

УДК 622.673.1

*Самуся В.И., Ильина С.С.*

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОЛИКОВЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ НА  
КОНТАКТНЫЕ НАГРУЗКИ В СИСТЕМЕ «СОСУД - АРМИРОВКА»  
ШАХТНЫХ СТВОЛОВ С НАРУШЕННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ**

*Рассмотрена задача определения зависимости контактных динамических нагрузок в системах «сосуд-армировка» вертикальных шахтных стволов от упруго-диссипативных параметров роликовых направляющих подъемных сосудов. Показана возможность существенного снижения уровня контактных нагрузок на проводники путем применения специальных демпфирующих устройств в роликовых направляющих подъемных сосудов.*

**Ключевые слова:** шахтная подъемная установка, жесткая армировка, система «сосуд-армировка», динамика движения скипа

V.I. Samusya, S.S. Iljina

**INFLUENCE OF PARAMETERS OF ROLLER GUIDES ON THE  
CONTACT LOAD IN THE "VESSEL-REINFORCEMENT" FOR SHAFTS  
WITH A BROKEN GEOMETRY**

The problem of determining the dependence of the contact dynamic loads in the "vessel - reinforcement" of vertical shafts from the elastic-dissipative parameters of roller guides. The possibility of a significant reduction in the level of contact loads on the conductors by the use of special damping devices in roller guides lift vessels.

**Keywords:** mine elevating installation, rigid армировка, system "vessel-reinforcement ", dynamics of movement of a skip

## Состояние вопроса

В настоящее время техническое состояние стволовой части оборудования подъемных установок значительного числа шахт и рудников по своим параметрам отличается от проектного в силу ряда причин производственного или природного характера. Ряд стволов находится в зоне влияния сдвижения горных пород, их армировка подвергается деформациям, механическому и коррозионному износу. Проводники армировки приобретают форму искривленных в пространстве ломанных линий. Участки локальных искривлений проводников становятся источниками возникновения в системе повышенных динамических нагрузок ударно-циклического характера. Такие стволы можно отнести к категории «стволов с нарушенной геометрией».

**Цель исследований** заключается в определении характера зависимости динамических параметров системы «скип-армировка» от жесткости и коэффициента вязкого сопротивления роликовых направляющих при движении по проводникам, имеющим фактические профили с локальными искривлениями, сложившимися в стволе за 40-50 лет эксплуатации в зоне сдвижения горных пород.

## Исследование

Расчетная схема системы «сосуд-армировка» представлена на рис.1

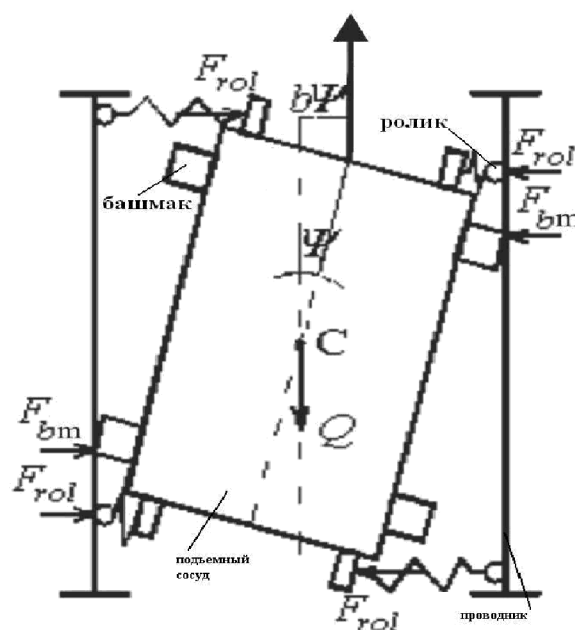


Рис.1. Расчетная схема системы «сосуд-армировка»

