

---

**УДК 622.625.6****В. О. ГУТАРЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, г. Донецк****ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОДОВОГО  
КОЛЕСА С ПОДВЕСНЫМ МОНОРЕЛЬСОМ**

*В статье рассмотрено движение экипажа шахтной подвесной монорельсовой дороги. Составлена математическая модель, учитывающая вертикальные колебания подвесной части экипажа и ходового колеса во время движения по упругому монорельсу. Установлены амплитуды колебаний экипажа при наезде на стыки с превышениями.*

**Ключевые слова:** однорельсовый путь, шахта, подвесная монорельсовая дорога, экипаж, динамическая нагрузка, деформация, математическая модель.

Подвесные монорельсовые дороги находят все большее применение на шахтах Украины. Работа шахтной подвесной монорельсовой дороги, когда происходит с движение состава по монорельсу, связана с силовыми действиями, обусловленными реализацией тягового и тормозного усилий, перемещением груза, изменчивостью ускорений, наличием стыков и неровностью пути. В результате этого наблюдаются колебания, приводящие к дополнительным затратам энергии, деформации самого пути и его подвешивания, включая крепь горной выработки. Вследствие чего ухудшаются эффективность, снижается надежность и повышается аварийность работы. С ростом скорости движения и массовой нагрузки на монорельс негативные последствия многократно усиливаются, что в значительной мере ограничивает возможность эксплуатации подвесных монорельсовых дорог на шахтах.

При движении экипажа по подвесному монорельсу, в местах контакта ходовых колес, неизбежно возникают переменные нагрузки, которые носят вероятностный характер, изменяясь в пространстве и во времени. Основными источниками возмущений являются ходовые колеса и монорельс, имеющие неровности, а также упругие деформации, происходящие во время движения.

Кроме того, монорельс имеет стыки и соединения, допускающие зазоры и перекосы в разных плоскостях. На основании этого во время движения появляются дополнительные динамические нагрузки, которые передаются на подвеску монорельсовой дороги, снижая ее прочность. Поэтому

исследование процесса взаимодействия ходового колеса с подвесным монорельсом является актуальной задачей.

Исследованию динамических процессов, происходящих в системе «колесо – рельс» и, в частности, в зоне рельсового стыка посвящено ряд работ отечественных и зарубежных ученых [1, 2, 3]. В работах [4, 5, 6] рассматривается напряженно-деформированное состояние элементов экипажей. Исследование напряженно-деформированного состояния колеса проведено в [7].

Данная работа является продолжением указанных исследований. Цель статьи заключается в установлении взаимосвязи между параметрами подвесного монорельса и экипажем при движении его ходовых колес по стыкам.

Во время движения одиночного экипажа по стыкам подвесного монорельса, секции которого соединяются между собой и имеют зазоры или превышения  $\delta$  (рис.1), возникают импульсные удары, обусловленные изменением направления движения скорости центра масс ходового колеса. Эти удары приводят к колебаниям неподрессоренных масс, передаются экипажу монорельсовой дороги и являются возмущениями.

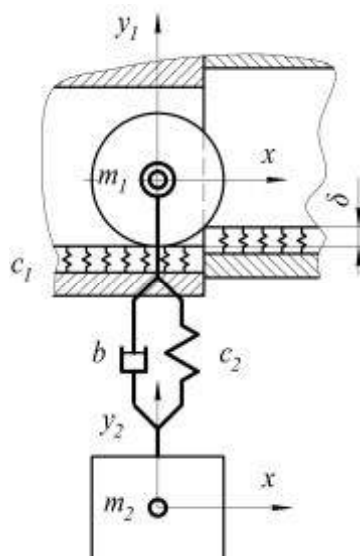


Рис. 1. Схема движения подвесного экипажа по подвесному монорельсу

Рассмотрим модель вертикальных колебаний, которая представлена в виде двухмассовой системы, учитывающей колебания ходового колеса на упругом монорельсе и колебания подвесной части экипажа. Введем следующие обозначения:  $m_1$  – приведенная масса ходовых колес;  $m_2$  – приведенная масса подвесной части экипажа;  $c_1$  – коэффициент жесткости монорельса на стыке;  $c_2$  – коэффициент жесткости подвески экипажа;  $b$  – коэффициент демпфирования подвески экипажа;  $y_1$ ,  $y_2$  – обобщенные координаты.

наты перемещения центров масс ходовых колес и подвесной части экипажа, соответственно.

Обобщенной силой, которая действует на рассматриваемую систему, является мгновенный импульс, возникающий при движении ходовых колес по монорельсу

$$Q = \eta(t). \quad (1)$$

Рассмотрим колебания, происходящие в вертикальной плоскости. Соответствующие уравнения движения имеют вид

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c_1 y_1 + c_2 (y_1 - y_2) &= \eta(t); \\ m_2 \ddot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_1) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Во время движения экипажа по одиночному стыку, имеющему превышение  $\delta$ , возникает единичное возмущение, вызывающее колебания, показанные на рис.2. Приведенное на этом рисунке графическое решение получено для следующих значений входящих параметров подвесного экипажа и монорельса:  $m_1=200\text{кг}$ ;  $m_2=6000\text{кг}$ ;  $c_1 = 2 \times 10^3 \text{ кН/м}$ ;  $c_2 = 2,5 \times 10^3 \text{ кН/м}$ ;  $\delta = 1 \text{ мм}$ ;  $b = 50 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$ .

