

УДК 622.673.1

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМ «СОСУД–АРМИРОВКА» В СТВОЛАХ С НАРУШЕННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

**В.И. Самуся, И.С. Ильина, С.С. Ильина**

Национальный горный университет (49600, Украина, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19)

## COMPUTER MODELING AND INVESTIGATION OF DYNAMICS OF SYSTEM “VESSEL–REINFORCEMENT” IN SHAFTS WITH BROKEN GEOMETRY

**V.I. Samusia, I.S. Iliina, S.S. Iliina**

National Mining University of Ukraine, Dnepropetrovsk (19 K. Marks av., Dnepropetrovsk 49600, Ukraine)

Получена / Received: 01.06.2016. Принята / Accepted: 01.09.2016. Опубликовано / Published: 30.09.2016

### Ключевые слова:

шахтный ствол, скип, клеть, армировка шахтного ствола, динамика шахтных подъемных установок, система «сосуд–армировка», предохранительный башмак, коробчатый проводник, роликовые направляющие, расстрел.

Представлены результаты математического моделирования и анализа аппаратных измерений динамического взаимодействия подъемных сосудов с жесткой армировкой шахтных стволов. На основании анализа данных значительного числа аппаратных измерений контактных нагрузок между предохранительными башмаками скольжения и проводниками показано, что при длительной эксплуатации процесс динамического взаимодействия сосуда с проводниками становится существенно неоднородным по глубине стволов. В них появляются участки с различными параметрами кривизны профилей проводников, различной степенью износа проводников и расстрелов. Показано, что указанные факторы приводят к тому, что в процессе движения сосуд испытывает различные по уровню и характеру динамические возмущения со стороны проводников и создает различные по уровню ответные динамические нагрузки на армировку по участкам ствола.

Показано, что знакопостоянные отклонения проводников от вертикали на протяженных участках ствола при движении сосуда на рабочей скорости приводят к одностороннему прижатию рабочих граней башмаков к проводникам и возбуждению ударного взаимодействия с уступами на стыках проводников, которое невозможно предотвратить за счет упругости роликовых направляющих.

Разработаны конечно-элементные модели динамического взаимодействия сосуда с армировкой, учитывающие инерционные параметры подъемных сосудов, смещение центра масс груза в сосуде, фактические пространственные профили проводников, опорную жесткость армировки проводников и их износ, диаграммы скорости подъемной машины, кинематические зазоры в парах «башмак–проводник».

Выполнены исследования спектральных характеристик возмущающих воздействий на подъемный сосуд профилей проводников по данным фактических маркшейдерских измерений их отклонений от вертикали в действующих стволах.

Показано, что на участках ствола, на которых частоты внешнего возмущения со стороны армировки оказываются близкими к частотам собственных колебаний сосудов с упругими роликовыми направляющими, в системах «сосуд–армировка» возникает эффект резонансного возбуждения горизонтальных колебаний по угловым и поступательным степеням свободы с повышенным уровнем контактных нагрузок на армировку.

Получены зависимости уровня контактных нагрузок на армировку от величины смещения центра масс груза в сосуде.

### Key words:

mine shaft, skip, cage, mine shaft reinforcement, mine winding plants' dynamics, "vessel – reinforcement" system, protective runner, box guide, roller directors, bunton.

The article describes results of mathematical modeling and analysis of instrumental measurements of the dynamic interaction between lifting vessels and reinforcement of mine shafts. Based on the analysis of instrumental measurements data of contact loads between the protective runner and the guides shown that the process of long-term operation of the dynamic interaction of vessel with guides becomes substantially uniform in the shafts depth. There are sites with different parameters of guides profiles curvature, varying degrees of wear of guides and buntons. The specified factors lead to the fact that during movement the vessel experiences dynamic indignations, various on level and character, from guides. And vessel creates reciprocal dynamic loads on reinforcement, various on level.

It is shown that constant-sign deviation from vertical of guides on long sections of shafts during the motion of the vessel at operating speeds result in a one-sided pressing of working faces of the runner to the guides and the excitation of shock interaction with steps at the junctions of guides, which can not be prevented by the elasticity of the roller directors.

Finite element models of the dynamic interaction of vessel with a reinforcement are developed. They take into account the lifting vessels inertia parameters, shifting the mass center of cargo in the vessel, actual spatial profiles of the guides, the support rigidity and wear of the reinforcement with guides, charts hoist speed, cinematic gaps in pairs of "runner – guide".

Researches of spectral characteristics of revolting impacts on lifting vessel from guides profiles according to the actual surveying measurements of their deviations from a vertical in the operating shafts are executed.

It is shown that the shafts sections, where the frequency of the external perturbation by reinforcement are close to the natural frequency of the vessel with the elastic roller directors, in the "vessel – reinforcement" systems appears an effect of resonant excitation of horizontal fluctuations in angular and translational degrees of freedom with a high level of contact loads on the reinforcement.

The dependences of the contact loads level on reinforcement from magnitude of cargo mass center displacement in the vessel are received.

**Самуся Владимир Ильич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горной механики (тел.: +380 503 61 14 98, e-mail: vsamusya@gmail.com).

**Ильина Инна Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики (тел.: +380 509 65 17 54, e-mail: iljina\_is@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

**Ильина Светлана Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики (тел.: +380 505 48 27 58, e-mail: sveta\_il86@mail.ru).

**Vladimir I. Samusia** (Author ID 55522646700) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mining Mechanics (tel.: +380 503 61 14 98, e-mail: vsamusya@gmail.com).

