

Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 2

В. М. БЕЛЬКОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Настоящая статья является продолжением работы [1], где рассмотрена модель вибродемпфирующих свойств земляного полотна на основной площадке подошвы балластной призмы нормированной толщины, защитной песчаной подушки и глинистых грунтов в условиях воздействия гармонических колебаний на основе физико-химической механики.

На базе линейного гармонического анализа волновых процессов в слоистых системах для балластного пути показано, что амплитуда смещения на границе «песок — суглинок» снижается в 26 раз в диапазоне частот 1–250 Гц. Вдоль шпалы возникают вторичные продольные и поперечные волны за счет «перекачки» энергии основной продольной волны в поперечную по контуру шпалы. В результате появляются циркуляционные потоки вдоль длины шпалы, необратимая деформация призмы и накопление дефектов в земляном полотне, возрастает пористость и вероятность выплесков балласта.

Устойчивость движения на балластной призме и ее межремонтный срок зависят от правильной организации водостоков, особенно в весенне-осеннее время.

Использование аппарата линейного гармонического анализа объясняется тем, что влияние нелинейных эффектов распространения волн в дисперсных материалах не успевает проявиться из-за крайне малых толщин материалов, составляющих земляное полотно.

Ключевые слова: вибродемпфирование; земляное полотно; упруговязкопластические свойства; гармонический анализ; вертикальные вибрационные волны

Введение. В работе [1] показано, что при анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути в каждом слое амплитуда и поглощение энергии гармонических колебаний за счет отражения на границе раздела слоистой механической системы будут иметь различные значения, отличные от начальной амплитуды смещения рельсов. Поэтому представлять земляное полотно как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами, неправильно для слоистых систем, не имеющих принципиально сосредоточенных масс. Кроме того, для возникновения колебаний в глинистом слое необходимо, чтобы под ним находилась среда, отражающая вертикальную продольную волну. Иначе обратная полуволна не сформируется, а ком-

прессионная волна уйдет вглубь грунта и превратится в итоге в тепло. Моделирование колебаний земляного полотна телом Кельвина — Фойгта может давать значительные погрешности и не выявляет истинные физические механизмы на стадии демпфирования упруговязкопластических свойств земляного полотна. За счет отражения деформационных волн от внешних поверхностей: торцов, боковых поверхностей шпалы — и их компенсации моделирование колебаний земляного полотна сводится к одномерной задаче.

Определения. Во всех средах распространяющаяся волна затухает вследствие потерь энергии колебаний, связанных с неупругими свойствами сред и рассеянием на неоднородностях среды. В самом общем случае с расстоянием амплитуда волны $A_i(x)$ меняется по закону [2, 3]

$$A_i(x) = A^0 e^{-\alpha_i z}; \quad \alpha_i = \frac{\omega}{v_i} \eta_i. \quad (1)$$

где A^0 — начальная амплитуда волны; z — вертикальная координата; ω — частота волны.

Для количественной оценки поглощения вибрационной волны на практике используют коэффициент потерь η , определяемый отношением энергии, поглощенной за один период колебаний $W_{\text{полг.}}$, к максимальной потенциальной энергии в системе $W_{\text{пот.}}$ [2]

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{W_{\text{полг.}}}{W_{\text{пот.}}}, \quad (2)$$

а также обратную величину — добротность $1/\eta$. Для конструкционных материалов (сталь, дюраль) коэффициент потерь имеет порядок 10^{-4} . Для реальных конструкций, выполненных из этих материалов, коэффициент потерь резко возрастает и составляет 10^{-2} , 10^{-3} , что объясняется дополнительными потерями в узлах соединений отдельных элементов конструкции. Для стали $\eta = 1,2 \cdot 10^{-4}$, для бетона $\eta = 10^{-3}$.

Условия на границе слоистой механической системы требуют равенства смещений (неразрывность сред) и равенства напряжений — условие неподвиж-

ности границы. Из этих условий вытекают равенства для границы раздела фаз [4]

$$(A_i + B_i) = A_{i+1} + B_{i+1}; \Omega_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{z_{i+1} + z_i}, \quad (3)$$

где Ω_i — коэффициент отражения от границы раздела сред.

Знак минус у коэффициента отражения означает, что фаза отраженной волны меняется на противоположную по отношению к фазе падающей волны (рис. 1 а, б). Коэффициенты отражения вибрационной волны Ω_i на границах «металл — воздух», «бетон — воздух», «щебень — воздух», «полимерный материал — воздух» считаем равными 1. Эти допущения, как показывают оценки, справедливы для границ «твердое тело — воздух» с погрешностью $\sim 5 \cdot 10^{-4} \%$, для границ «полимер — воздух» $\sim 0,1 \%$. Величина Ω_2 (сталь/резина) с учетом данных в таблице равна

$$\begin{aligned} \Omega_2 &= \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \\ &= \frac{\rho_2 \sqrt{\frac{E_2(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_2}} - \rho_1 \sqrt{\frac{E_1(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_1}}}{\rho_2 \sqrt{\frac{E_2(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_2}} + \rho_1 \sqrt{\frac{E_1(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_1}}} = \\ &= \frac{1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}} - 7870 \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{7870 \cdot 0,75 \cdot 0,5}}}{1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}} + 7870 \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{7870 \cdot 0,75 \cdot 0,5}}} = -0,8. \end{aligned} \quad (4)$$

Величина Ω_3 (резина/бетон) равна

$$\Omega_3 = \frac{2700 \sqrt{\frac{6,7 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{2700 \cdot 1,16 \cdot 0,68}} - 1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}}}{2700 \sqrt{\frac{6,7 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{2700 \cdot 1,16 \cdot 0,68}} + 1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}}} = 0,29. \quad (5)$$

Периодическая сила, создающая колебания в резонаторах 1 и 2, приложена к рельсу (граница $z=0$, рис. 2). Механические напряжения T_i в слое определяются как [2, 3]

$$T_i = E_i S_i; S_i = \frac{du_i}{dz}; S_{yvi} = \frac{dU_i}{dz}, \quad (6)$$

где S_i — деформация в i -ом слое упругого материала; S_{yvi} — упруговязкая деформация в упруговязкопластичном материале.