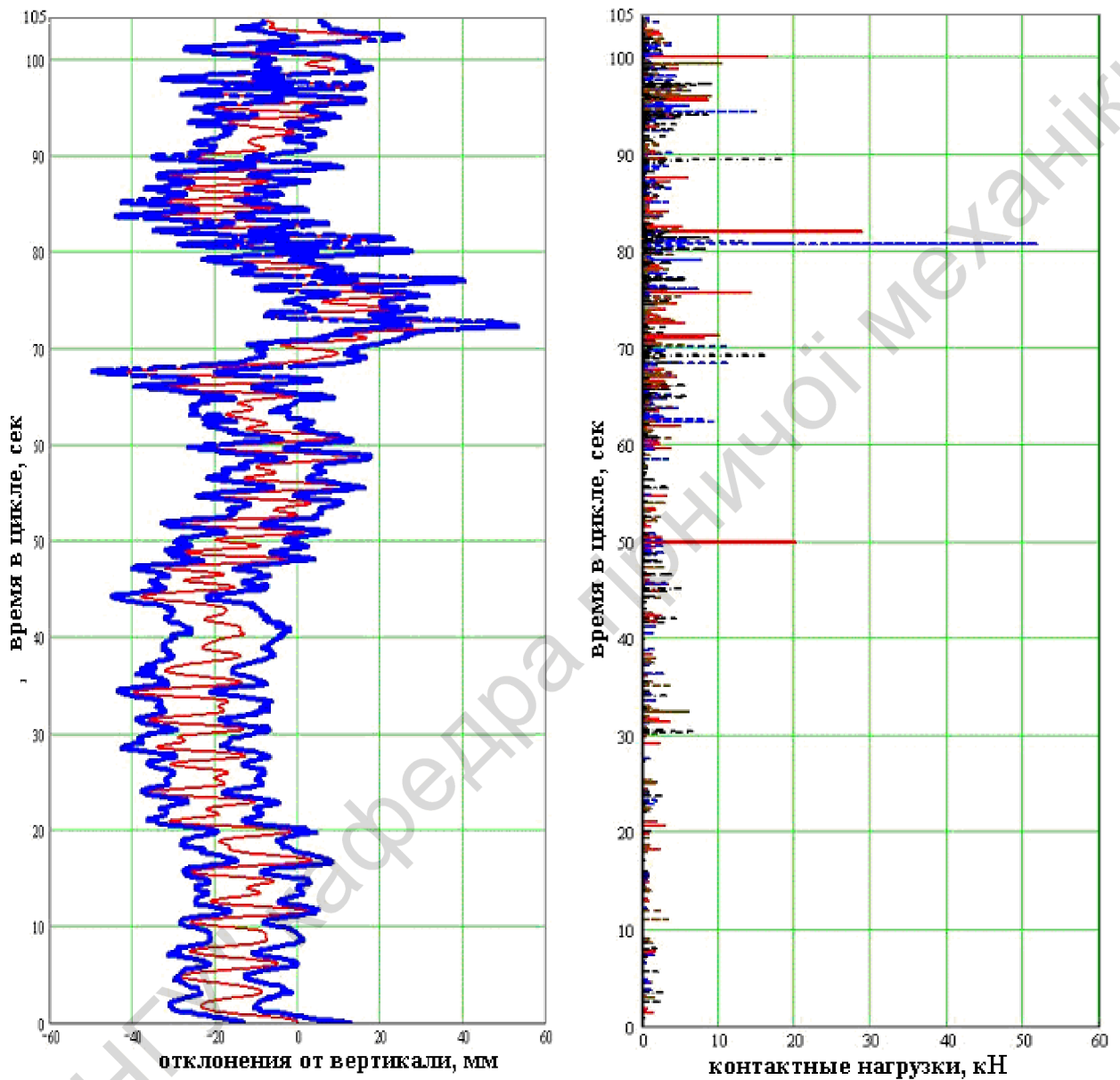
$F_{rol}$  - сила реакции ролика направляющей,  $F_{bm}$  - сила реакции предохранительного башмака,  $b$  – расстояние от центра масс  $C$  сосуда до точки крепления каната,  $\psi$  - угол наклона сосуда при колебаниях,  $Q$  – сила веса сосуда.

Моделирование динамики системы «сосуд-армировка» проводилось в программном комплексе SolidWorks-SolidMotion [1]. Его результаты показали, что в исследуемом рудоподъемном отделении в интервале между 60-й и 90-й секундами цикла подъема груженого скипа со скоростью 11 м/с, который приходится на участок максимального искривления оси ствола, реализуется интенсивный ударно-циклический режим силового воздействия скипа жесткими предохранительными башмаками на проводники армировки (рис.2). Для одних и тех же диаграммы скорости подъема и профилей проводников при вариации значений жесткости и коэффициента диссипации роликовых направляющих уровень, интенсивность и координаты точек приложения максимальных нагрузок к проводникам по глубине ствола существенно изменяются.

В силу случайности и непредсказуемости характера формирования горизонтальных отклонений проводников от проектной вертикали спектральные характеристики их кинематических возмущений движения сосуда на разных участках по глубине ствола могут значительно отличаться. Естественно, что при неизменном профиле спектральные характеристики возмущений на разных циклах определяются мгновенной скоростью движения сосуда на коротком участке ствола. При этом, увеличение скорости приводит к росту частоты возмущений.

Собственные частоты колебаний систем «сосуд-армировка» зависят только от инерционных параметров взаимодействующих тел, жесткости и диссипации роликовых направляющих. Отсюда следует, что при случайном попадании системы в резонансный режим, в котором собственные и вынуждающие спектральные характеристики будут близкими по значению достаточно длительное время, единственными параметрами, изменяя

которые можно перевести систему в устойчивый режим работы, являются жесткость и вязкое сопротивление роликовых направляющих.



а) Горизонтальные перемещения башмаков верхнего пояса скипа между проводниками

б) Контактные нагрузки на проводники

Рис.2. Динамические параметры системы «скип-армировка»

Результаты, показывающие изменение зависимости средних контактных нагрузок на интервале 60-90 сек от жесткости и коэффициента вязкого сопротивления (КВС) направляющих, показаны на рис.3.