**Inna S. Iliina** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining Mechanics (tel.: +380 509 65 17 54, e-mail: iljina\_is@mail.ru). The contact person for correspondence.

**Svetlana S. Iliina** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining Mechanics (tel.: +380 505 48 27 58, e-mail: sveta\_il86@mail.ru).

## Введение

Проблема стабилизации динамического взаимодействия скипов с проводниками жесткой армировки имеет достаточно сложный характер. Ее решение определяется соотношением между параметрами систем «скип–армирование» и, в частности, соотношением между собственными частотными характеристиками колебаний скипов на роликоопорах и внешними поличастотными возмущениями со стороны проводников при условии, что система работает в устойчивом режиме по отношению к параметрическим возмущениям, вызванным переменной жесткостью на шаге армировки. Скипы на угольных и рудных подъемах горно-добывающих предприятий работают на скорости 8–12 м/с, осуществляя, как правило, спуск/подъем по двум коробчатым проводникам, с которыми они взаимодействуют через упругие роликовые направляющие и жесткие стальные башмаки скольжения. Каждый скип подвешен на одном канате.

Характерной особенностью значительного количества стволов является то, что они находятся в зоне влияния сдвижения горных пород и имеют существенные нарушения вертикальности проводников на локальных участках. При проведении динамических испытаний на скорости подъема 10–11 м/с на этих участках фиксируется появление повышенных контактных нагрузок на проводники со стороны подъемных сосудов.

Во время движения по стволу скип совершает вынужденные горизонтальные колебания в лобовой и боковой плоскостях в пределах кинематических зазоров между рабочими поверхностями предохранительных башмаков и проводников. Амплитуды и частоты этих колебаний определяются инерционными параметрами скипа, жесткостью роликовых направляющих, параметрами кривизны профиля каждого проводника и вертикальной скоростью движения скипа.

В стволе присутствуют участки проводников с разными параметрами кривизны. Поэтому амплитудно-частотные параметры горизонтального возмущения, действующего на скип со стороны проводников и передающегося через упругодиссипативные узлы роликоопор, существенно различаются на разных участках ствола.

В стволах существуют участки, на которых отклонения проводников от вертикали малы, не превышают 3–5 мм и распределены по

протяженному участку ствола, имеющему длину 10–30 длин сосуда. На таком участке скип движется в безударном режиме, совершая низкочастотные колебания с опиранием на проводники только через подпружиненные роликовые направляющие в пределах рабочего хода пружин, т.е. совершает проектный безударный режим взаимодействия с армировкой.

Также в стволах есть участки, на которых локальные отклонения профиля носят знакопеременный характер или имеются значительные односторонние отклонения от вертикали. Если амплитуды знакопеременных или локальных отклонений профиля проводников от вертикали достигают 20–30 мм на длине скипа (это 3–4 пролета ярусов армировки), амплитуды вынужденных колебаний также выходят за пределы кинематического зазора (по требованиям правил безопасности максимальный зазор не должен превышать 23 мм на сторону), и в жесткий контакт с проводниками вступают рабочие поверхности предохранительных башмаков.

Экспериментально установлено, что максимальные контактные усилия в случае ударно-циклического взаимодействия сосуда с проводниками в этих условиях достигают 50–60 кН [1]. Высокий уровень эксплуатационных нагрузок приводит к ускоренному износу проводников, снижает ниже допустимого уровня динамические запасы прочности проводников и расстрелов, узлов их крепления. Высокие динамические контактные нагрузки приводят к ускоренному образованию усталостных трещин, разрыву сварочных швов проводников. Поэтому главным фактором, определяющим надежность и безопасность работы системы «сосуд – жесткая армировка», является уровень динамических нагрузок на проводники со стороны подъемного сосуда.

Эти нагрузки определяются двумя составляющими: нагрузка, воспринимаемая роликовым амортизатором, и нагрузка, воспринимаемая жестким предохранительным башмаком сосуда. Максимальный уровень этих нагрузок главным образом определяется кривизной проводников на локальном участке ствола, вертикальной скоростью и массой сосуда.

Роликовые подпружиненные амортизаторы скипа предназначены для его удержания в центрированном положении относительно коробчатых проводников в пределах кинематических зазоров и предотвращения жесткого контакта башмаков с проводниками при колебаниях сосуда.

Основной характеристикой, определяющей работу роликовой направляющей подъемного сосуда, является вид зависимости между горизонтальным перемещением точки контакта ролика с проводником и усилием сопротивления, которое определяется конструкцией, параметрами и упругодиссипативными характеристиками системы направляющих.

Фактически надо обеспечить такой режим движения сосуда относительно армировки по всему стволу (отдельно в лобовой и боковой плоскостях), чтобы все горизонтальные возмущения от проводников поглощались с помощью системы роликовых амортизаторов, не приводя к жесткому ударному контакту башмаков с проводниками, т.е. обеспечить режим движения с суммарными нагрузками на проводник не более 10 кН [2].

Для решения данной задачи можно применить различные системы математического моделирования, включающих как непосредственный вывод дифференциальных уравнений движения системы с их последующим аналитическим и численным решением классическими методами, так и конечно-элементное моделирование в стандартных системах программирования, например, в системе SolidMotion.