Граничные условия для задачи моделирования. Дополним поставленную задачу взаимодействия деформационных волн в слоистой акустической системе (уравнения (1–7) [1]) граничными условиями для составного резонатора Р1 (рис. 3 [1]):

1) На границе $z=0$

$$T_1(0, \tau) = \frac{F(\tau)}{a_p a_{ш}}; u_1(0, \tau) = u_1(\tau); \quad (7)$$

$$S_1(0, \tau) = S_1(\tau) = \frac{du_1(\tau)}{dz},$$

где $F(\tau)$ — сила, нагружающая рельс в расчете на одну колесную пару, Н; $a_p, a_{ш}$ — ширина подошвы рельса и шпалы; u_1 — амплитуда смещения рельса; S_1 — деформация рельса.

2) На границе $z = h_p$

$$\begin{aligned} k_{pn} T_1(h_p) &= T_2(h_p); k_{pn} E_1 \frac{du_1}{dz} = E_2^* \frac{dU_2}{dz}; \\ u_1(h_p) &= U_2(h_p), \end{aligned} \quad (8)$$

где k_{pn} — коэффициент изменения акустической площади резиновой прокладки на шпале (20 см/27 см = 0,74; T_1, T_2 — напряжения в рельсе и в резиновой прокладке; h_p — высота рельса; E_1, E_2^* — модули Юнга рельса и резиновой прокладки; U_2 — амплитуда смещения упруговязкопластичной резиновой прокладки.

3) На границе $z = h_p + h_{np}$

$$\begin{aligned} k_{ш} T_2(h_p + h_{np}) &= T_3(h_p + h_{np}); k_{ш} E_2^* \frac{\partial S_2}{\partial z} = E_3 \frac{\partial S_3}{\partial z}; \\ U_2(h_p + h_{np}) &= u_3(h_p + h_{np}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $k_{ш} = \frac{a_p a_{ш}}{a_{шш} L_{ш}}$ — коэффициент изменения акустической площади шпалы; $a_{шш}$ — ширина подошвы шпалы; $L_{ш}$ — длина шпалы; h_{np} — толщина резиновой прокладки; T_3 — напряжение в шпале; S_2 — деформация резиновой прокладки; S_3 — деформация шпалы; u_3 — амплитуда смещения шпалы.

Для составного резонатора Р2:

4) На границе $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$

$$\begin{aligned} T_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) &= k_{ш} T_4(h_p + h_{np} + h_{ш}); \\ E_3 \frac{\partial S_3}{\partial z} &= k_{ш} E_4^* \frac{\partial S_4}{\partial z}; u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = \\ &= U_4(h_p + h_{np} + h_{ш}), \end{aligned} \quad (10)$$

где $k_{ш} = 0,2(1-\beta)$ — коэффициент изменения активной акустической площади щебеночного слоя или средняя удельная поверхность контакта щебня для среднего диаметра гранул (~ 45 мм) с плоскостью подошвы шпалы [5]; β — пористость щебня (0,45...0,6) [6]; T_4 — напряжение в щебеночном слое; E_3 — модуль Юнга шпалы; U_4 — амплитуда смещения щебеночного слоя; $h_{ш}$ — высота щебеночного слоя; S_4 — деформация щебеночного слоя.

5) На границе $z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}$

$$\begin{aligned} T_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}) &= T_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}); \\ E_4^* \frac{\partial S_4}{\partial z} &= E_5^* \frac{\partial S_5}{\partial z}; U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}) = \\ &= U_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}), \end{aligned} \quad (11)$$

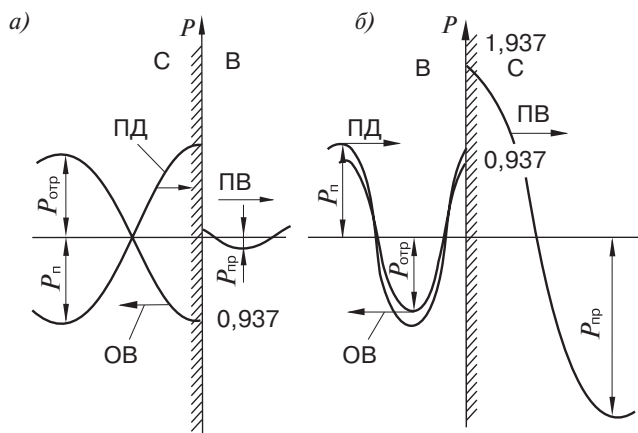


Рис. 1. Изменение величины амплитуды при отражении от границы «сталь—вода». Падающая волна: a — в стали; b — в воде; C — сталь; B — вода; ПД — падающая волна; ПВ — прошедшая волна; ОВ — отраженная волна; P — относительная амплитуда волны; P_n — амплитуда падающей волны; $P_{отр}$ — амплитуда отраженной волны; $P_{пр}$ — амплитуда волны, прошедшей через среду

Fig. 1. The change in magnitude of the amplitude upon reflection from the steel—water boundary. The incident wave: a — in steel; b — in the water; C — steel; B — water; ПД — falling wave; ПВ — transmitted wave; ОВ — reflected wave; P — relative wave amplitude; P_n — amplitude of the incident wave; $P_{отр}$ — amplitude of the reflected wave; $P_{пр}$ — amplitude of the wave transmitted through the medium

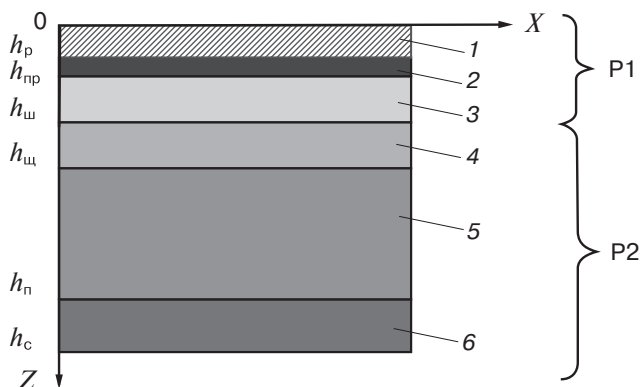


Рис. 2 (рис. 3 [1]). Схематическое изображение слоистой системы: 1 — рельс; 2 — подкладка; 3 — шпала; 4 — щебень; 5 — песчаная подушка; 6 — суглинок; P1, P2 — резонаторы

Fig. 2 (fig. 3 [1]). Schematic representation of a layered system: 1 — rail; 2 — pad; 3 — sleeper; 4 — crushed ballast; 5 — sand cushion; 6 — loam; P1, P2 — resonators

где E_4^* — модуль Юнга щебеночного слоя; E_5^* — модуль Юнга песчаного слоя; $h_{щ}$ — толщина щебеночного слоя; T_5 — напряжение в песчаном слое; S_5 — деформация песчаного слоя; U_5 — амплитуда смещения песчаного слоя.