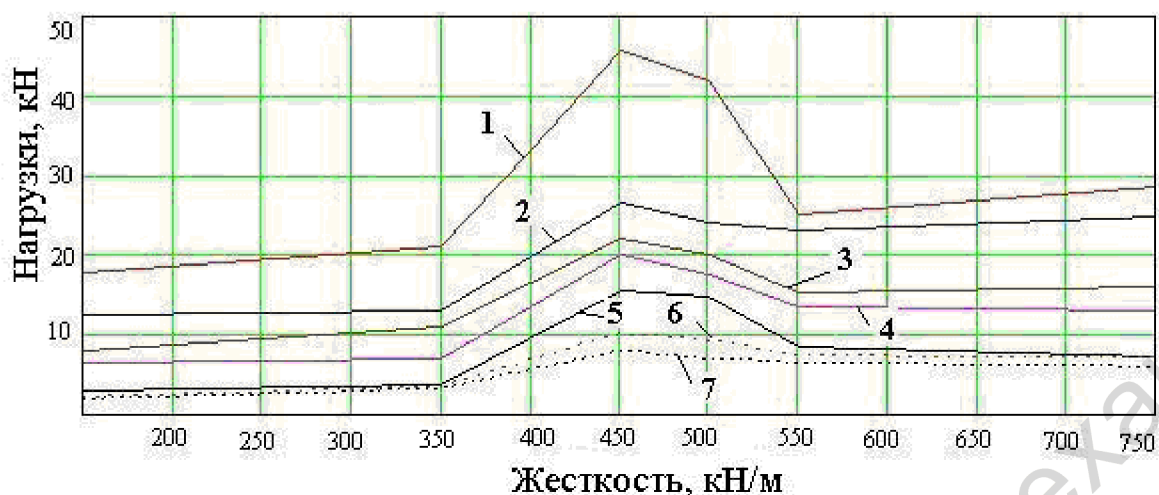


Рис. 3. Зависимость уровня максимальных по участку динамических нагрузок на проводник от жесткости и параметров диссипации направляющих

1- КВС=0 кНс/м; 2- КВС=60 кНс/м; 3- КВС=170 кНс/м; 4- КВС=400 кНс/м; 5-КВС=600 кНс/м; 6- КВС=800 кНс/м; 7- КВС=1000 кНс/м

Из этих графиков видно, что с ростом жесткости роликовых направляющих ударно-контактные нагрузки на проводники имеют тенденцию к увеличению. При этом в интервале жесткостей 400-550 кН/м имеется явно выраженный рост нагрузок, который объясняется тем, что в этом интервале некоторые из собственных частот колебаний сосуда оказываются близкими к частотам, которые генерируются профилем проводников при данной диаграмме скорости подъема. Рост параметра диссипации снижает общий уровень нагрузок, например, при жесткости 1000 кН/м изменение параметра диссипации от 0 до 1000 Нс/мм приводит к снижению максимальной нагрузки до 5 раз.

Так же видно, что при дорезонансном значении жесткости 150-350 кН/м при отсутствии диссипации (КВС=0) максимальные нагрузки по участку достигают значения 20 кН, а с увеличением КВС до 1000 Нс/мм снижаются почти в 10 раз. При значениях жесткости, соответствующих

послерезонансной области (600-700 кН/м) такого снижения нагрузок не происходит.

Результаты исследований зависимости средней нагрузки от параметра диссипации для различных жесткостей направляющих представлены на рис. 4.

Из рисунка 3 видно, что увеличение жесткости направляющих более 250-350 кН/м приближает систему к резонансной зоне, поэтому для данного исследуемого подъема целесообразно применение направляющих с жесткостью, приведенной к оси вращения роликов, не более 250-300 кН/м. Кривые на рисунке 4 показывают, что заметное влияние роста диссипации (снижение нагрузок в 2 раза) начинается с уровня коэффициента вязкого сопротивления 350-400 кНс/м. Наибольшее влияние на снижение нагрузок, по сравнению с недемпфированной направляющей, оказывает амортизатор с коэффициентом вязкого сопротивления порядка 600-700 кНс/м (снижение нагрузок в 4 раза). Дальнейшее увеличение коэффициента вязкости неэффективно, так как скорость снижения нагрузок с ростом диссипации существенно снижается, в то время как технические сложности создания и эксплуатации такого амортизатора для стесненных условий подъемного сосуда существенно возрастают.

Из приведенных результатов видно, что диссипация в упруго-вязких звеньях роликовых направляющих является наиболее влиятельным техническим фактором, управляя которым можно на практике добиться существенного снижения динамических нагрузок в системах «скип-армировка» в стволах с нарушенной геометрией. В направляющих, не имеющих подвижных частей (типа «НКП»), диссипация ограничена максимальным значением коэффициента вязкого сопротивления резиновой оболочки катка. В рычажных направляющих при смещении оси ролика относительно сосуда меняется расстояние между концом рычага и основанием направляющей, в зазор между которыми, в действующих

конструкциях, вставлен резино-пружинный блок, параметры которого можно менять в процессе эксплуатации.