### **Компьютерное моделирование динамических процессов в системе «сосуд–армировка» в стволах с нарушенной геометрией**

Математическому моделированию динамики системы «сосуд–армировка» посвящено достаточно большое число работ. Наиболее полно на сегодняшний день оно освещено в работах профессора В.И. Дворникова [3–5]. Главная особенность этих исследований состоит в том, что в них решались задачи динамики и определения параметров элементов системы направляющих для стволов с проектными параметрами профилей проводников. В стволах с нарушенной геометрией геометрические параметры профилей проводников могут существенно отличаться от проектных, и их корректировка может быть сильно затруднена в связи со сложными горно-техническими и геологическими условиями.

Вариант применения системы SolidMotion наиболее удобен, но имеет свои ограничения по возможностям моделирования свойств реальных систем. Поэтому на первом этапе исследований воспользуемся возможностями вычислительной системы SolidMotion для

моделирования и исследования взаимодействия скипов с армировкой в реальных условиях стволов с роликовыми направляющими традиционной конструкции, снабженными резинопружинными амортизаторами с постоянными, в пределах кинематических зазоров, жесткостями амортизирующих блоков, определенными экспериментально. Конструкции направляющих, их вид и результаты определения их жесткостных параметров приведены в работе [6].

Для построения вычислительной конечно-элементной модели в системе SolidMotion подъемный сосуд моделируется твердым недеформируемым объемным телом, габаритные размеры и массы которого равны габаритным размерам и массам скипов, работающих в железорудных стволах.

Параметры подъемных установок, использованные при расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Параметры скипового подъема

Параметр	Характеристика
Высота подъема, м	940 м
Скорость подъема (рабочая), м/с	10,9 м/с (рабочая)
Тип подъемных сосудов	Скипы: СО-9,5-174-0.12.000-ФО
Собственная масса сосудов, кг	17000
Грузоподъемность, кг	До 23 000

При моделировании горизонтального движения скипа считается, что он зафиксирован в вертикальном направлении относительно неподвижного пространства, при этом проводники считаются абсолютно твердыми телами, которые движутся вертикально относительно скипа по заданным законам, взаимодействуя с ним через четыре упругодиссипативные связи. Характеристики связей задаются стандартным образом в системе моделирования. Скип совершает горизонтальное движение под действием четырех вынуждающих кинематических воздействий в лобовой и восьми в боковой плоскостях по заданным функциям времени законам как система с пятью степенями свободы.

Твердотельная модель скипа взаимодействует с моделями участков проводников посредством упругодиссипативных связей в точках установки на скипе реальных роликовых направляющих (рис. 1).

Горизонтальные перемещения проводников относительно скипа моделируются функциями времени, которые определяются специальным образом с использованием средств математи-

ческого процессора на основании реальных маркшейдерских данных отклонений проводников от вертикали на каждом ярусе армировки, данных раскладки номеров ярусов по глубинным отметкам в стволе и диаграммы вертикальной скорости скипа, измеренной цифровым блоком аппаратуры управления подъемной машиной.

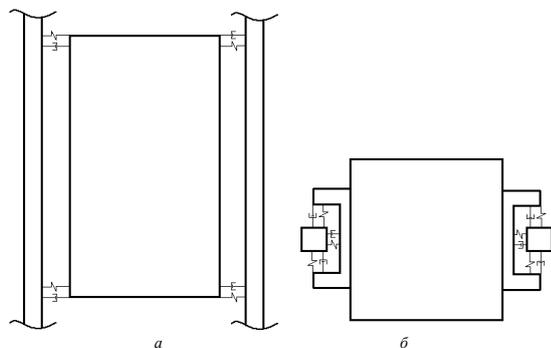


Рис. 1. Схема твердотельной модели системы «скип – роликовые направляющие – проводники»: а – вид сбоку; б – вид сверху

Проводники установлены на заданных расстояниях от скипа, равных реальным кинематическим зазорам на сторону, их граничные значения – 15–23 мм – определяются правилами безопасности. При вычислительных экспериментах зазоры варьируются внутри и за пределами этих границ, так как в стволах с нарушенной геометрией во избежание заклинивания сосудов на искривленных участках зазоры могут достигать 30–40 мм, а на участках сужения колеи уменьшаться до 10 мм на сторону.

На рис. 2 приведены профили проводников в скиповых отделениях стволов.

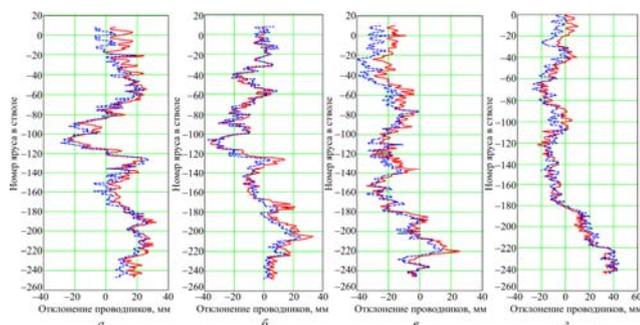


Рис. 2. Профили проводников: а – 7/8 ствола № 2; б – 9/10 ствола № 2; в – 1/2 ствола № 1; г – 5/6 ствола № 1

При движении скип проезжает по проводникам, контактируя с каждым сечением поочередно верхними и нижними направляющими, отдельно с одной и с другой

стороны. Для построения функций, задающих мгновенные значения горизонтального отклонения каждого проводника от вертикали на верхнем и нижнем поясах скипа, в зависимости от времени в цикле выполняются вспомогательные расчеты в программной системе Mathcad.

Для нижнего яруса сосуда момент времени, в котором задаются горизонтальные перемещения участка проводников, вычисляется со сдвижкой на время прохода сосудом пути, равного высоте сосуда с текущим значением скорости.