Коэффициент изменения активной акустической площади границы между щебнем и песком примем равным 1, так как из-за вибрации при движении поездов происходит сепарация мелких фракций щебня вблизи границы $z = h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш}$, кроме того, песчаная фракция проникает в поровое пространство щебня, образуя не плоскую и резкую, а размытую границу.

6) На границе $z = h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n$

$$T_5(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n) = T_6(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n);$$

$$E_5^* \frac{\partial S_5}{\partial z} = E_6^* \frac{\partial S_6}{\partial z}; U_5(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n) = U_6(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n), \quad (12)$$

где T_6 — напряжение в глинистом слое; E_6^* — модуль Юнга глинистого слоя; U_6 — амплитуда смещения глинистого слоя; S_6 — деформация глинистого слоя.

Коэффициент изменения активной акустической площади границы между песком и суглинком также примем равным единице, так как из-за вибрации при движении поездов происходит проникновение вязкоупругой глинистой среды в поровое пространство песчаной фракции с образованием размытой границы с плавным изменением импеданса среды вблизи границы $z_{5,6}$ песчаного и глинистого слоев соответственно.

Найдем функцию амплитуды смещения глинистого слоя $U_6(z)$ на границе $z = h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n$, где h_n — толщина песчаного слоя.

Коэффициент ослабления вертикального смещения равен $K_{oi} = U_6(z) / u_1(0)$, и для этого решим совместно систему уравнений (1–7) [1], учитывая различные состояния щебня, песка и суглинка. Коэффициент ослабления вертикальных деформаций и напряжений на границе раздела в соответствии с данным уравнением будет равен

$$K_{osi} = \frac{dU_6}{du_1}; K_{oni} = \frac{E_6 dU_6}{E_1 du_1}. \quad (13)$$

Напряжение на границе «песок—суглинок» приводит к выплескам пути. Напряжение $E_6 dU_6$ — это давление, действующее в элементарном объеме на границе раздела. Вдоль оси X напряжения от каждой шпалы, как было показано выше, в основном компенсируются. По оси Y вблизи контура подошвы шпал при превышении суммы напряжения $E_6 dU_6$ и квазипостоянного напряжения величины предельного напряжения сдвига суглинка будет наблюдаться выплеск и уширение земляного полотна.

1) На границе 1 — поверхности катания ($z = 0$) рельс над шпалой смещается по оси Z при накатывании колеса

$$u_1(0, \tau) = u^0 e^{j\omega\tau}; S_1(0, \tau) = S_1(\tau) = \frac{du_1(\tau)}{dz};$$

$$T_1(0, \tau) = \frac{F(\tau)}{a_p a_{ш}}, \quad (14)$$

где u^0 — амплитуда смещения рельса. Для $z = 0$ и коэффициента отражения, равного 0, на поверхности контакта колеса и рельса из уравнения (14) находим уравнение падающей волны

$$u^0 e^{j\omega\tau} = A_1 e^{j\omega\tau}; A_1 = u^0, \quad (15)$$

где A_1 — амплитуда падающей волны в рельсе.

Смещение падающей волны $u_1(z, \tau)$ в рельсе отражается от границы 2, $z = h_p$ (поглощением энергии в металле рельса пренебрегаем, так как коэффициент поглощения $\eta_1 = 1,2 \cdot 10^{-4}$), высота рельса типа Р65 составляет 0,18 м, а величина $e^{-k_1 \eta_1 h_p} = e^{-10^{-6}} \cong 1$ для угловой частоты колебаний $\omega = 1570$ рад/с, тогда

$$B_1 e^{j(\omega \tau + k_1 h_p)} = u^0 \Omega_2 e^{j(\omega \tau - k_1 h_p)}; \quad B_1 = \Omega_2 u^0 e^{-2jk_1 h_p}, \quad (16)$$

где B_1 — амплитуда отраженной волны в рельсе; Ω_2 — коэффициент отражения резиновой прокладки.

Решая совместно (15) и (16), находим выражение для проходящей волны в слой 2 (резиновую прокладку) $u_1(h_p, \tau)$

$$u_1(h_p, \tau) = u^0 [1 + \Omega_2] e^{j[\omega \tau - k_1 h_p]}. \quad (17)$$

Волновое число для диапазона частот 1...250 Гц и металла (таблица) равно $k_1 = \omega / v_i = (6...1570) / 5100 = 1,2 \cdot 10^{-3} \dots 0,31$, произведение $k_1 h_p = 2,2 \cdot 10^{-4} \dots 5,6 \cdot 10^{-2}$, а фаза $Re(e^{-jk_1 h_p}) \approx 0$. Поэтому уравнение (17) на границе 2 для $\Omega_2 = -0,8$ [1] упрощается

$$u_1(h_p, \tau) = u^0 [1 + \Omega_2] e^{j\omega \tau} = 0,2 u^0 e^{j\omega \tau}. \quad (18)$$

Резиновая накладка между рельсом и шпалой уменьшает амплитуду смещения в 5 раз, а в системе «колесо — рельс» падающая и отраженная волны частично компенсируются, и возникнет волна вида

$$\Delta u = u^0 e^{j\omega \tau} - 0,8 u^0 e^{j\omega \left(\tau - \frac{h_p}{v}\right)} \cong 0,2 u^0 e^{j\omega \tau}.$$

2) На границе 2 (рельс — резиновая подкладка, $z = h_p$) с учетом уравнения (18)

$$u_1(h_p, \tau) = U_2(h_p, \tau) = 0,2 u^0 e^{j\omega \tau} = (C_2 e^{-j\Gamma_2 h_p} + D_2 e^{j\Gamma_2 h_p}) e^{j\omega \tau}, \quad (19)$$

где C_2, D_2 — комплексные коэффициенты падающей и отраженной от границы волны для второго слоя; Γ_2 — постоянная распространения в резиновой прокладке.

