

transport equations in concrete structures. *Computers and Structures*, 79, 1251–1264.

5. **Saetta, A.**, Scotta, R., and Vitaliani, R. (1993). Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. *ACI Materials Journal*, 90 (5), 441–451.

6. **Takewaka, K.**, Mastumoto, S. (1988). Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments. ACI SP 109–17, American Concrete Institute, 381–400.

7. **Maage, M.**, Helland, S., Carlsen, J. E. (1994). Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment. *Proceedings of RILEM international Workshop on Durability of High Performance Concrete*, Wien, 194–207.

8. **Mangat, P.S.**, Molloy, B. T. Predicting of long term chloride concentration in concrete. *Materials and Structures*, 27, 338–346.

9. **Papadakis, V. G.** (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30 (3), 1215–1223.

10. **Tingcheng, Y.**, Chunhua, Lu, Zhiren, Wu, Ronggui, Liu. (2008). Durability of Pre-stressed Concrete Structure Suffering from Chloride Ions' Invasion. *International Journal of Nonlinear Science*, 5 (2), 184–192.

11. **Brunauer, S.**, Skalny, J., Bodor, E. (1969). Adsorption in nonporous solids. *Journal of Colloid Interface Science*, 30, 546–552.

УДК 625.04

А. Ф. Колос, А. А. Морозова

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЙ ЧАСТИЦ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ОСЕВЫМИ НАГРУЗКАМИ

Рассмотрены результаты исследований уровня и характера изменений вертикальных и горизонтальных виброускорений частиц балластного слоя под подошвой шпалы и по глубине балластной призмы в зоне стыка рельсов при обращении опытного подвижного состава с осевыми нагрузками до 30 т и скоростью 70 км/ч на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа. Получены зависимости величины виброускорений от осевой нагрузки и затухания ускорений по глубине балластного слоя.

виброускорение, балласт, балластный слой, подшпальное основание, основная площадка, повышенные осевые нагрузки, теория предельного равновесия, вибродинамическое воздействие, колебания, вибродинамика, несущая способность.

Введение

Одним из направлений развития железнодорожного транспорта является повышение осевых нагрузок подвижного состава до 30 т/ось [1]. Российский и зарубежный опыт по-

казывают, что при переходе на новые условия обращения подвижного состава требуется специальная подготовка железнодорожного пути [2]. Повышение осевых нагрузок вызывает увеличение вибродинамического воздействия на железнодорожный путь, которое,

в свою очередь, ведет к снижению несущей способности балластного слоя и земляного полотна [3, 4]. В связи с этим необходимо уметь оценивать влияние повышенных осевых нагрузок на прочность подшпального основания. Существующие методики расчета несущей способности балласта не учитывают вибродинамическое воздействие обращающихся поездов, поэтому необходимо исследовать колебательный процесс подшпального основания, вызванный движением тяжеловесных поездов с осевыми нагрузками до 30 т/ось.

1 Приборы и условия проведения исследований

Сотрудниками ПГУПС проведены исследования уровня и характера изменений вертикальных и горизонтальных виброускорений под подошвой шпалы и по глубине балластной призмы в зоне стыка рельсов при обращении подвижного состава с осевыми нагрузками до 30 т и скоростью 70 км/ч. Полевые испытания выполнялись на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ в г. Щербинка Московской области.

Для регистрации виброускорений использовались акселерометры типа РА 021, которые позволяют фиксировать ускорения от 0 до 100 g с частотой от 2 до 3000 Гц. Измерение величин виброускорений производилось в вертикальном и горизонтальном направлениях. Датчики устанавливались под шпалу и

по глубине балластной призмы. Схема установки датчиков приведена на рис. 1.

2 Распределение вертикальных и горизонтальных виброускорений под подошвой шпалы

В результате проведенных исследований были получены максимально вероятные значения вертикальных и горизонтальных виброускорений в нескольких сечениях под подошвой шпалы при осевых нагрузках подвижного состава, изменяющихся в диапазоне 23,5–30 т (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что наибольшие величины вертикальных виброускорений зафиксированы в подрельсовом сечении. У торца шпалы вертикальные виброускорения в среднем на 15 % ниже, чем по оси рельса. Наименьшие величины вертикальных ускорений зафиксированы в сечении по внутренней грани опорной площадки шпалы.