В результате работы соответствующего программного блока строятся файлы с матрицами горизонтальных перемещений проводников в развертке по времени в цикле, которые в дальнейшем считываются системой SolidWorks-SolidMotion при исследовании динамики скипа.

На рис. 3 приведены фактические диаграммы линейных скоростей вращения барабанов подъемных машин (скоростей подъема/спуска скипов) в указанных стволах.

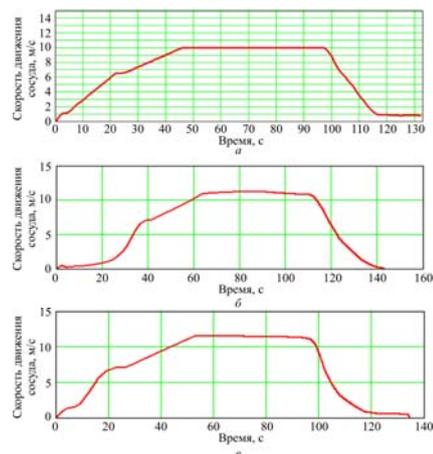


Рис. 3. Диаграммы скорости подъема в скиповых отделениях: а – южном и северном ствола № 1; б – породном ствола № 1; в – южном и северном ствола № 2

Видно, что фактические диаграммы существенно отличаются от традиционной пятипериодной диаграммы скорости. Ниже приведены результаты численных исследований динамики систем «скип–армирование» в системе SolidMotion [7].

Исследуем зависимость динамических нагрузок между скипом и проводниками в указанных скиповых отделениях стволов от величины кинематического зазора и жесткости, присущих действующим типам направляющих. При выполнении данных исследований диссипацией энергии будем пренебрегать для получения более чистой картины

взаимодействия (контактные нагрузки при этом будут заведомо больше, чем с учетом диссипации энергии).

На рис. 4, *a* приведены графики лобовых колебаний южного скипа между проводниками в лобовой плоскости при начальном зазоре в районе базовой отметки 15 мм на сторону с жесткостью каждой из роликовых направляющих 150 кН/м.

Видно, что в процессе движения скип на одних участках движется в безударном режиме, взаимодействуя с проводниками только через роликовые направляющие, а на других вступает с ними в жесткий контакт. При этом частота колебаний на участках ударного взаимодействия больше, чем на участках плавного движения.

На рис. 4, *б* приведены графики контактных нагрузок взаимодействия южного скипа ствола № 2 с проводниками в этом же цикле подъема на этапах разгона, равномерного движения и начала замедления. Видно, что на участках значительных местных искривлений проводников возникают ударные нагрузки со стороны скипа по верхнему и нижнему поясам направляющих.

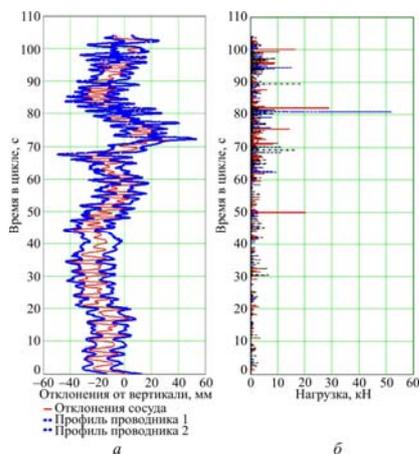


Рис. 4. Графики: *a* – перемещений башмаков верхнего пояса скипа в проводниках по стволу; *б* – контактных усилий между проводниками и скипом по стволу

На рис. 5, *a, б* приведены укрупненные фрагменты этих же графиков на участке интенсивного ударно-циклического взаимодействия скипа с проводниками от 70-й до 100-й секунды подъема. Видно, что частота соударений скипа с проводниками с учетом контактов всех четырех башмаков достигает 4–5 Гц. Кроме того, на участках с различными параметрами профилей величины нагрузок отличаются друг от друга в несколько раз.

Несмотря на доминирующий характер взаимодействия с небольшим уровнем контактных нагрузок, встречаются отдельные участки цикла с одиночными резкими ударами значительной величины.

На рис. 5, *в* и *г* приведены графики перемещений скипа и контактных нагрузок для случая, когда один из проводников из-за опирания на расстрел, усиленный упором, имеет жесткость в 2 раза большую, чем другой. Из графика на рис. 5, *г* видно, что в этом случае контактные нагрузки на более жесткий расстрел примерно в 2 раза больше, чем на второй.

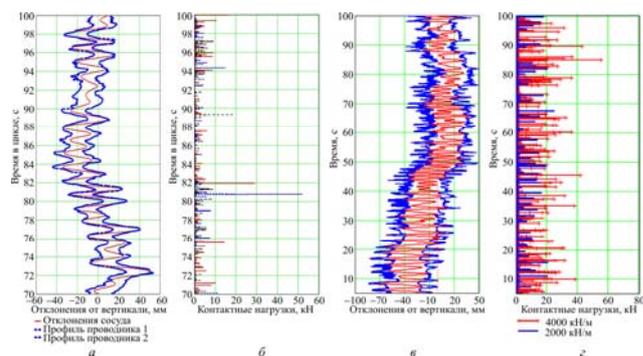


Рис. 5. Графики: *a* – перемещений башмаков верхнего пояса скипа в проводниках по участку ударно-циклического взаимодействия; *б* – контактных усилий между проводниками и скипом по участку ударно-циклического взаимодействия; *в* – перемещений башмаков верхнего пояса скипа в проводниках с разной опорной жесткостью; *г* – контактных усилий при разной опорной жесткости проводников

В каждый момент времени динамика сосуда определяется параметрами профиля на текущем участке движения. Параметры профиля каждого отдельного проводника являются случайным набором чисел, обладающих собственными статистическими характеристиками. Динамика сосуда формируется как собственными параметрами профиля каждого из двух его проводников, так и их сочетанием между собой.