Падающая волна смещения $C_2 e^{-j\Gamma_2 z} e^{j\omega \tau}$ частично отражается от границы 3 ($z = h_p + h_{np}$)

$$\Omega_3 C_2 e^{j(\omega \tau - \Gamma_2 z)} = D_2 e^{j(\omega \tau + \Gamma_2 z)}; \quad D_2 = \Omega_3 C_2 \times e^{-2j\Gamma_2 (h_p + h_{np})}, \quad (20)$$

где Ω_3 — коэффициент отражения шпалы.

Тогда суммарное уравнение с учетом (19) и (20) на границе 3 будет иметь вид

$$U_2[(h_p + h_{np}), \tau] = \frac{0,2 u^0 (1 + \Omega_3) e^{-j\Gamma_2 h_{np}}}{1 + \Omega_3 e^{-2j\Gamma_2 h_{np}}} e^{j\omega \tau}. \quad (21)$$

Волновое число для резиновой подкладки (уравнение (7) [1]) равно

$$\Gamma_2 = \frac{\omega}{v_2} \eta_2 + j\gamma_2 = \frac{(6...1570)}{1479} [0,35 - 1,6 \cdot 10^{-4} (6...1570)] + j \frac{6...1570}{1479} = (4,1 \cdot 10^{-3} \dots 0,11) (0,35 \dots 0,05) + j (4,1 \cdot 10^{-3} \dots 1,1 \cdot 10^{-1}) = (1,44 \cdot 10^{-3} \dots 5,5 \cdot 10^{-3}) + j (4,1 \cdot 10^{-3} \dots 1,1 \cdot 10^{-1}). \quad (22)$$

Толщина подкладки составляет 0,01 м, а произведение в показателе степени выражения $e^{-j\Gamma_2 h_{np}}$ в правой части числителя (20) $\alpha_2 h_{np} = 1,44 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}$, а величина $\exp\left(-\frac{\omega h_{np}}{v_2} \eta_2\right) \cong 1$. В таких тонких подкладках ослабление амплитуды вибрации крайне мало, то же относится и к смещению фазы гармоник. Произведение $\gamma_2 \Omega_3 = -3,3 \cdot 10^{-3} \dots 8,8 \cdot 10^{-6} \ll 1$ в знаменателе уравнения (20). Поэтому с учетом оценок уравнение (20) упрощается

$$U_2[(h_p + h_{np}), \tau] = 0,2 (1 + 0,26) u^0 e^{j\omega \tau} = 0,25 u^0 e^{j\omega \tau}. \quad (23)$$

3) На границе 3 (резиновая подкладка — шпала, $z = h_p + h_{np}$) с учетом уравнения (23)

$$U_2(h_p + h_{np}) = u_3(h_p + h_{np}) = A_3 e^{j[\omega \tau - k_3 (h_p + h_{np})]} + B_3 e^{j[\omega \tau + k_3 (h_p + h_{np})]} = 0,25 u^0 e^{j\omega \tau}. \quad (24)$$

Падающая волна смещения $A_3 e^{j(\omega \tau - k_3 z)}$ отражается от границы 4

$$\Omega_4 A_3 e^{-jk_3 z} e^{j\omega \tau} = B_3 e^{j(\omega \tau + k_3 z)}; \quad B_3 = \Omega_4 A_3 e^{-j2k_3 (h_p + h_{np} + h_{ш})}; \quad z = h_p + h_{np} + h_{ш}. \quad (25)$$

Величина коэффициента отражения щебеночного слоя Ω_4 с учетом выражений (5–7) [1] рассчитывается по формуле

$$\Omega_4 = \frac{z_4 - z_3}{z_4 + z_3} = \frac{\rho_4 v_4 - \rho_3 v_3}{\rho_4 v_4 + \rho_3 v_3} = \frac{\rho_4 \sqrt{\frac{E_4(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_4^*}} - \rho_3 \sqrt{\frac{E_3(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_3}}}{\rho_4 \sqrt{\frac{E_4(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_4^*}} + \rho_3 \sqrt{\frac{E_3(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_3}}} = \frac{2700 \cdot 5000 - 950 \cdot 1479}{2700 \cdot 5000 + 950 \cdot 1479} = 0,81.$$

Уравнение смещения с учетом (24–26) на границе 4 будет иметь вид

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = \frac{0,25 u^0 (1 + \Omega_4)}{1 + \Omega_4 e^{-2jk_3 h_{ш}}} e^{j\omega \tau - jk_3 h_{ш}} \quad (27)$$

Волновое число для бетонной шпалы (таблица) равно $k_3 = \omega / v_3 = 6 \dots 1570 / 5000 = 1,2 \cdot 10^{-3} \dots 3,1 \cdot 10^{-1}$, толщина шпалы составляет 0,23 м, произведение $k_3 h_{ш} = 2,8 \cdot 10^{-4} \dots 7,1 \cdot 10^{-2}$. Фаза ($e^{-jk_3 h_p}$) в уравнении (5) [1] изменяется в интервале $2,8 \cdot 10^{-4} \dots 7,1 \cdot 10^{-2}$, что значительно меньше $\omega\tau = 6,28 \text{ с}^{-1} \cdot 1 \text{ с}$. В знаменателе уравнения (27) фаза ($e^{-2jk_3 h_p}$) изменяется в интервале $5,6 \cdot 10^{-4} \dots 0,14$, а значения $\sin(5,6 \cdot 10^{-4} \dots 0,14) \in (5,6 \cdot 10^{-4} \dots 0,14)$. Поэтому уравнение (27) можно упростить

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) \cong 0,25u^0(1 + \Omega_4)e^{j\omega\tau} = 0,45u^0e^{j\omega\tau}. \quad (28)$$

4) На границе 4 (шпала — щебень, $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$) с учетом уравнения (28)

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = U_4(h_p + h_{np} + h_{ш}) = C_4 e^{-j\Gamma_4(h_p + h_{np} + h_{ш})} e^{j\omega\tau} = 0,45u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (29)$$