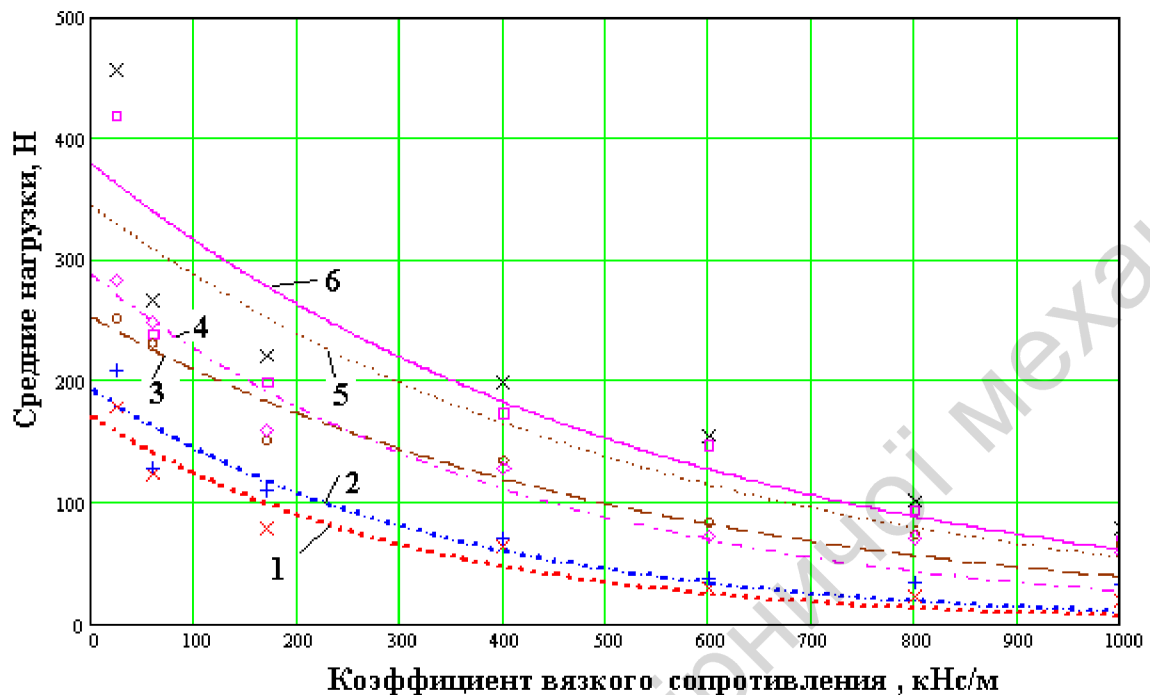


Рис.4. Зависимости средних нагрузок на проводники от коэффициента вязкого сопротивления направляющей для различных жесткостей (С) амортизатора

1 – С=150 кН/м; 2 - С=350 кН/м; 3 - С=400 кН/м; 4 - С=500 кН/м; 5 - С=550 кН/м; 6 - С=750 кН/м

Полученные в работе [2] результаты показывают, что в существующих рычажных направляющих длины плеч основных рычагов выбраны так, что рабочий ход и скорость перемещения штока в резино-пружинном демпфирующем блоке примерно в 2 раза меньше, чем направляющего ролика. Поэтому жесткость опорного блока должна быть в 2 раза больше, чем требуемая по проекту жесткость всей направляющей, приведенная к точке взаимодействия ролика с проводником.

Активный участок рабочего хода, на котором ролик будет оказывать сопротивление сближению башмака сосуда с проводником, должен соответствовать максимальному кинематическому зазору между предохранительным башмаком и проводником, который, согласно Правилам

безопасности, не может превышать 23 мм на сторону. Из этого следует, что активный участок рабочего хода штока демпфирующего блока является вдвое меньшим и не превышает 12-13 мм.

Для исследования амплитудно-частотных характеристик работы роликовых направляющих в условиях рудоподъемного ствола были проведены экспериментальные измерения горизонтальных ускорений направляющих скипа на максимальной скорости 12 м/с. Ускорения направляющих в лобовой и боковой плоскостях проводников измерялись динамическими датчиками-акселерометрами и регистрировались компьютером специализированной аппаратуры.

Анализ осциллограмм колебаний направляющих показал, что наиболее динамически нагруженным является режим подъема грузеного скипа. При этом наибольшие горизонтальные ускорения реализуются в лобовой плоскости проводников и приходятся на направляющие верхнего пояса подъемного сосуда.

На рис.5 и рис. 6 приведены осциллограммы виброускорений направляющих верхнего и нижнего поясов скипа в лобовой плоскости проводников при подъеме с грузом на скорости 12 м/с в течение всего рабочего цикла подъема грузеного скипа.