Исследования на вычислительной модели показывают, что при движении скипа по одной и той же диаграмме скорости, при одной и той же жесткости направляющих изменение кинематических зазоров создает в системе тенденцию к общему снижению уровня контактных нагрузок. Но при этом их пиковые значения реализуются в различных точках ствола в пределах общего участка с повышенным уровнем ударно-циклического взаимодействия.

При разной жесткости направляющих сосудов по-разному входит в каждый последующий участок ствола. Мгновенные значения кинематических зазоров на входе в каждый последующий по ходу движения участок формируются в конце предыдущего участка и зависят от жесткостей всех направляющих (в лоб и вбок). Поэтому наезд сосуда на одну и ту же неровность профиля при разных начальных зазорах на входе в участок с неровностью дает разные контактные нагрузки, так как встреча каждой направляющей с наклонным участком проводника происходит с разными относительными горизонтальными скоростями соударения.

На рис. 6 показаны графики резонансных частот конечно-элементной модели системы «скип – роликовые направляющие – проводники» по пяти степеням свободы, построенные с помощью системы программирования SolidSimulation в зависимости от приведенных к точке контакта ролика с проводником жесткостей направляющих.

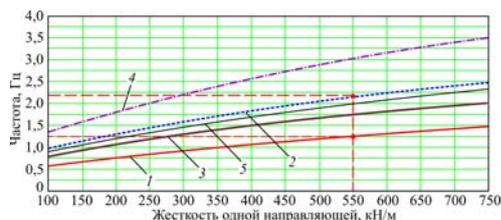


Рис. 6. Собственные частоты системы «скип – роликовые направляющие»: 1 – поступательная частота в лобовой плоскости; 2 – угловая частота в лобовой плоскости вокруг боковой оси инерции; 3 – поступательная частота в боковой плоскости; 4 – угловая частота в боковой плоскости вокруг лобовой оси инерции; 5 – угловая частота в боковой плоскости вокруг оси каната

Видно, что с увеличением жесткости каждой роликоопоры до 7 раз частоты колебаний в лобовой и боковой плоскостях по каждой из степеней свободы возрастают в  $\sqrt{7} = 2,6$  раза. При этом из-за того, что в боковой плоскости колебания сосуда определяются жесткостями четырех одинаковых роликоопор, а в лобовой восьмью, поступательные и наклонные частоты колебаний в боковой плоскости выше соответствующих частот в лобовой плоскости (кривые 2 и 4, 1 и 3) в  $\sqrt{2} = 1,4$  раза. Это полностью согласуется с физической сущностью исследуемого процесса и подтверждает корректность разработанной вычислительной модели.

На рис. 7 приведены спектры геометрических параметров профилей системы проводников 7/8 южного скипового отделения ствола № 2 (см. рис. 2, а) на участке повышенного уровня ударного взаимодействия: поступательного перемещения скипа и угла наклона в лобовой плоскости на интервале подъема 60–100 с по диаграмме скорости, приведенной на рис. 3, в.

Данные рис. 7 свидетельствуют, что профиль системы проводников 7/8 в лобовой плоскости при диаграмме скорости подъема (см. рис. 3, в) на участке подъема 60–100 с создает возмущения наклонным колебаниям скипа с частотами в интервалах: 0,1–0,7; 1,0–1,5; 2,0–2,5 Гц. По поступательным лобовым перемещениям скипа существенные возмущения присутствуют только на очень низких частотах (от 0,1 до 0,25 Гц).

Сравнивая эти спектры с графиками резонансных частот на рис. 6, видим, что наибольшая динамическая реакция скипа на профиль данных проводников приходится на его наклонные колебания в лобовой плоскости (кривая 2, диапазон резонансной частоты 0,5–2,5 Гц). Это хорошо согласуется с картиной соударений, приведенной на рис. 5, б, на которой башмаки поочередно вступают в ударный лобовой контакт с проводниками.

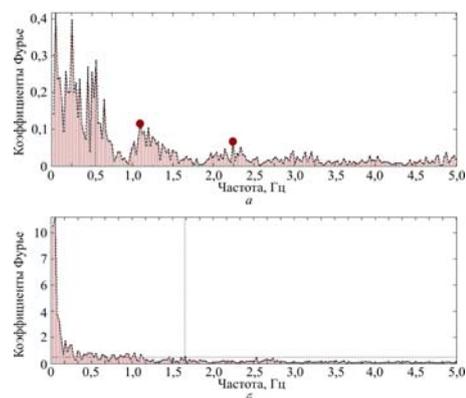


Рис. 7. Спектр возмущений скипа проводниками: а – по углу наклона его оси; б – по его поступательному перемещению

На рис. 8 приведены спектры колебаний скипа при жесткостях пружин роликов 150 и 550 кН/м на участке интенсивного ударного взаимодействия с проводниками (рис. 5). Видно, что в первом случае доминируют частоты 0,5–0,65 и 0,8–1,2 Гц. Они совпадают с резонансными частотами скипа при данной жесткости пружин (рис. 6, кривые 1 и 2).