Коэффициент отражения на границе 5 между шпалой и щебнем равен

$$\Omega_5 = \frac{z_5 - z_4}{z_5 + z_4} = \frac{\rho_5^* v_5 - \rho_4 v_4}{\rho_5^* v_5 + \rho_4 v_4} = \frac{2040 \cdot 500 - 2700 \cdot 5000}{2040 \cdot 500 + 2700 \cdot 5000} = -0,86. \quad (30)$$

Падающая волна смещения $A_4 e^{j(\omega\tau - k_4 z)}$ отражается от границы 5

$$\Omega_5 A_4 e^{-jk_4 z} e^{j\omega\tau} = B_4 e^{j(\omega\tau + k_4 z)}; \\ B_4 = \Omega_5 A_4 e^{-j2k_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш})}; \\ z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}. \quad (31)$$

Уравнение смещения с учетом выражений (29–31) на границе 5 будет иметь вид

$$U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = \frac{0,45u^0(1 + \Omega_5)}{1 + \Omega_5 e^{-2jk_4 h_{ш}}} e^{j\omega\tau - jk_4 h_{ш}}. \quad (32)$$

Волновое число для слоя щебня (таблица) равно $k_4 = \omega / v_3 = 6 \dots 1570 / 500 = 1,2 \cdot 10^{-2} \dots 3,1$, толщина слоя щебня составляет 0,4 м, произведение $k_4 h_{ш} = 4,8 \cdot 10^{-3} \dots 1,2$. Фаза ($e^{-jk_4 h_p}$) в уравнении (5) [1] изменяется в интервале $4,8 \cdot 10^{-3} \dots 3,1$, что значительно меньше $\omega\tau = 6,28 \text{ с}^{-1} \cdot 1 \text{ с}$, а следовательно, фазу $\sin(\omega\tau - k_4 z)$ можно считать близкой к 0. Приведенные оценки для фазы ($e^{-jk_4 h_p}$) справедливы и для ($e^{-2jk_4 h_p}$). Поглощением энергии волны в бетоне можно пренебречь (см. таблицу). Поэтому уравнение (32) можно упростить

$$u_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,45u^0(1 + \Omega_5)e^{j\omega\tau} = 0,063u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (33)$$

Для снижения амплитуды изгибных деформаций в шпале следует установить промежуточный материал — полимерную прокладку, выравнивающую на-

пряжения в объеме бетона между шпалой и щебнем и увеличивающую площадь акустического контакта [5]. При этом следует учитывать, что модуль упругости полимера заметно повышается, начиная со 100 Гц, и срок службы такой прокладки будет не выше пяти-шести лет.

5) На границе 5 (щебень—песок, $z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}$) с учетом уравнения (33)

$$u_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = U_5(h_p + h_{np} + h_{ш}) = C_5 e^{-j\Gamma_5(h_p + h_{np} + h_{ш})} e^{j\omega\tau} = 0,063u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (34)$$

Коэффициент отражения на границе 6 между песчаным слоем и щебнем равен

$$\Omega_6 = \frac{z_6 - z_5}{z_6 + z_5} = \frac{\rho_6^* v_6 - \rho_5 v_5}{\rho_6^* v_6 + \rho_5 v_5} = \frac{1750 \cdot 350 - 2040 \cdot 500}{1750 \cdot 350 + 2040 \cdot 500} = -0,25. \quad (35)$$

Поэтому для параметров из таблицы падающая волна смещения $C_5 e^{j(\omega\tau - \Gamma_5 z)} = 0,063u^0 e^{-\alpha_5 z} e^{j(\omega\tau - \gamma_4)}$ на границе 5 примет вид

$$U_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,063u^0(1 + \Omega_6)10e^{-\omega\eta_4 \frac{h_{ш}}{v_4}} e^{j\omega\tau} = 0,063(1 - 0,25)u^0 e^{-(6 \dots 1570) \cdot 0,1 \cdot 0,4 / 500} e^{j(\omega\tau)} = 0,047(1 \dots 0,93)u^0 e^{j\omega\tau} \cong 0,045u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (36)$$

6) На границе 6 (песок — суглинок, $z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш}$) с учетом уравнения (36)

$$U_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = U_6(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш}) = C_6 e^{-j\Gamma_6(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш})} e^{j\omega\tau} = 0,045u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (37)$$

Для строительного песка снижение амплитуды составит $e^{-\alpha_5 \cdot 1} \approx 0,998 \dots 0,7$, или в среднем 0,85. В окончательном виде

$$U_6(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,038u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (38)$$

Зная величину смещения рельса $u^0 e^{j\omega\tau}$ по оси Z, легко рассчитать напряжение, действующее по контуру шпалы и вызывающее просадку. Условием начала просадки является превышение напряжения T_6 предельного напряжения сдвига суглинка G_0 , т. е. $T_6 > G_0$. Для неуплотненных глинистых грунтов $G_0 = 0,03$ МПа, для уплотненных — $G_0 = 0,04 - 0,06$ МПа [7].

Продифференцировав уравнение (38), находим деформацию и напряжение уравнение (12) на границе «песок — суглинок» (п. 6 таблицы)

$$S_6 = \frac{dU_6}{dz} = 0,038u^0 \omega e^{j\omega\tau}; \quad T_6 = |E_5^*| e^{-j\delta_5} \frac{dU_6}{dz} \approx 14,5 \cdot 10^6 \omega u^0 e^{j(\omega\tau - 0,05)}. \quad (39)$$

Найдем величину напряжения на границе «песок — суглинок» для двух состояний песчаной подушки:

п. 9 таблицы $T_5 = E_5 \frac{dU_6}{dz} = 2,4 \cdot 10^6 \omega u^0 e^{j(\omega\tau - 0,1)}$; (40)

п. 10 таблицы $T_5 = E_5 \frac{dU_6}{dz} = 1,9 \cdot 10^4 \omega u^0 e^{j(\omega\tau - 0,6)}$. (41)

Снижение амплитуды для случая п. 9 таблицы составит $e^{-\alpha_{5,1}} = 0,99...0,11$, и, следовательно, произойдет перекачка энергии продольной волны в поперечную и возникнет течение песка вдоль длины шпалы в обе стороны, а соответственно, возрастет пористость в слое песка и повысится вероятность выплеска.