В отношении горизонтальных ускорений наблюдается иной характер распределения. Наибольшие ускорения зафиксированы в сечении по внутренней грани опорной площадки шпалы. При осевой нагрузке 30 т максимум горизонтальных ускорений составил 13,1 g, что в 2,4 раза больше максимальных вертикальных ускорений при этой нагрузке. Расхождение величин горизонтальных ускорений в подрельсовом сечении и у торца шпалы составило около 10%. Таким образом, горизонтальные и вертикальные вибро-

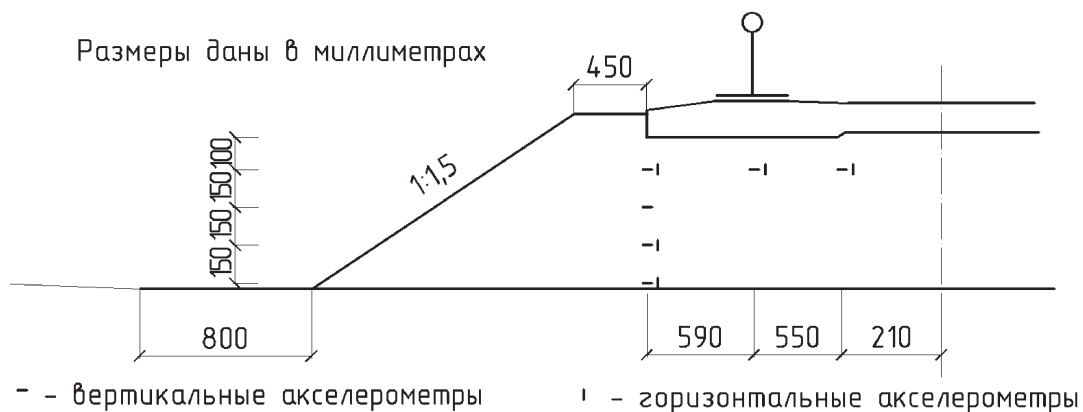


Рис. 1. Схема установки акселерометров в балластном слое

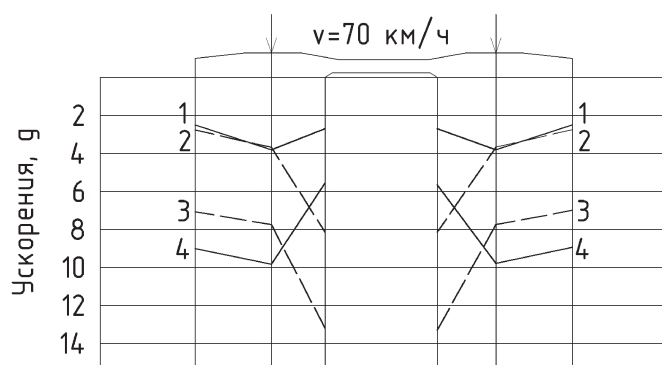


Рис. 2. Распределение вертикальных и горизонтальных виброускорений под подошвой шпалы: 1 – вертикальные виброускорения при осевой нагрузке 23 т; 2 – горизонтальные виброускорения при осевой нагрузке 23 т; 3 – горизонтальные виброускорения при осевой нагрузке 30 т; 4 – вертикальные виброускорения при осевой нагрузке 30 т

ускорения под опорной площадкой шпалы распределены практически равномерно.

3 Зависимости вертикальных и горизонтальных виброускорений от осевой нагрузки

На основании полученных данных выведены зависимости вертикальных и горизонтальных виброускорений от осевой нагрузки (рис. 3).

По полученным данным видно, что с увеличением осевой нагрузки величины виброускорений растут прямо пропорционально. При этом в сечениях у торца шпалы и в подрельсовой зоне ускорения увеличиваются с одинаковой интенсивностью: при росте осевой нагрузки на 1 т/ось виброускорения растут на 0,9 г. В сечении по внутренней грани опорной площадки шпалы с ростом осевой нагрузки ускорения повышаются менее интенсивно: при росте нагрузки на 1 т/ось ускорения повышаются на 0,34 г. Горизон-