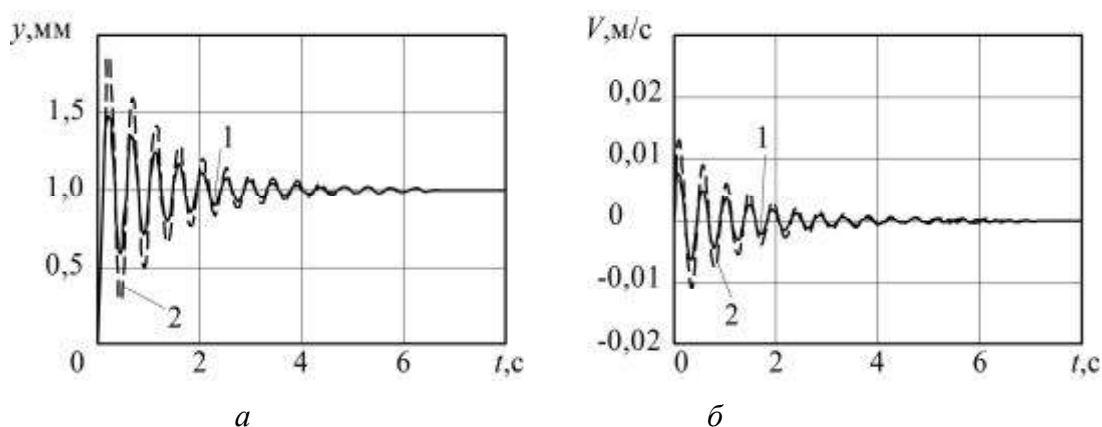


Рис. 2. Зависимости: *a* – амплитуд перемещений от времени;  
*б* – скоростей при наезде на стык 1 – колеса; 2 – экипажа

С повышением превышения  $\delta$  от 0,1 до 5,0 мм максимальная амплитуда колебаний колеса практически пропорционально увеличивается от 0,19 до 9,3 мм, а экипажа – от 0,15 до 7,5 мм. При снижении массы экипажа до 2000 кг максимальная амплитуда колебаний колеса и экипажа уменьшаются незначительно, но при этом увеличивается частота колебаний более, чем в 2 раза. С увеличением коэффициента жесткости подвески экипажа в 10 раз амплитуда и частота колебаний практически не изменяются, но время затухания колебаний возрастает более, чем в 20 раз.

Действующие во время движения экипажа по стыкам подвесного монорельса, состоящего из отрезков  $L_i$ , возмущения в вертикальной плоско-

сти могут быть описаны функцией

$$\eta(t) = -|\delta_i \sin \omega t|, \quad (3)$$

где:  $\delta_i$  – амплитуда полуволны неровности монорельса;

$\omega$  – частота полуволны неровности, равная

$$\omega = \frac{\pi V}{L_i}; \quad (4)$$

$V$  – скорость движения экипажа.

Решение уравнений (2) с учетом действия возмущений (3) приведено на рис.3.

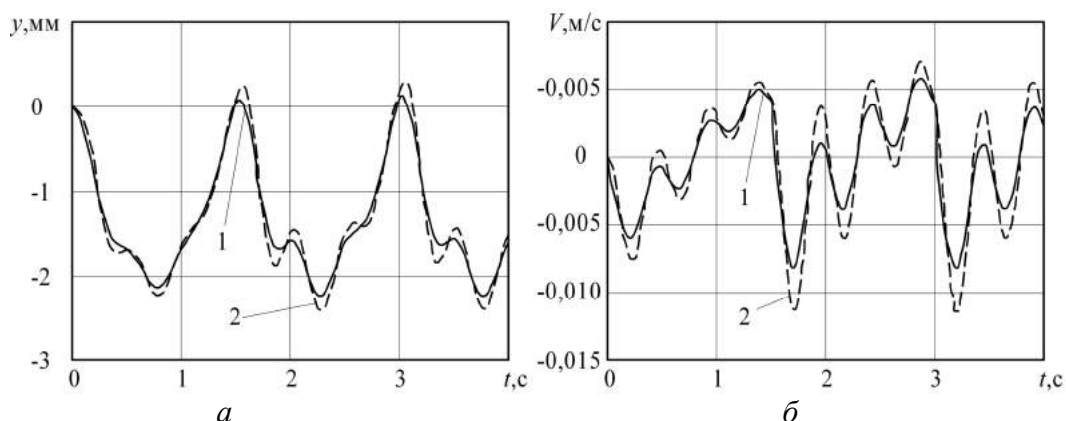


Рис. 3. Графические зависимости движения по детерминированной поверхности:  $a - y = f(t)$ ;  $b - V = f(t)$  для 1 – колеса; 2 – экипажа