Таким образом, амплитуда смещения на границе «песок — суглинок» снижается в 26 раз в диапазоне частот 1–250 Гц. Для песка с повышенной влажностью вблизи торцов шпалы возникают вторичные поперечные волны, способствующие течению песка. Между шпалами встречные вторичные поперечные волны компенсируются, но возрастает пористость песчаного слоя за счет выноса песка вверх.

Как было обосновано выше, из-за «размытой» границы между песком и суглинком коэффициент отражения можно принять равным 0. При этом результаты расчетов изменятся незначительно и на 15 % уменьшится степень демпфирования.

В заключение для сравнения рассмотрим задачу, когда верхнее строение пути помещается в бетонный короб, который устанавливается на слой гравелисто-песчаной смеси и суглинок, а в подшпальные углубления в нем установлены резиновые прокладки. Песочно-гравийная смесь в качестве защитного слоя для безбалластного пути имеет худшие прочностные и деформативные свойства при вибродинамических воздействиях, чем щебень [8]. По аналогии с рассмотренной выше задачей можно записать, что на границах 1, 2 те же выражения. А на границе 3 будет действительно уравнение (20).

На границе 3 ($z = h_p + h_{np}$) с учетом уравнения (20)

$$U_2(h_p + h_{np}) = u_3(h_p + h_{np}) = A_3 e^{j[\omega\tau - k_3(h_p + h_{np})]} + B_3 e^{j[\omega\tau + k_3(h_p + h_{np})]} = 0,25u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (42)$$

Падающая волна смещения $A_3 e^{j(\omega\tau - k_3 z)}$ отражается от границы 4 (шпала — резиновая прокладка, $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$)

$$\Omega_4 A_3 e^{-jk_3 z} e^{j\omega\tau} = B_3 e^{j(\omega\tau + k_3 z)}; \quad B_3 = \Omega_4 A_3 e^{-j2k_3(h_p + h_{np} + h_{ш})}. \quad (43)$$

Величина Ω_4 с учетом выражений (9–11) рассчитывается по формуле

$$\Omega_4 = \frac{z_4 - z_3}{z_4 + z_3} = \frac{\rho_4 v_4 - \rho_3 v_3}{\rho_4 v_4 + \rho_3 v_3} = \frac{2700 \cdot 5000 - 950 \cdot 1479}{2700 \cdot 500 + 950 \cdot 14790} = 0,81. \quad (44)$$

Уравнение смещения с учетом выражений (42–44) на границе 4 будет иметь вид

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = \frac{0,25u^0(1 + \Omega_4)}{1 + \Omega_4 e^{-2jk_3 h_{ш}}} e^{j\omega\tau - jk_3 h_{ш}}. \quad (45)$$

Далее следуют такие же оценки, как для границы 3 предыдущей задачи. Поэтому уравнение (45) можно упростить

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) \cong 0,25u^0(1 + 0,81)e^{j\omega\tau} = 0,45u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (46)$$

На границе 4 (шпала — резиновая прокладка, $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$) с учетом уравнения (46)

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = 0,45u^0 e^{j\omega\tau} = U_4(h_p + h_{np} + h_{ш}) = C_4 e^{-j\Gamma_4(h_p + h_{np} + h_{ш})} e^{j\omega\tau}. \quad (47)$$

Коэффициент отражения на границе 5 между шпалой и резиновой прокладкой равен

$$\Omega_5 = \frac{z_5 - z_4}{z_5 + z_4} = \frac{\rho_5^* v_5 - \rho_4 v_4}{\rho_5^* v_5 + \rho_4 v_4} = \frac{950 \cdot 1479 - 2700 \cdot 5000}{950 \cdot 1479 + 2700 \cdot 5000} = -0,81. \quad (48)$$

Падающая волна смещения $A_4 e^{j(\omega\tau - k_4 z)}$ отражается от границы 5

$$\Omega_5 C_4 e^{-jk_4 z} e^{j\omega\tau} = D_4 e^{j(\omega\tau + k_4 z)}; \quad D_4 = \Omega_5 C_4 e^{-j2k_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш})}; \quad z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}. \quad (49)$$

Уравнение смещения с учетом выражений (46–48) на границе 5 будет иметь вид

$$U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = \frac{0,45u^0(1 + \Omega_5)}{1 + \Omega_5 e^{-2jk_4 h_{ш}}} e^{j\omega\tau - jk_4 h_{ш}}. \quad (50)$$

Волновое число для резиновой прокладки выражения (6, 7) [1] равно

$$\Gamma_2 = \frac{\omega}{v_2} \eta_2 + j\gamma_2 = (1,44 \cdot 10^{-3} ... 5,5 \cdot 10^{-3}) + j(4,1 \cdot 10^{-3} ... 1,1 \cdot 10^{-1}). \quad (51)$$

Толщина прокладки пусть составляет 0,02 м, а произведение в показателе степени выражения $e^{-j\Gamma_2 h_{ш}}$ в правой части числителя (6) [1] $\alpha_4 h_{ш} = 2,9 \cdot 10^{-5} ... 1,1 \cdot 10^{-4}$. Выбираем ребристую многослойную резину с $\eta_4 = 2$, а величина $\exp\left(-\frac{\omega h_{ш}}{v_2} \eta_2\right) = \exp\left(-\frac{(6...1570) \cdot 0,02 \cdot 2}{1479}\right) = e^{-1,6 \cdot 10^{-4}} ... e^{-0,042} \cong 0,98$. В таких тонких прокладках ослабление амплитуды вибрации крайне мало, то же относится и к смещению фазы гармоник. На основании проведенных оценок можно упростить уравнение (50)

$$U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,085u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (52)$$

Физико-механические характеристики материалов, используемых в верхнем и нижнем строении пути
 Physico-mechanical characteristics of materials used in the subgrade and superstructure of the track