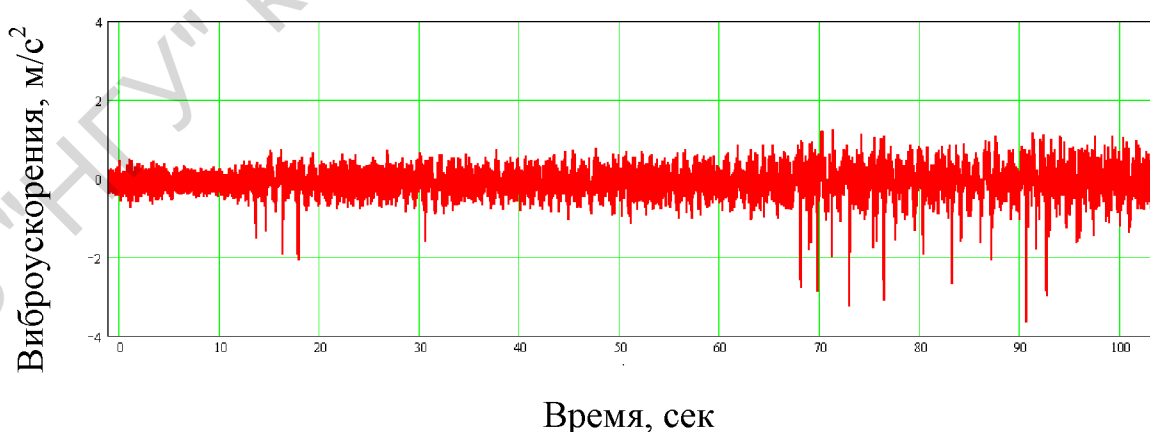


Рис. 5 - Лобовые виброускорения направляющих верхнего пояса грузеного скипа



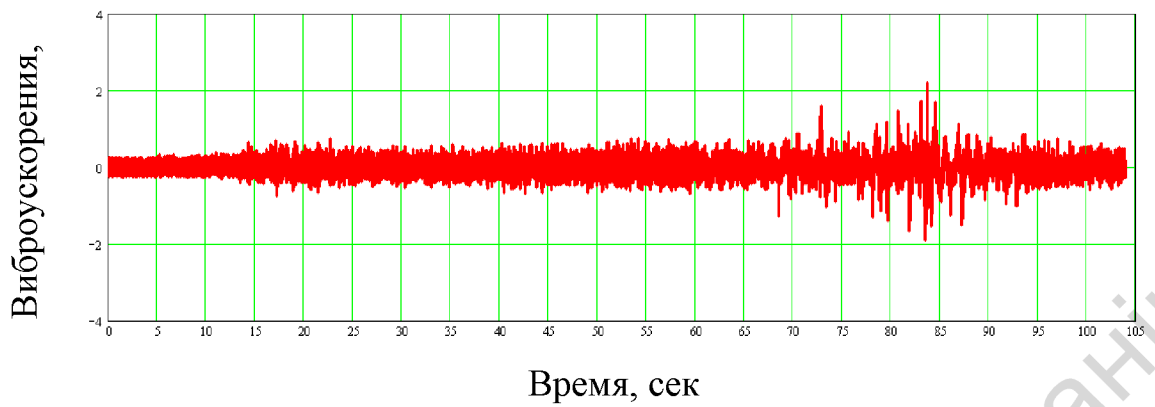


Рис. 6 - Лобовые виброускорения направляющих нижнего пояса  
груженого скипа

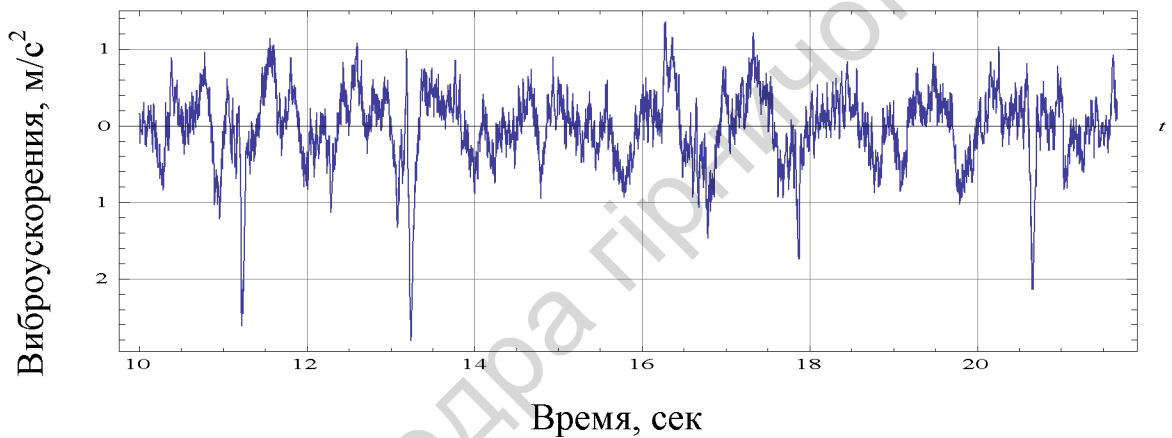


Рис. 7а - Фрагмент осциллограммы лобовых ускорений верхнего пояса  
скипа на участке ударно-циклического взаимодействия с проводниками

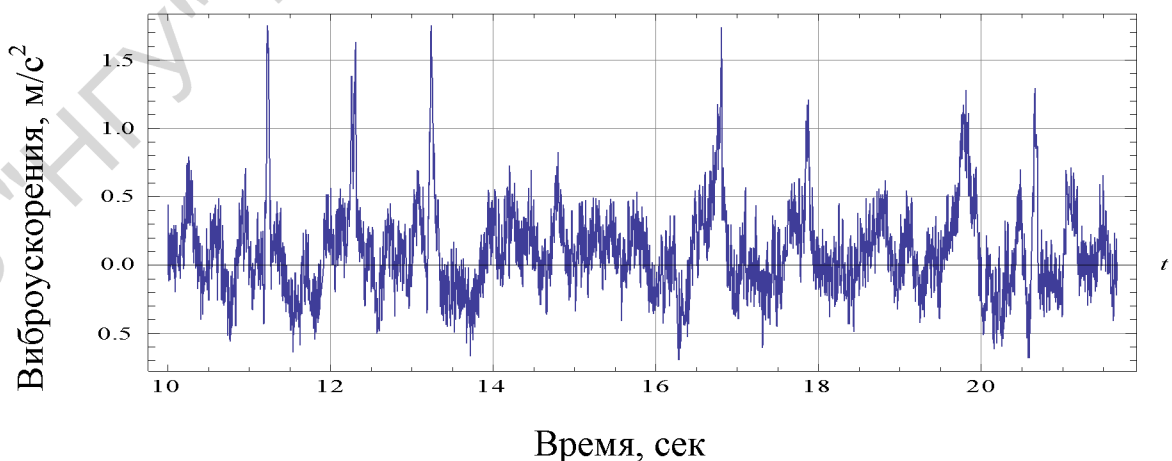


Рис. 7б - Фрагмент осциллограммы лобовых ускорений нижнего пояса  
скипа на участке ударно-циклического взаимодействия с проводниками