Согласно [8] частное решение уравнений (2) и значение амплитуды с учетом вынужденных колебаний (3) можно найти как

$$f = \frac{h\gamma + (\gamma - d)^2}{h\gamma(\gamma + a - 1)^2 + [ad\gamma + (\gamma - 1)(\gamma - d)]^2}, \quad (5)$$

где  $h = \frac{b^2 m_1}{c_1 m_2^2}$ ;  $\gamma = \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2$ ;  $a = \frac{m_2}{m_1}$ ;  $d = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2$ ;  $\omega_1 = \sqrt{\frac{c_1}{m_1}}$ ;  $\omega_2 = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}}$ .

Для современных шахтных подвесных монорельсовых дорог коэффициенты  $a$  и  $d$ , учитывающие соотношение приведенных масс и круговых частот подвесной части экипажа и ходовых колес, устанавливается конструктивно. Чаще всего  $a = 0,03$ , а  $d = 1,0$ . Зависимость амплитуды колебаний от коэффициента  $\gamma$  для различных значений коэффициента  $h$ , приведены на рис. 4.

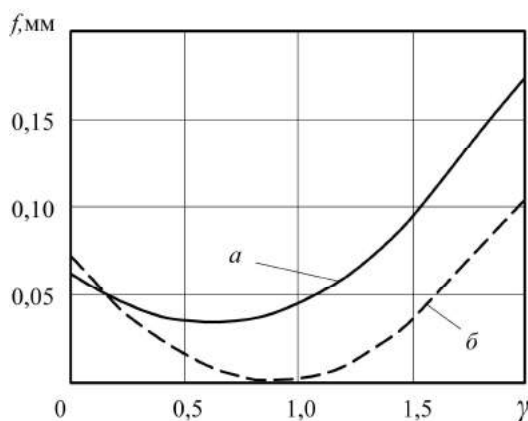


Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний от коэффициента  $\gamma$  для:  
 $a - h = 0,02$ ;  $b - h = 0,6$

Из рис. 4 видно, что с увеличением коэффициента  $\gamma$  от 0 до 0,6...0,8 амплитуды колебаний  $f$  снижаются до наименьшего значения, а при дальнейшем увеличении этого коэффициента повышаются. Причем для значений  $\gamma$  более 1,5 наблюдается практически прямопропорциональный рост амплитуд. Следует отметить, что для  $\gamma$  менее 0,2, изменение коэффициента  $h$  практически не влияет на  $f$ . В противном случае увеличение  $h$  приводит к росту амплитуд колебаний, что необходимо учитывать при выборе параметров демпфирующих устройств подвески шахтной монорельсовой дороги.

## ВЫВОДЫ

Полученные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между параметрами монорельсового пути и экипажем при движении его ходовых колес по стыкам, будут использоваться для обоснованного выбора параметров шахтных подвесных монорельсовых дорог. В дальнейшем планируется провести теоретические исследования с учетом колебаний монорельсового пути, обусловленных податливостью металлоарочной крепи горных выработок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохин Е. П. Динамика вагона / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
2. Коцупей А. Н. Обоснование параметров периодического взаимодействия колеса вагонетки со стыками протяженного рельсового пути

- / А. Н. Коцупей, А. А. Титов, В. Ф. Ганкевич // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 1. – С. 65-68.
3. Сладковский А. Исследование пластического деформирования контактирующих поверхностей колеса и рельса / А. Сладковский, М. Ситаж, О. Сладковская // Вестник Восточногоукраинского национального университета. – 2003. – Т. 10 (68), ч.1. – С. 121-126.
  4. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С. В. Мямлин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2002. – 240 с.
  5. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – М: Транспорт, 1997. – 326 с.
  6. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
  7. Бородин А. В. Как уменьшить удары колес в стыках / А. В. Бородин, В. В. Иванов // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 6. – С. 13-14.
  8. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Ч. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472с.

Получено: 14.11.12 г.

*В статті розглянуто рух шахтної підвісної монорейкової дороги. Розроблено математичну модель коливань, що враховує вертикальні коливання підвісної частини екіпажу та ходового колеса під час руху по пружній монорейці. Установлено амплітуди коливань екіпажу в разі наїзду на стики з перевищенням.*

**Ключові слова:** однорейковий шлях, шахта, підвісна монорейкова дорога, екіпаж, динамічне навантаження, деформація, математична модель.

*In the article there has been examined the single crew movement along a suspended monorail which has irregularities in its joints. There has been drawn up a mathematical model which takes into account the vertical oscillations of the suspended part of the crew and road wheel during the monorail movement. There have been fixed the crew oscillation amplitudes at driving on the joints with excess.*

**Keywords:** monorail, mine, suspended road, crew, dynamic load, deformation, mathematical model.