

УДК 550.34

**Бубнов Евгений Яковлевич**<sup>1</sup>, доцент кафедры физики, канд.тех.наук, доцент  
e-mail: kaf\_phys@vsuwt.ru

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

## СЕЙСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВАГОНА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМУ ПУТИ

*Аннотация.* Для модели однородного упругого полупространства проведен теоретический расчет спектра вибрационного излучения, вызванного движением грузового вагона по случайным неровностям бесстыкового рельсового пути. В математической модели учтено влияние резонансных явлений, возникающих в системе «вагон – рельсовый путь», на спектральный состав упругих волн в грунте.

*Ключевые слова:* железнодорожный вагон, неровность рельсового пути, теоретический расчет, спектр сейсмические сигнала

Железнодорожный состав является интенсивным источником акустических и вибрационных полей, которые негативно могут воздействовать на проживающее в окрестности население и технологические процессы в производстве.

В работе [1] проведен физический анализ возможных механизмов сейсмического излучения железнодорожного состава в широком диапазоне частот. Отмечается, что одним из основных источников генерации сейсмических сигналов поезда является взаимодействие движущегося состава с регулярными (стыки рельс) и случайными (просадки шпал рельсового пути) неровностями рельсового пути.

В данной работе изложены результаты теоретического расчета спектра вибрационного сигнала грузового вагона, движущегося по случайным неровностям железнодорожного пути.

Геометрические неровности пути вызывают со стороны колес вагона переменные силы, действующие на твердое однородное полупространство, в результате чего в грунте возникает сложная волновая структура, состоящая из продольных, поперечных и поверхностных волн.

За счет сложной колебательной системы, каким является вагон, происходит дополнительная трансформация спектра силового воздействия. Колебательную систему вагона в вертикальном направлении можно описать двумя парциальными подсистемами [2]. Первая подсистема образована подвешиванием массы вагона на упругости рессор и характеризуется собственными частотами колебаний в диапазоне частот 2–5 Гц в зависимости от загрузки вагона. Вторая подсистема образована подвешиванием массы неподрессоренной тележки и массы рельсового полотна на упругости балласта. Собственная частота колебаний этой подсистемы составляет 25–28 Гц.

Используя метод электромеханических аналогий, колебательная система вагона была преобразована в электрическую схему.

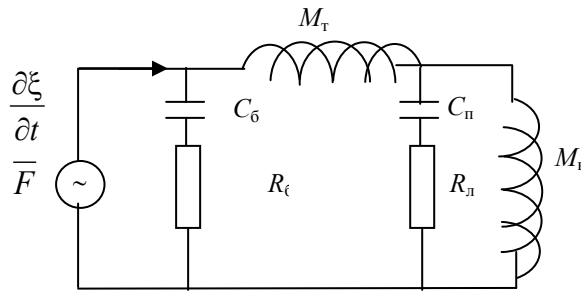


Рисунок 1 – Электромеханическая схема вертикальных колебаний одного колеса вагона

На рис. 1 сила  $F$  эквивалентна ЭДС,  $M_B$  и  $M_T$  есть индуктивности, эквивалентные инертным массам вагона и тележки, приведенные к одному колесу тележек,  $C_{II}$ ,  $C_B$  – емкости, соответствующие упругости подвески приведенному к одному колесу и упругости балластного слоя,  $R_{II}$ ,  $R_B$  – сопротивления, обусловленные демпфирующими свойствами подвески одного колеса тележки и балласта. Ток на входе системы считается заданным и эквивалентный вертикальной скорости смещения колеса.

Тогда спектральную плотность мощности переменной силы, действующей на грунт со стороны одного колеса вагона, можно вычислить по формуле [3]

$$G_F(\omega) = \omega^2 |Z(j\omega)|^2 G_\xi(\omega), \quad (1)$$

где  $\omega$  – циклическая частота,  $Z(i\omega)$  – импеданс электрической схемы,  $G_\xi(\omega)$  – спектральная плотность мощности случайных неровностей железнодорожного пути.

Импеданс  $|Z(i\omega)|^2$  электрической схемы рассчитывается по правилам Кирхгофа.

Характерный закон спектральной плотности мощности  $G_\xi(\omega)$  случайных неровностей рельсового пути в зависимости от частоты приближенно описывается следующим соотношением [3]

$$G_\xi(\omega) = Dv/\omega^2 \quad (2)$$

где  $D$  – постоянная, характеризующая масштаб неровностей рельсового пути,  $v$  – скорость движения поезда,  $\omega$  – циклическая частота.

Действующая на рельсовый путь силовая нагрузка от одного колеса возбуждает в твердой среде упругие волны. В предположении моделей точечной силы и однородного упругого полупространства расчет скорости смещения грунта в поверхностной волне в волновой зоне можно выполнить по формуле [4]

$$V_z(\omega) = \frac{0.075 |Z(j\omega)| \sqrt{Dv} \omega^2}{\rho \sqrt{c^5 r}} e^{-\frac{\vartheta \omega r}{2\pi c}} e^{-j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

где  $V_z(\omega)$  – амплитуда вертикальной скорости смещения грунта на частоте  $\omega$ ,  $c$  – скорость распространения поверхностной волны,  $r$  – удаление до точки регистрации,  $\rho$  – плотность среды,  $\vartheta$  – коэффициент затухания поверхностной волны в грунте.