По осциллограммам (рис.5-7) видно, что на протяжении всего цикла подъема в течение 105 секунд скип проходит участки ствола с разными уровнями и характером возмущений со стороны проводников армировки. Уровень возмущений на направляющих верхнего пояса несколько выше, чем на нижнем поясе. При этом на фоне общего плавного движения с амплитудой ускорений до  $0,5 \text{ м/с}^2$  на отдельных интервалах движения (участках ствола) от 10-й до 20-й и от 68-й до 90-й секунды на направляющие скипа действуют наибольшие по уровню циклические знакопеременные ускорения до  $2-3 \text{ м/с}^2$  по верхнему поясу и  $2 - 2.3 \text{ м/с}^2$  по нижнему поясу. Характер взаимодействия сосуда с проводниками – виброударный. Это значит, что начальную часть колебательного цикла в пределах кинематического зазора сосуд проходит, опираясь на резино-пружинный блок роликового амортизатора, а завершающую часть – при жестком взаимодействии предохранительного башмака скипа с проводником. На втором этапе реализуются наибольшие по амплитуде динамические перегрузки, при которых доминирующая часть нагрузки воспринимается предохранительным башмаком.

Это значит, что в условиях действующих стволов при наличии резино-пружинных амортизаторов обеспечить достаточные по уровню упругие и диссипативные силы для надежного центрирования 40-45-ти тонного скипа, движущегося в искривленных проводниках со скоростью до 10-12 м/с, в настоящее время не удастся.

Для создания эффективных амортизаторов, снижающих динамические усилия между сосудом и проводниками на участках максимальных искривлений необходимо определить интервалы изменения кинематических параметров работы направляющих в реальных промышленных условиях. К этим параметрам относятся: виброскорость, виброускорения, доминирующие частоты возмущений. Спектральный анализ осциллограмм, приведенных на рис. 5-7, дает возможность определить доминирующие частоты главных колебаний системы.

Спектр колебаний, полученный в результате обработки полной выборки данных для колебаний направляющих верхнего пояса (рис.5.) за весь цикл подъема грузеного скипа показан на рис.8. Из этого графика видно, что наибольшую энергию несут в себе колебания с частотой 0.8-1.2 Гц. Детальный анализ осциллограммы показывает, что этот диапазон частот соответствует ударно-циклическому режиму с жесткими соударениями башмаков с проводниками в конце цикла подъема (рис.5).