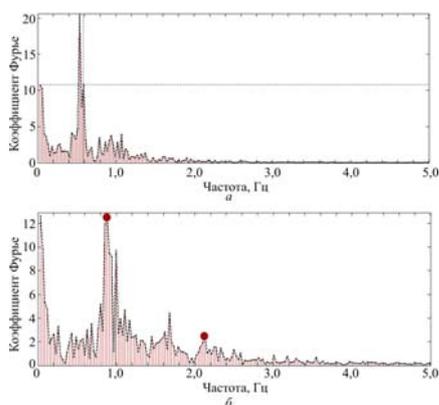


Рис. 8. Спектр колебаний скипа при жесткости пружин: *a* – 150 кН/м; *б* – 550 кН/м

Во втором случае значения доминирующих частот возрастают до 0,8–1,25; 1,5–1,8; 2,1–2,3 Гц. Они также лежат в области резонансных частот при этой жесткости пружин роликов.

Численное исследование зависимостей максимальных контактных нагрузок в цикле подъема скипа от жесткости роликоопор при разных значениях кинематических зазоров на сторону на базовой отметке ствола показало, что с увеличением зазора максимальные нагрузки имеют тенденцию к уменьшению.

Это качественно согласуется с результатами обработки данных измерений нагрузок аппаратурой АКН, приведенными в работе [8] для вертикального ствола Таштагольского рудника, и соответствует физической сущности исследуемого процесса (отсутствие в системе параметрического резонанса, вызванного переменностью жесткости проводников на длине шага армировки) [9–20].

Аналогичная тенденция наблюдается при увеличении жесткости роликоопор с неизменными значениями кинематических зазоров на базовой отметке. Контактные нагрузки между башмаками и проводниками снижаются с ростом жесткостей направляющих в пределах 100–700 кН/м до 3 раз для приведенных на рис. 2, *a* профилей проводников при подъеме грузевого скипа по диаграмме скорости, приведенной на рис. 3, *в*. При этом их пиковые значения реализуются в различные моменты времени на разных моделируемых проездах по одинаковым диаграммам скорости.

Графики на рис. 9 показывают средние нагрузки за время прохода скипом участка ствола с повышенными ударными контактами башмаков с проводниками в интервале 60–100 с подъема в зависимости от жесткостей направляющих для различных значений базовых зазоров. Видно, что контактные нагрузки для всех значений зазора

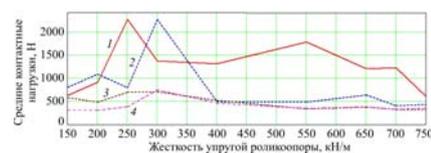


Рис. 9. Зависимость средних нагрузок за время движения скипа по участку цикла подъема 60–100 с от жесткости направляющих: 1, 2 – направляющие верхнего пояса на противоположных проводниках; 3, 4 – направляющие нижнего пояса на противоположных проводниках

имеют максимум в интервале жесткостей 250–350 кН/м. Сопоставительный анализ этих результатов с кривыми на рис. 7 и 8 показывает, что частоты возмущений от профилей проводников на данном участке ствола оказываются наиболее близкими к собственным частотам колебаний скипа при этих значениях жесткостей роликоопор, что создает предпосылки для резонансного нарастания его колебаний в этом отделении ствола.

## Выводы

1. В дорезонансном (по критерию параметрического возбуждения, вызванного периодичностью жесткости проводников) режиме взаимодействия подъемных сосудов с армировкой доминирующее влияние на уровень динамических нагрузок оказывает совокупность параметров: искривления проводников на локальных участках ствола в 2–3 длины подъемного сосуда, отклонения центра масс груза от оси подвеса каната, суммарные кинематические зазоры в парах «башмак–проводник».

2. Спектральные параметры знакопеременных отклонений проводников от вертикали в зависимости от скорости вертикального движения подъемного сосуда носят поличастотный характер и при определенных сочетаниях инерционных параметров сосуда, упругости роликовых амортизаторов, жесткости армировки могут оказываться близкими к частотам собственных колебаний системы «сосуд–армировка» и вызывать рост динамических нагрузок на армировку.

3. Твёрдотельное математическое моделирование взаимодействия подъемных сосудов с армировкой позволяет определить уровень и характер изменения динамических усилий взаимодействия сосудов с проводниками в процессе подъема при движении по рабочей диаграмме скорости.

4. В сочетании с данными аппаратурного износа проводников и расстрелов предложенные методы позволяют определить зависимости уровня динамического взаимодействия от параметров коррекции профилей проводников при неизменных других параметрах.