№ п/п	Материал среды, грунты	Модуль Юнга материала E , Па	Скорость распространения волны v , м/с	Коэффициент потерь энергии η	Плотность материала ρ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона μ
1	Сталь [15]	$20 \cdot 10^{10}$	5100	$1,2 \cdot 10^{-4}$	7870	0,25–0,33
2	Бетон [9–11]	$6,7 \cdot 10^{10}$	5000	$\sim 10^{-3}$	2700	0,16–0,18
3	Резина пористая [9, 11–14]	$5 \cdot 10^4$	30	1,5–2,0	700	0,47
4	Резиновая прокладка [9]	$5 \cdot 10^6$ (10 Гц) $1,2 \cdot 10^7$ (300 Гц)	1479	0,35 (1 Гц) 0,25 (100 Гц), 0,04 (300 Гц) при $\delta = 0,2$	950	0,38
5	Щебень гранитный [11, 12–19]	$350 \cdot 10^6$	100–1000	0,1 при $\delta = 0,1$	2040	0,15
6	Гравелисто-песчаная смесь [5]	$370 \cdot 10^6$	200–500	0,1 при $\delta = 0,05$	1600–1900	0,25
7	Песок крупный и средней крупности со степенью влажности $< 0,8$ [5]	$120 \cdot 10^6$	500	0,1 при $\delta = 0,03$	1700	0,25
8	Песок строительный (ГОСТ 8736–93) [5, 13]	$120 \cdot 10^6$	500	0,1 при $\delta = 0,1$	1680	0,25
9	Насыпные рыхлые пески, супеси [5]	$62 \cdot 10^6$	100–300	0,2 при $\delta = 0,1$	700–1400	0,25
10	Водонасыщенный песок [5, 9]	$0,49 \cdot 10^6$	290	0,4 при $\delta = 0,7$	1700	0,25
11	Гравий [5]	$150 \cdot 10^6$	100–1000	0,1 при $\delta = 0,05$	1400	0,18
12	Суглинок тугопластичный и плотнопластичный [5]	$43 \cdot 10^6$	1500	0,15	1700	0,35
13	Суглинок средний [5]	$37 \cdot 10^6$	140	0,15	1810	0,35
14	Суглинок водонасыщенный [5]	—	300–1400	0,2	1600–2100	0,4
15	Супесь водонасыщенная [5]	—	300–1200	0,2	1600–2000	0,35
16	Глина твердая и полутвердая [5]	$25 \cdot 10^6$	1500	0,15	1700	0,40–0,42
17	Глина водонасыщенная [5]	—	500–2800	0,5	1700–2200	0,45
18	Насыпной грунт, уплотненный со степенью влажности $< 0,5$ [5]	—	300	0,1	1600	0,35
19	Грунт песчаный маловлажный [5]	—	150–900	0,1	700–1400	0,35
20	То же средней влажности [5]	—	250–1300	0,15	1600–1900	0,35
21	То же водонасыщенный [5]	—	300–1600	0,2	1700–2000	0,35
22	Водонасыщенный грунт ниже уровня грунтовых вод при степени влажности $> 0,9$ [5]	—	1750	0,3	2000	0,35
23	Деревянная шпала [12]	$0,9 \cdot 10^{10}$	3600	0,14	960	0,35

δ — коэффициент затухания (угол потерь).

Таким образом, амплитуда смещения на границе «резиновая подкладка — бетонный короб» снижается в ~12 раз в диапазоне частот 1–250 Гц. Учитывая, что бетон не обладает демпфирующими свойствами, амплитуда смещения на суглинке описывается тем же уравнением (52).

Для расчета напряжений, действующих на границе «бетонный короб — суглинок», необходимо записать напряжение $T_s = E_s \frac{dU_4}{dz}$ как функцию, распределенную по всем шпалам в секции бетонного короба при прохождении по нему грузового состава, далее проинтегрировав по длине секции можно найти среднюю силу, действующую на секцию.

Выводы. 1. Разработан аппарат определения степени демпфирования гармонических напряжений в земляном полотне в зависимости от состава грунта, его влажности и пористости. Включение в анализ стоимостных показателей позволит оценивать экономическую эффективность проекта.

2. Наилучшие демпфирующие и стоимостные свойства имеют конструкции с щебеночным балластом. Однако устойчивость таких конструкции и их межремонтный срок зависят от правильной организации водоотводов, особенно в весенне-осеннее время.

3. Для повышения демпфирования конструкций верхнего строения пути следует:

- установить для снижения амплитуды изгибных деформаций в шпале промежуточный материал — полимерную прокладку, выравнивающую напряжения в объеме бетона между шпалой и щебнем. Однако срок службы такой прокладки будет невысоким.

- наносить на конструкции вибродемпфирующие покрытия (ВДП);

- использовать вибродемпфирующие засыпки из сухого песка или чугуной дробы в резиновые конструкции;

- применять в качестве прокладок композиционный материал: песок или гранулы графита в резине, имеющие угол потерь $\delta \approx \pi/2$ и ослабляющие напряжение в десять раз при толщине слоя 10 мм.

4. Песочно-гравийная смесь в качестве защитного слоя для безбалластного пути имеет худшие прочностные и деформативные свойства при вибродинамических воздействиях, чем щебень.

5. Разработанный аппарат определения степени демпфирования гармонических напряжений в конструкции земляного полотна и верхнего строения пути может служить основой для разработки методики выбора типа конструкции железнодорожного полотна в зависимости от геологических, климатических условий, среднегодового уровня грунтовых вод и количества демпфирующих слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельков В. М. Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 3. С. 187–192. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.
2. Филиппов В. Релаксация в растворах полимеров, полимерных жидкостях и гелях // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1969. Ч. 2Б. С. 9–109.
3. Литовиц Т., Девис К. Свойства газов, жидкостей и растворов // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1968. Ч. 2А. С. 298–370.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. М.: Наука, 1970. Т. 1. 506 с.
5. СП 23–105–2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. Свод правил по проектированию и строительству: утв. постановлением Госстроя России № 20 от 09.03.2004.
6. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подпальных прокладок / В. О. Певзнер [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 3. С. 140–146. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-3-140-146.
7. Колос А. Ф., Турсунов Х. И., Николайтис Д. С. Исследование прочностных свойств балластного материала, засоренными барханными песками // Инженерный вестник Дона. 2007–2012. URL: www.ivdon.ru/magazine (дата обращения: 14.05.2013 г.).
8. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строит. вузов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
9. Корчагин Г. Е., Журавлёв А. А., Стегин Ю. М. Физика волновых процессов: учеб.-метод. пособие. Казань: Изд-во Казанского Федерального университета, 2014. 77 с.
10. Физика пласта, добыча и подземное хранение / О. М. Ермилов [и др.]. М.: Наука, 1996. 541 с.
11. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства пород. М.: Высшая школа, 1976. 474 с.
12. Машенко А. В., Пономарев А. Б., Сычкина Е. Н. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Пермского нац.-исслед. политехн. ун-та, 2014. 176 с.
13. Вайнштейн Е. В. Технология строительства лесовозных дорог из щебеночно-мастичных асфальтобетонов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2010. 16 с.
14. Радзишевский А. Ю. Основы аналогового и цифрового звука. М.: Вильямс, 2006. 320 с.
15. Электронный справочник химика. URL: 21 <http://chem21.info/> (дата обращения: 10.05.2016 г.).
16. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
17. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных / под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматлит, 1962. 247 с.
18. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
19. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1965. 184 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович,