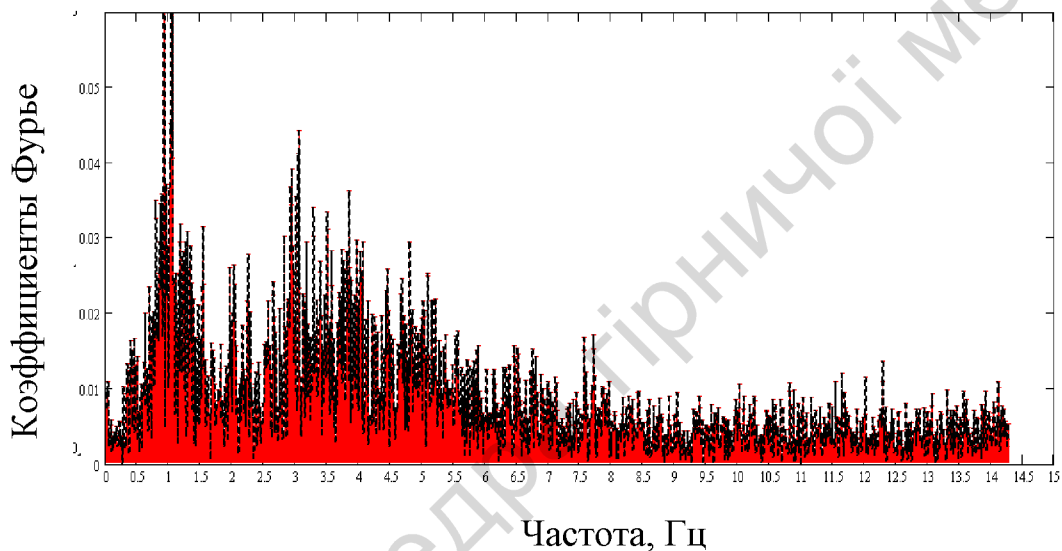


Рис.8. Спектр лобовых колебаний направляющих верхнего пояса скипа

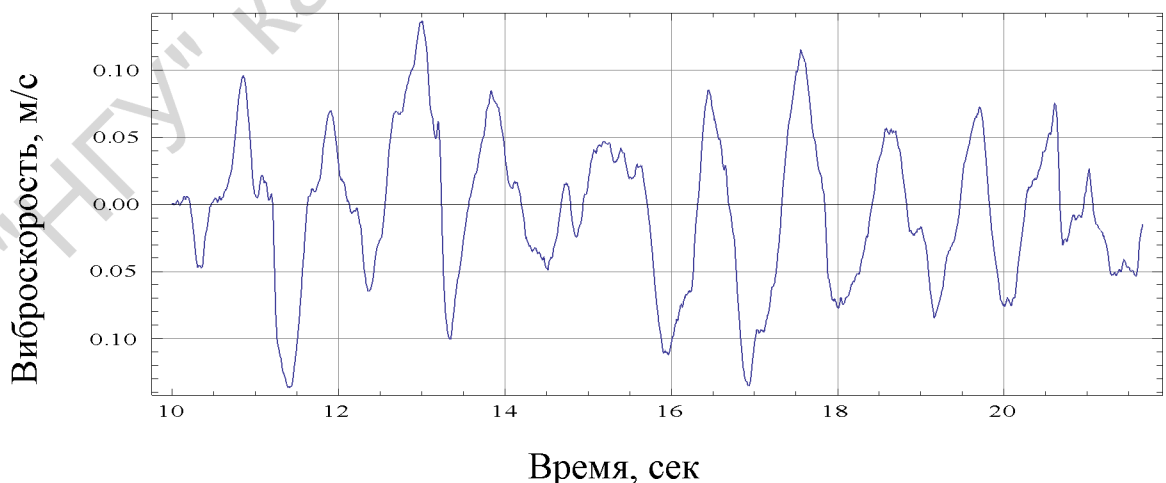


Рис. 9а. График виброскорости направляющей верхнего пояса скипа в лобовой плоскости на участке виброударного движения.

На рис. 9 приведены графики виброскоростей основания направляющих (роликов) верхнего и нижнего поясов скипа, полученные путем численного интегрирования фрагмента экспериментальной осциллограммы (рис. 7).



Рис. 9б. График виброскорости направляющей нижнего пояса скипа в лобовой плоскости на участке виброударного движения.

Анализ этих графиков показывает, что в режиме виброударного взаимодействия направляющие скипа совершают колебательное движение относительно неподвижных проводников с максимальной скоростью до 0.10-0.12 м/с. Следовательно, при синтезе амортизирующего блока направляющей необходимо рассчитывать именно на этот рабочий диапазон виброскорости его подвижных частей для эффективного поглощения энергии колебаний.

Для решения поставленной технической задачи целесообразно максимально приблизить длину активного участка рабочего хода демпфирующего блока к величине активного участка ролика в точке его контакта с проводником, а скорость перемещения штока в блоке к виброскорости ролика. В этом случае более эффективно обеспечить необходимый уровень рассеивания энергии в блоке можно за счет применения дополнительного гидроамортизатора специальной конструкции, эффективно гасящего колебания в диапазоне частот 0.5-1.5 Гц, и тем самым

исключить ударное взаимодействие башмаков с проводниками. Благодаря этому уровень динамических нагрузок на армировку и скип в условиях данного ствола на скорости 12 м/с может быть значительно снижен.

В настоящее время в стесненных условия грузоподъемных отделений стволов с нарушенной геометрией практикуется установка боковых направляющих сосудов с частичным выходом роликов за пределы плоских поверхностей коробчатых прямоугольных проводников. Кроме того, по аналогии с зарубежной практикой намечается тенденция применения коробчатых проводников из упрочненного проката со скругленными ребрами. В некоторых модификациях этих проводников плоская поверхность значительно меньше, чем у традиционного прямоугольного сечения, поэтому эффект неполного контакта с роликами еще более выражен.

Исследования, проведенные в работе [3], показали, что в этих случаях опорная жесткость направляющей становится периодической во времени величиной из-за чего в системе «скип - роликовые направляющие - проводники» создаются условия для возникновения параметрического возбуждения резонансного типа. Там же получены уравнения, описывающие это явление, которые в канонической форме имеют вид

$$\begin{aligned} U''(\tau) + (a_u + q_u \cos 2\tau)U(\tau) &= (D_U - P_U \cos 2\tau)\varphi(\tau); \\ \varphi''(\tau) + (a_\varphi + q_\varphi \cos 2\tau)\varphi(\tau) &= (D_\varphi - P_\varphi \cos 2\tau)U(\tau), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_u$ ,  $a_\varphi$ ,  $q_u$ ,  $q_\varphi$ ,  $D_U$ ,  $D_\varphi$ ,  $P_U$ ,  $P_\varphi$  - коэффициенты, зависящие от частоты лобовых колебаний, инерционных и геометрических параметров сосуда, максимальных жесткостей и амплитуд периодического изменения жесткостей боковых роликов при неполном контакте с проводниками.

При реальных параметрах действующих подъемных установок уравнения (1) являются слабо взаимосвязанными. Их левые части представляют собой уравнения типа Матье, анализ которых в первом приближении дает предельные оценки границ допустимых значений конструктивных параметров системы «сосуд-армировка» по критерию устойчивости движения.

Результаты анализа показаны в виде диаграммы Айнса-Стретта, где нанесены координатные прямые, соответствующие различным комбинациям параметров системы «сосуд-армировка» (рис.5). Видно, что уменьшение жесткости ролика ( $\frac{C_{rol}}{2}$ ) приводит к увеличению области недопустимых параметров (суммарная длина участков кривой в зонах неустойчивости растет), а уменьшение амплитуды модуляции жесткости ( $\frac{\delta C_{rol}}{2}$ ) за счет выхода за плоскость проводника приводит к ее снижению.