## Список литературы

1. Гавруцкий А.Е., Мусиенко В.Д., Осадчая Л.С. Исследование горизонтальных нагрузок на армировку в скиповом стволе ЗЖРК № 1 // Шахтное строительство. – 1981. – № 7. – С. 13–15.
2. Гаркуша Н.Г. Об истории разрешения одной крупной проблемы горной механики XX века // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 1999. – № 2 (61). – С. 5–8.
3. Дворников В.И. Об уравнениях движения шахтного подъемного сосуда с учетом масс проводников систем // Горный журнал. – 1975. – № 1. – С. 126–133.
4. Дворников В.И. Основы динамики шахтного подъема с больших глубин // *Gornictwo*. – 1990. – № 192. – С. 101–107.
5. Дворников В.И., Кърцелин Е.Р. Теоретические основы динамики шахтного подъемного комплекса. – София, 1997. – 363 с.
6. Ильина С.С. Анализ работы роликовых рычажных направляющих в промышленных условиях скипового подъема // Стальные канаты: сб. науч. тр. / МАЙСК. – Одесса: Экология, 2009. – № 7. – С. 103–110.
7. Ильина С.С. Исследование влияния параметров профилей проводников на динамику скипов в стволах с нарушенной геометрией // Динамика и прочность машин: сб. науч. трудов. – Харьков: ХПИ, 2011. – № 52. – С. 85–93.
8. Инструкция по послестроительной (послеуглубочной) диагностике армировки шахтных стволов. – Кривой Рог: НИГРИ, 1994. – С. 9.
9. Ильина С.С. Моделирование динамики системы «сосуд–армировка» в программном комплексе SolidWorks – SolidMotion – CosmosWorks // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок: сб. науч. тр. – Донецк: НИИ ГМ им. М.М. Федорова, 2010–2011. – № 104–105. – С. 56–78.
10. Ильин С.Р., Трифанов Г.Д., Воробель С.В. Комплексные экспериментальные исследования динамики скипов рудоподъемного ствола // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – Вып. 5. – С. 30–35.
11. Ильин С.Р., Трифанов Г.Д. Динамическая диагностика состояния систем «скип – армировка» рудоподъемного ствола // Проблемы рационального природопользования: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Пермь, 2008. – С. 107–124.
12. Бондаренко В.И., Самуся В.И., Смоланов С.Н. Мобильные подъемные установки для аварийно-спасательных работ в шахтных стволах // Горный журнал. – 2005. – № 5. – С. 99–100.
13. Influence of dynamic processes in mine winding plants on operating safety of shafts with broken geometry / S. Iljin, V. Samusya, I. Iljina, S. Iljina // *Theoretical and practical solutions of mineral resources mining*. – Glivice: Taylor & Francis group, 2015. – P. 425–429. DOI: 10.1201/b19901-74
14. Iljin S.R. The experience of dynamic apparatus control and estimation of exploitation system safety “vessel – reinforcement” of vertical mining shafts // *The International Journal of Transport & Logistics*. – 2010. – Is. 7. – P. 395–403.
15. Ильин С.Р., Ильина И.С., Ильина С.С. Параметрические колебания в системах «подъемный сосуд – армировка» шахтных стволов // *Transport szybowy: monografia / Instytut Techniki Gornicej*. – Glivice, 2015. – P. 244–265.
16. Измерительно-аналитическая компьютерная технология диагностики и управления состоянием оборудования шахтных подъемных комплексов / С.Р. Ильин, Б.С. Послед, Л.Г. Адорская, С.В. Самуся, И.С. Ильина, В.П. Чернетченко, В.А. Николаев // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2012. – Вып. 93. – С. 28–38.*
17. Ильин С.Р. Адресный динамический контроль жесткой армировки вертикальных стволов рудников Украины с применением портативных цифровых измерительных станций // *Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Проектное бюро «Рейкьявик», 2010. – Вып. 4. – С. 46–52.*
18. Tejszerska D., Wojnarowski J. Mathematical model of vibrations of mine hoists, coupled with longitudinal vibrations // *Zeszyty naukowe Politechniki slaskiej*. – Glivice, 1989. – Z. 181. – P. 107–118.
19. Ильин С.Р., Трифанов Г.Д., Воробель С.В. Повышение безопасности эксплуатации шахтных стволов путем динамического мониторинга систем «сосуд–армировка» портативными измерительными станциями // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2013. – № 1. – С. 2–8.
20. Ильин С.Р. Анализ развития, результаты и перспективы работ по динамической диагностике и мониторингу эксплуатационного состояния армировки шахтных стволов // *Transport szybowy: monografia / Instytut Techniki Gornicej*. – Glivice, 2013. – P. 175–199.

## References

1. Gavrutskii, A.E., Musienko V.D., Osadchaia L.S. Issledovanie horizontal'nykh nagruzok na armirovku v skipovom stvole ZZHRK № 1 [Study of of horizontal loads on reinforcement in the skip shaft ZZHRK no. 1]. *Shakhtnoe stroitel'stvo*, no.7, pp.13-15.
2. Garkusha N.G. Ob istorii razresheniia odnoi krupnoi problemy gornoj mekhaniki XX veka [On the history of the permission of a major problem of mining mechanics of the XX century]. *Gornaia elektromekhanika i avtomatika: nauch.-tekhn. sb.*, 1999, no.2 (61), pp.5-8.
3. Dvornikov, V.I. Ob uravneniakh dvizheniia shakhtnogo pod"emnogo sosuda s uchetom mass provodnikov sistem [On the equations of mine lifting vessel motion, taking into account system conductor's masses]. *Gornyi zhurnal*, 1975, no.1, pp.126-133.
4. Dvornikov V.I. Osnovy dinamiki shakhtnogo pod"ema s bol'shikh glubin [Fundamentals of dynamics of mine lifting from great depths]. *Gornictwo*, 1990, no.192, pp.101-107.
5. Dvornikov V.I., K"rtselin E.R. Teoreticheskie osnovy dinamiki shakhtnogo pod"emnogo kompleksa

[Theoretical basis of the dynamics of the mine lifting complex]. Sofia, 1997, 363 p.

6. Il'ina S.S. Analiz raboty rolikovykh rychazhnykh napravliaiushchikh v promyshlennykh usloviakh skipovogo pod"ema [Analysis of the roller lever guiding in industrial environments skip lift]. *Stal'nye kanaty: sbornik nauchnykh trudov*. Odesa: Ekologiya, 2009, no.7, pp.103-110.