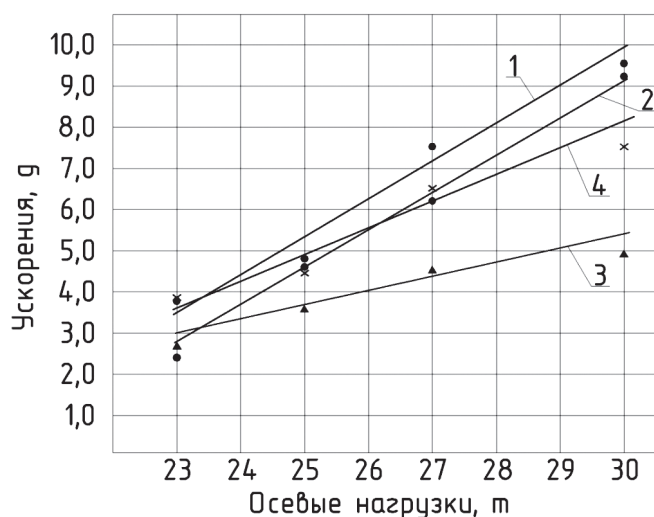


Рис. 3. Зависимости вертикальных и горизонтальных ускорений от осевой нагрузки: 1 – вертикальные ускорения в подрельсовом сечении; 2 – вертикальные ускорения в сечении у торца шпалы; 3 – вертикальные ускорения в сечении по внутренней грани опорной площадки шпалы; 4 – горизонтальные ускорения в подрельсовом сечении

тальные ускорения в подрельсовом сечении увеличиваются на 0,63 g при росте нагрузки на 1 т/ось, что на 30% меньше величин вертикальных ускорений.

4 Затухание виброускорений в вертикальном и горизонтальном направлениях

Установка датчиков на глубине 10, 25, 40 и 55 см в сечении у торца шпалы позволила определить зависимость затухания виброускорений по глубине (рис. 4). Поскольку амплитуды виброускорений и вибросмещений частиц взаимосвязаны и известно, что амплитуды вертикальных вибросмещений в подрельсовом сечении и в сечении у торца шпалы затухают по аналогичной зависимости, можно предположить, что и зависимости затухания виброускорений в сечениях по оси рельса и у торца шпалы будут аналогичными.

Из приведенных зависимостей видно, что виброускорения затухают слабо в пределах первых 15 см под подошвой шпалы. Так, при осевой нагрузке 30 т виброускорения изменились от 9 g под подошвой шпалы до 7,4 g на глубине 15 см под шпалой (на 18%). При увеличении глубины до 30 см их уровень снизился до 5,3 g (на 28%).

Для определения коэффициента затухания по глубине соотнесем величины ускорений на каждой отметке со значением ускорений под подошвой шпалы (1):

$$\delta_z^B = \frac{g_z^B}{g_0^B}; \quad \delta_z^r = \frac{g_z^r}{g_0^r}, \quad (1)$$

где δ_z^B – коэффициент затухания вертикальных ускорений по глубине; g_z^B – вертикальные ускорения на глубине z под подошвой шпалы, m/c^2 ; g_0^B – вертикальные ускорения под шпалой, m/c^2 ; δ_z^r – коэффициент затухания горизонтальных ускорений по глубине; g_z^r – горизонтальные ускорения на глубине z под подошвой шпалы, m/c^2 ; g_0^r – горизонтальные ускорения под шпалой, m/c^2 .

Из всех значений δ_z^B и δ_z^r для каждой осевой нагрузки определим среднюю величину и построим графики зависимостей от глубины (рис. 5).

Прологарифмируем полученные значения. Результаты вычислений укладываются на прямые, описываемые функциями (2–3):

$$\ln \delta_z^B = -\delta_z^B \cdot z, \quad (2)$$

$$\ln \delta_z^r = -\delta_z^r \cdot z, \quad (3)$$

где z – глубина от подошвы шпалы, м.



Рис. 4. Затухание вертикальных ускорений по глубине балластного слоя при различных величинах осевой нагрузки:

1 – при 23,5 т/ось; 2 – при 25 т/ось; 3 – при 27 т/ось; 4 – при 30 т/ось

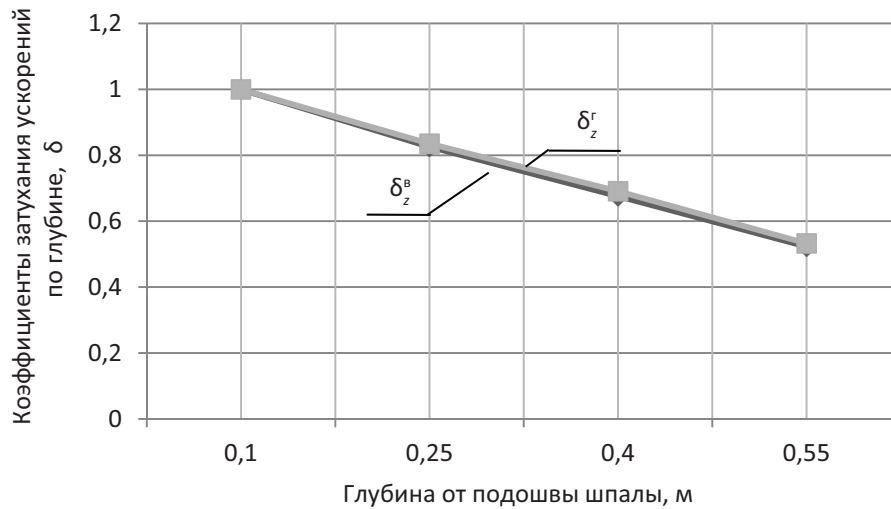


Рис.5. Графики зависимостей коэффициентов затухания ускорений по глубине

Аналогичным образом определим коэффициенты затухания вертикальных и горизонтальных ускорений в балласте от оси рельса в направлениях к оси пути и к обочине (рис. 6).

Полученные результаты описываются функциями (4–5):

$$\text{при } \begin{cases} y \geq 0 & \delta_y^B = \delta_1^B, \\ y < 0 & \delta_y^B = \delta_2^B; \end{cases} \quad (4)$$

$$\ln \delta_y^r = -\delta_y^r \cdot y,$$

$$\ln \delta_y^B = -\delta_y^B \cdot y, \quad \text{при } \begin{cases} y \geq 0 & \delta_y^r = -\delta_1^r, \\ y < 0 & \delta_y^r = \delta_2^r, \end{cases} \quad (5)$$

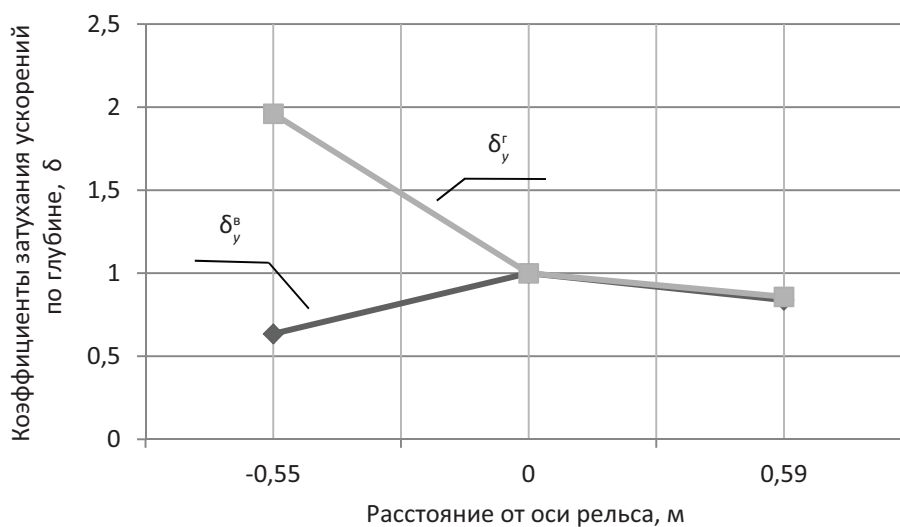


Рис. 6. Графики зависимостей коэффициентов затухания ускорений от расстояния от оси рельса

где δ_y^b – коэффициент затухания вертикальных ускорений в горизонтальном направлении, 1/м; δ_y^r – коэффициент затухания горизонтальных ускорений в горизонтальном направлении, 1/м; y – расстояние по горизонтали от оси рельса до рассматриваемого сечения. Положительная полуось оси Y направлена от пути, отрицательная – от оси рельса к оси пути.

Таким образом, распространение виброускорений в вертикальном и горизонтальном направлениях описывается зависимостями (6–7):

$$g_{z,y}^b = g_0^b \cdot e^{-\delta_z^b \cdot z - \delta_y^b \cdot y},$$

при
$$\begin{cases} y \geq 0 & \delta_y^b = \delta_1^b, \\ y < 0 & \delta_y^b = \delta_2^b; \end{cases} \quad (6)$$

$$g_{z,y}^r = g_0^r \cdot e^{-\delta_z^r \cdot z - \delta_y^r \cdot y},$$

при
$$\begin{cases} y \geq 0 & \delta_y^r = -\delta_1^r, \\ y < 0 & \delta_y^r = \delta_2^r. \end{cases} \quad (7)$$

5 Применение зависимостей затухания виброускорений для расчета прочности балластного слоя