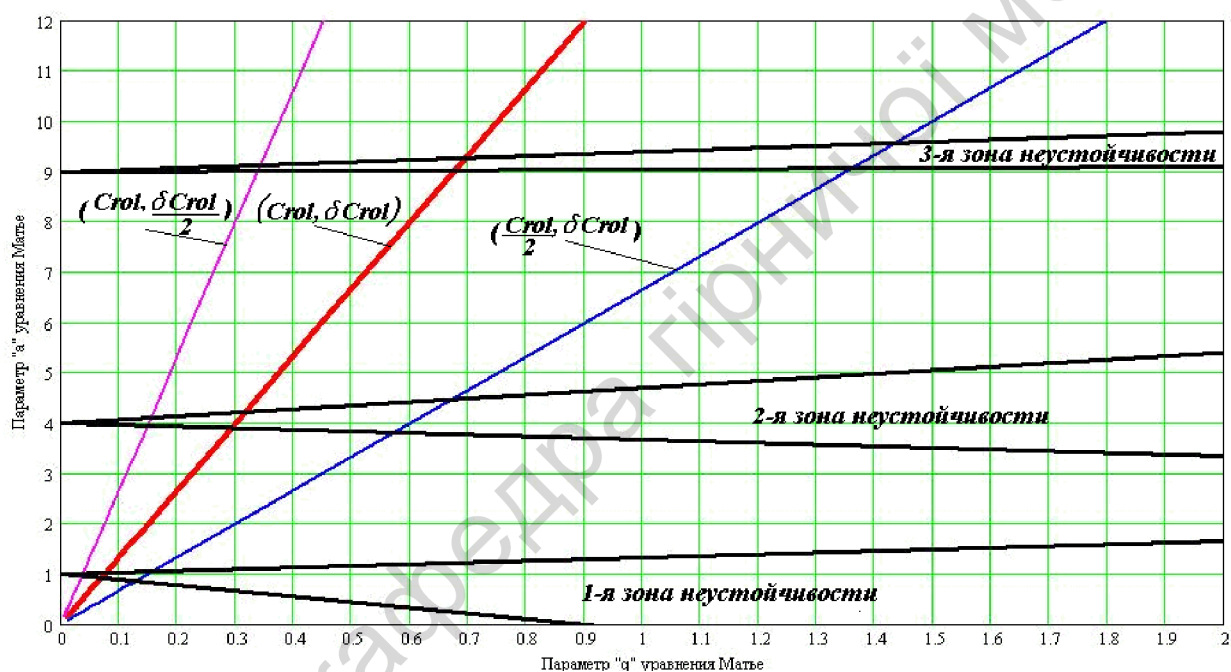


Рис.5. Диаграмма устойчивости движения сосуда при неполном контакте боковых роликов с проводниками

В работе [4] показано, что наличие диссипации в условиях параметрического возбуждения приводит к тому, что резонансное нарастание амплитуд колебаний реализуется, только начиная с некоторого определенного значения амплитуды возбуждения (параметр «q»), которое тем больше, чем больше коэффициент вязкого сопротивления системы. В нашем случае это означает, что безопасная эксплуатация систем «сосуд-армировка» при неполном контакте роликов с прямоугольными проводниками или при скругленных гранях проводников может оказаться

невозможной при определенных сочетаниях параметров системы без применения специальных средств дополнительного рассеивания энергии.

Результаты проведенных исследований позволили обосновать рациональные параметры усовершенствованной конструкции направляющих скипов для стволов с нарушенной геометрией, обосновать допустимые параметры взаимного расположения роликов и проводников, повысив тем самым надежность и безопасность эксплуатации существующих подъемных комплексов.

### Литература

1. Ильина С.С. Моделирование динамики системы «сосуд-армировка» в программном комплексе SolidWorks-SolidMotion-CosmosWorks / С.С. Ильина // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок. Сб. науч. тр. / НИИ горной механики им. М.М. Федорова. – Донецк. -2010-2011. – №104-105. -С.48-55.

2. Ильина С.С. Исследование жесткостных характеристик двухрычажных роликовых направляющих шахтных подъемных сосудов. // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепрпетровск. – 2008. – Вып. 76. – С.217-226.

3. Ильина С.С. Экспериментальные и теоретические исследования опорной жесткости направляющих сосудов и армировок вертикальных стволов. // Стальные канаты. -№8.- Сб. науч. трудов – Одесса – 2010. – С.79-102.

4. В.В.Болотин Динамическая устойчивость упругих систем. ГОСТЕХИЗДАТ. –Москва. - 1956. -600 с.

### Авторы

Самуся Владимир Ильич – заведующий кафедрой горной механики Национального горного университета, д-р техн. наук, профессор, 49005,

Украина г. Днепропетровск, пр. К. Маркса, 19. тел/факс 0562 47 05 36 e-mail:  
vsamusya@gmail.com

Ильина Светлана Сергеевна – аспирант Национального горного  
университета, 49005, Украина г. Днепропетровск, пр. К. Маркса, №19.  
тел/факс 0562 47 05 36 e-mail: sveta\_il86@mail.ru

ДВНЗ "НГУ" кафедра гірничої механіки