.

Табл. 2. Максимальные значения перегрузок при рабочей скорости

$h, \text{ м}$	$A_{\max,rab}^{bok}, \text{ м/с}^2$		$A_{\max,rab}^{lob}, \text{ м/с}^2$	
	Спуск	Подъем	Спуск	Подъем
100	0,5	0,4	1,8	0,9
440	1,2	0,6	1,1	0,9
690	1,0	1,4	1,2	1,3

В целом по стволу есть ряд участков с максимальными значениями горизонтальных перегрузок при нарушении плавности рабочей скорости движения. На них максимальные значения горизонтальных ускорений реализуются в районе отметки 220 м и достигают $2,8 \text{ м/с}^2$ в лобовой плоскости при спуске контрвеса и $2,1 \text{ м/с}^2$ при подъеме.

Это значит, что срабатывание предохранительного тормоза даже на участках с плавным рабочим движением сосуда вызывает возникновение дополнительных перегрузок системы по уровню эквивалентных и даже превышающих уровень перегрузок при движении по участку пространственно искривленных проводников. Поэтому плавное движение сосуда по участку с прямолинейной, но изношенной армировкой еще не гарантирует безопасность ее эксплуатации в случае срабатывания аварийного тормоза.

Результаты экспериментов, проведенных в промышленных условиях, и их анализ показывают, что при наличии в стволе участков с изношенной армировкой необходимо проводить тщательный осмотр проводников и расстрелов после реализации на них аварийного торможения подъемных сосудов.

1. *Единый нормативно-технический документ* для проектирования, строительства и эксплуатации вертикальных стволов шахт. НИИ горной механики им. М. М. Федорова. – Донецк. – 1994. – 82 с.

2. *Сорокін В. І., Ільїна І. С.* Дослідження взаємодії шахтних підйомних посудин з провідниками під час гальмування // Питання прикладної математики і математичне моделювання. – Дніпропетровськ: ДНУ. – 2001. – Вип.1. – С.93–99.

3. *ГР 3-032-2004.* Діагностика стану систем „кріплення–масив” та „підйомна посудина–жорстке армування” шахтних стовбурів. Порядок та методика виконання. – Міністерство промислової політики України. – Галузевий нормативний документ. – Київ. – 2004. – 40 с.

4. *Гавруцкий А. Е., Мусиенко В. Д., Осадчая Л. С.* Исследование горизонтальных нагрузок на армировку в скиповом стволе ЗЖРК № 1 // Шахтное строительство. – 1981. – № 7. – С. 19–21.