Для оценки прочности балластного слоя может быть использована теория предельного равновесия [5] – [7]. Подставив зависимости (6–7) в основную систему уравнений теории предельного равновесия (8) [8], получим возможность определить величину напряжений, действующих в балластном слое при движении поездов с осевыми нагрузками до 30 т:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = \gamma \cdot \cos \theta + \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \gamma \cdot \sin \theta + \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \\ \sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2C_{\text{дн}} \operatorname{ctg} \varphi_{\text{дн}}) \sin \varphi_{\text{дн}}; \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\gamma}{g} g_0^z \cdot e^{-\delta_z^b \cdot z - \delta_y^b \cdot y},$$

при
$$\begin{cases} y \geq 0 & \delta_y^b = \delta_1^b, \\ y < 0 & \delta_y^b = \delta_2^b; \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \frac{\gamma}{g} g_0^y \cdot e^{-\delta_z^r \cdot z + \delta_y^r \cdot y},$$

при
$$\begin{cases} y \geq 0 & \delta_y^r = -\delta_1^r, \\ y < 0 & \delta_y^r = \delta_2^r, \end{cases} \quad (10)$$

где σ_z и σ_y – вертикальная и горизонтальная составляющие нормальных напряжений; $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ – составляющие касательных напряжений; θ – угол наклона оси абсцисс к горизонту; ρ – масса грунта, $\rho = \gamma/g$; γ – объемный вес грунта; g – ускорение свободного

падения; $\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$ – действующее ускорение в

вертикальной плоскости; $\frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$ – действующее

ускорение в горизонтальной плоскости; σ_1 и σ_2 – главные напряжения, $C_{\text{дн}}$ и $\varphi_{\text{дн}}$ – сцепление и угол внутреннего трения грунта, воспринимающего вибродинамическую нагрузку.

Заключение

Анализ результатов натуральных экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

1. В результате исследований получены величины виброускорений частиц балласта при осевых нагрузках 23–30 т в характерных сечениях по длине шпалы. Так, при осевой нагрузке 23 т в подрельсовом сечении под подошвой шпалы зафиксированы вертикальное ускорение 3,8 g, горизонтальное – 3,7 g, при нагрузке 30 т/ось – вертикальное ускорение 9,5 g, горизонтальное – 7,5 g.

2. По полученным значениям выявлены зависимости затухания виброускорений в

балласте в вертикальном (6) и горизонтальном (7) направлениях при тяжеловесном движении.

3. Зависимости затухания виброускорений (6–7) позволяют решить систему дифференциальных уравнений теории предельного равновесия (8) для прогнозирования несущей способности балластной призмы с вибродинамического воздействия поездов с осевыми нагрузками до 30 т.

Библиографический список

1. **Стратегия** развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=7048layer_id=51048id=3997.
2. **Обобщение** мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры ; пер. с англ. ; ред. С. М. Захаров. – Москва : Интекст, 2012. – 568 с.
3. **Оценка** чувствительности путевого щебня к действию вибродинамической нагрузки / А. Ф. Колос, Д. С. Николайтис, А. А. Морозова // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: материалы X-й научно-технической конференции с международным участием (чтения, посвященные 190-летию проф. Г. М. Шахунянца). – Москва : МИИТ, 2013 – С. 164–166.
4. **Обеспечение** несущей способности балластного слоя и земляного полотна при повышенных осевых нагрузках / А. Ф. Колос, А. А. Морозова // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции конференции. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2013. – С. 209–211.
5. **Статика** сыпучей среды / В. В. Соколовский. – Москва : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. – 241 с.
6. **Механика** грунтов / Н. А. Цытович. – Москва : Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 636 с.
7. **Осесимметричная** задача теории предельного равновесия сыпучей среды / В. Г. Березанцев. – Москва : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952. – 120 с.
8. **Прочность** и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку : дис. ... д-ра техн. наук / И. В. Прокудин. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1982. – 455 с.

УДК 656.221

А. Н. Комарова

ООО «Центр Трансфера Технологий»

Ю. П. Бороненко

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ВЛИЯНИЕ ТИПОВ И ПАРАМЕТРОВ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ВАГОНА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ

Рассмотрено влияние типов и параметров гасителей колебаний на сопротивление движению вагона и расход энергии на его перемещение. Также выполнен анализ удельного сопротивления движению вагона, обусловленного диссипацией энергии в гасителях сухого и вязкого трения. В результате исследования показано, что при малых скоростях сопротивление движению вагонов,