7. Il'ina S.S. Issledovanie vliianiia parametrov profilii provodnikov na dinamiku skipov v stvolakh s narushennoi geometrii [Investigation of the influence of parameters of conductors profiles on the dynamics of skips in shafts with broken geometry]. *Dinamika i prochnost' mashin: sbornik nauchnykh trudov*. Khar'kov: KhPI, 2011, no.52, pp.85-93.

8. Instruksiiia po poslestroitel'noi (posleuglubochnoi) diagnostike armirovki shakhtnykh stvolov [Instructions afterconstruction (after in-depth) diagnosis of reinforcement shafts]. Krivoi Rog: NIGRI, 1994, p.9.

9. Il'ina S.S. Modelirovanie dinamiki sistema «sosud-armirovka» v programnom komplekse SolidWorks – SolidMotion – CosmosWorks [Modeling “vessel-reinforcement” system dynamics in the software package SolidWorks – Solid Motion – CosmosWorks]. *Problemy ekspluatatsii oborudovaniia shakhtnykh stacionarnykh ustanovok: sbornik nauchnykh trudov*. Donetsk: NII GM im. M.M. Fedorova, 2010–2011, no.104-105, pp.56-78.

10. Il'in S.R., Trifanov G.D., Vorobel' S.V. Kompleksnye eksperimental'nye issledovaniia dinamiki skipov rudopod"emnogo stvola [Complex experimental research of shaft skips dynamic processes]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2011, vol.5, pp.30-35.

11. Il'in S.R., Trifanov G.D. Dinamicheskaia diagnostika sostoianiia sistem «skip – armirovka» rudopod"emnogo stvola [Dynamic diagnostics of systems “skip – reinforcement” ore lifting shaft]. *Problemy ratsional'nogo prirodopol'zovaniia: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*. Perm', 2008, pp.107-124.

12. Bondarenko V.I., Samusia V.I., Smolanov S.N. Mobil'nye pod"emnye ustanovki dlia avariino-spasatel'nykh rabot v shakhtnykh stvolakh [Mobile lifting equipment for rescue operations in mine shafts]. *Gornyi zhurnal*, 2005, no.5, pp.99-100.

13. Iljin S., Samusya V., Iljina I., Iljina S. Influence of dynamic processes in mine winding plants on operating safety of shafts with broken geometry. *Theoretical and practical solutions of mineral resources mining*. Glivice: Taylor & Francis group, 2015, pp.425-429. DOI: 10.1201/b19901-74.

14. Iljin S.R. The experience of dynamic apparatus control and estimation of exploitation system safety “vessel – reinforcement” of vertical mining shafts. *The International Journal of Transport & Logistics*, 2010, is.7, pp.395-403.

15. Il'in S.R., Il'ina I.S., Il'ina S.S. Parametricheskie kolebaniia sistemakh «pod'emnyi sosud – armirovka» shakhtnykh stvolov [Parametric oscillations of systems “lifting vessel – reinforcement” of mine shafts]. *Transport szybowy: monografia*. Instytut Techniki Gornicej, 2015, pp.244-265.

16. Il'in S.R., Posled B.S., Adorskaia L.G., Samusia S.V., Il'ina I.S., Chernetchenko V.P., Nikolaev V.A. Izmeritel'no-analiticheskaia komp'iuternaia tekhnologiia diagnostiki i upravleniia sostoianiem oborudovaniia shakhtnykh pod'emnykh kompleksov [Measuring and analytical computer technology for diagnostics and status control of mine elevating complexes' equipment]. *Geotekhnicheskaiia mekhanika: mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov*. Dnepropetrovsk: IGTM NAN Ukrainy, 2012, vol.93, pp.28-38.

17. Il'in S.R. Adresnyi dinamicheskii kontrol' zhestkoi armirovki vertikal'nykh stvolov rudnikov Ukrainy s primeneniem portativnykh tsifrovnykh izmeritel'nykh stantsii [Address dynamic control of reinforcement shafts of Ukraine mines with the use of portable digital measuring stations]. *Rudnik budushchego: proekty, tekhnologi, oborudovanie: sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Perm': Proektnoe biuro «Reik'iaivik», 2010, vol.4, pp.46-52.

18. Tejszerska D., Wojnarowski J. Mathematical model of vibrations of mine hoists, coupled with longitudinal vibrations. *Zeszyty naukowe Politechniki slaskiej*. Glivice, 1989, z.181, pp.107-118.

19. Il'in S.R., Trifanov G.D., Vorobel' C.V. Povyshenie bezopasnosti ekspluatatsii shakhtnykh stvolov putem dinamicheskogo monitoringa sistem «sosud-armirovka» portativnymi izmeritel'nymi stantsiiami [Increase of safety of operation of the mine shaft by dynamic monitoring “vessel-reinforcement” system with portable measuring stations]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2013, no.3, pp.2-8.

20. Il'in S.R. Analiz razvitiia, rezul'taty i perspektivy rabot po dinamicheskoi diagnostike i monitoringu ekspluatatsionnogo sostoianiia armirovki shakhtnykh stvolov [Results analysis and prospects of work on dynamic diagnostics and monitoring of the operational status of mine shafts reinforcement]. In: *Transport szybowy: monografia*. Instytut Techniki Gornicej, 2013, pp.175-199.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Самуся В.И., Ильина И.С., Ильина С.С. Компьютерное моделирование и исследование динамики систем «сосуд–армировка» в стволах с нарушенной геометрией // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №20. – С.277–285. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.20.8

Please cite this article in English as:

Samusia V.I., Iliina I.S., Iliina S.S. Computer modeling and investigation of dynamics of system “vessel–reinforcement” in shafts with broken geometry. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.20, pp.277–285. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.20.8