Для оценки спектральных характеристик поверхностной волны, создаваемых остальными колесами вагона в волновой зоне необходимо применить принцип суперпозиции.

Будем считать, что начальные фазы гармоник сейсмических сигналов, вызванных источниками, изменяются случайным образом от колеса к колесу. Следовательно, при учете вклада в сейсмическое излучение других колес необходимо применить суммирование сигнала по мощности. Тогда уравнение для расчета квадрата амплитуды гармоники поверхностной волны, создаваемой всеми колесами вагона, принимает вид:

$$V_z^2(\omega) = \sum_{i=1}^k \left[ \frac{0.075 |Z(j\omega)| \sqrt{Dv} \omega^2}{\rho \sqrt{c^5 r_i}} e^{-\frac{\vartheta \omega r_i}{2\pi c}} \right]^2 \quad (4)$$

где  $k$  – число колес вагона.

На рис. 2 приведены результаты математического моделирования спектра амплитуды скорости смещения грунта сейсмического сигнала, возбуждаемого грузовым четырехосным вагоном для трех удалений от рельсового пути.

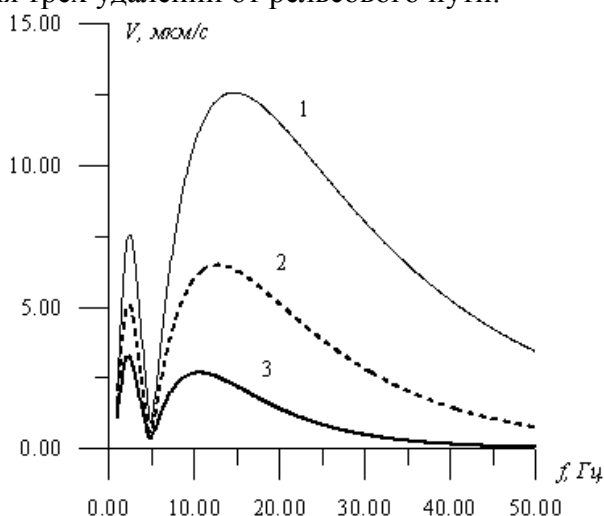


Рисунок 2 – Спектры поверхностной волны, возбуждаемой грузовым вагоном на разных удалениях от рельсового пути. Кривая 1 – расстояние 50 м, кривая 2 – расстояние 100 м, кривая 3 – расстояние 200 м. Плотность грунта  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$ , скорость поверхностной волны  $c = 200 \text{ м/с}$ , коэффициент затухания поверхностной волны  $\theta = 0.03$ .

Как следует из анализа кривых рис. 2, в спектре сигнала наблюдаются два локальных экстремума. Низкочастотный локальный максимум, вызванный резонансными колебаниями вагона на рессорной подвеске, является узкополосным, что связано с существенной добротностью колебательной системы. Второй более широкий максимум образован суммарным действием второй колебательной системы «тележка – балласт», дифференцирующим характером функции возбуждения поверхностной волны и эффектом затухания поверхностной волны. С увеличением расстояния наблюдается относительное уменьшение высокочастотных спектральных компонент по сравнению с амплитудами низкочастотных гармоник, что вызвано доминирующим частотнозависимым характером затухания сейсмических сигналов от расстояния.

Полученные расчетные соотношения позволяют оценить характерный диапазон частот возбуждения сейсмических волн вагона в зависимости от параметров источника и упругой среды и рассчитать воздействие вибраций этого источника на окружающую среду.

#### Список литературы:

1. Бубнов Е.Я. Источники возбуждения вибрационных и акустических полей поезда Сборник статей по материалам LVМеждународной научно-практической конференции: Технические науки: проблемы и решения. Т 38– № 1 (51). – М 2022г.Издательство. «Интернаука»–С. 38-43, doi: 10.32743/2587862x.2022.1.51.329445
2. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Челноков И.И. Динамика вагона М.: Транспорт. 1987. 215 с.
3. Динамика системы «дорога-шина-автомобиль-водитель»// Под ред. А.А. Хачатурова. М.: Машиностроение. 1976. 535 с.
4. Чичинин, И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. / И.С. Чичинин. – М.: Недра, 1984. – 220 с.

## SEISMIC RADIATION OF A WAGON MOVING ALONG A RAILWAY TRACK

Evgeny Ya. Bubnov

*Abstract.* A theoretical calculation of the spectrum of the seismic field created by the movement of the railway wagon along the random irregularities of the jointless rail track was carried out for the homogeneous elastic half-space model. The calculation takes into account the effect of resonant phenomena arising in the system "wagon - railway track" on the spectral composition of power loads.

*Keywords:* railway wagon, rail track irregularity, theoretical calculation, seismic signal spectrum