д-р физ.-мат. наук, научный консультант НКЦ, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 03.06.2016 г., актуализирована 30.10.2016 г., принята к публикации 17.11.2016 г.

Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 2

V. M. BEL'KOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The present article is a continuation of the article [1], where was considered a model of the vibration damping properties of the subgrade at the main area of the sole of a ballast prism of normalized thickness, a protective sand cushion and clay soils under conditions of harmonic vibrations on the basis of physical and chemical mechanics. It was noted that the Kelvin—Vogt model, currently used for modeling, is not applicable for layered systems that do not have, in principle, concentrated masses. For the occurrence of oscillations in the clay layer, it is necessary that under it there would be a medium reflecting the vertical longitudinal wave. Otherwise, the reverse half-wave will not form, and the compression wave will go deep into the ground and turn into heat in the end. Such problems can be solved only using the theory of wave processes.

On the basis of the harmonic analysis of wave processes in layered systems for the ballast track, it is shown that the displacement amplitude at the sand-loam boundary decreases 26 times in the frequency range 1–250 Hz. Along the sleeper, secondary longitudinal and transverse waves arise due to the "transfer" of the energy of the main longitudinal wave into the transverse along the sleepers. As a result, circulation flows along the length of the sleeper occurred as well as irreversible deformation of the prism and the accumulation of defects in the subgrade, the porosity and the probability of splashes of ballast are increased. The best damping and cost properties have constructions with crushed stone in comparison with a ballastless design. However, the stability of the motion on the ballast prism and its inter-repair period depends on the correct organization of drains, especially in spring and autumn.

Developed apparatus for determining the degree of stress damping in the structure of the track subgrade and the superstructure can be used to develop a normative document for selecting the design of the subgrade structure of the track, depending on the geological, climatic conditions and the average annual groundwater level. The use of the apparatus of linear harmonic analysis is explained by the fact that the influence of nonlinear effects of wave propagation in dispersed materials does not have time to appear because of the extremely small thicknesses of materials constituting the subgrade.

Keywords: vibro damping; subgrade; elastic-viscoplastic properties; harmonic analysis; vertical vibrating waves

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-312-320>

REFERENCES

1. Bel'kov V. M. *Modelirovanie uprugovязkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 3, pp. 187–192. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.
2. Filippov V. *Relaksatsiya v rastvorakh polimerov, polimernykh zhidkostyakh i gelyakh*. Fizicheskaya akustika [Relaxation in solutions of polymers, polymer liquids and gels. Physical acoustics]. Moscow, Mir Publ., 1969, Part 2B, pp. 9–109.
3. Litovits T., Devis K., Meson U. *Svoystva gazov, zhidkostey i rastvorov*. Fizicheskaya akustika [Properties of gases, liquids and solutions. Physical acoustics]. Moscow, Mir Publ., 1968, Part 2A pp. 298–370.
4. Savel'ev I. V. *Kurs obshchey fiziki. Mekhanika, kolebaniya i volny, molekulyarnaya fizika* [Course of General Physics. Mechanics, oscillations and waves, molecular physics]. Moscow, Nauka Publ., 1970, Vol. 1, 506 p.
5. SP 23–105–2004. *Assessment of vibration in the design, construction and operation of metro facilities. Code of rules for de-*

sign and construction. Approved by Gosstroy of Russia no. 20 from March 09, 2004. (in Russ.).

6. Pevzner V. O., Zheleznov M. M., Kaplin V. N., Tret'yakov V. V., Myslivets M. N., Tomilenko A. S. *Povyshenie stabil'nosti puti v zone stykov za schet primeneniya uprugikh podshpal'nykh prokladok* [Increasing track stability in the zone of joints due to the use of elastic under sleeper pads]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 3, pp. 140–146. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-3-140-146.

7. Kolos A. F., Tursunov Kh. I., Nikolaytist D. S. *Issledovanie prochnostnykh svoystv ballastnogo materiala, zasorennymi barkhannymi peskami* [Investigation of strength properties of ballast material, clogged barchan sands]. Inzhenernyy vestnik Dona [The engineer's messenger of the Don]. URL: www.ivdon.ru/magazine (retrieved on 14.05.2013).

8. Vyalov S. S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov*. Ucheb. posobie dlya stroit. vuzov [Rheological basics of soil mechanics. A manual for schools for construction engineers], Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 1978, 447 p.

9. Korchagin G. E., Zhuravlev A. A., Stegin Yu. M. *Fizika volnovykh protsessov*. Ucheb.-metod. posobie [Physics of wave processes. Educational-methodical manual]. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2014, 77 p.

10. Ermirov O. M., Remizov V. V., Chugunov L. S., Shirkovskiy A. I. *Fizika plasta, dobycha i podzemnoe khraneniye* [Reservoir physics, production and underground storage]. Moscow, Nauka Publ., 1996, 541 p.

11. Frolov A. D. *Elektricheskie i uprugie svoystva porod* [Electrical and elastic properties of rocks]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher School] Publ., 1976, 474 p.

12. Mashchenko A. V., Ponomarev A. B., Sychkina E. N. *Spezial'nye razdely mekhaniki gruntov i mekhaniki skal'nykh gruntov*. Ucheb. posobie [Special sections of soil mechanics and mechanics of rocky soils. A tutorial]. Perm, Perm National Research Polytechnical University Publ., 2014, 176 p.

13. Vaynshteyn E. V. *Tekhnologiya stroitel'stva lesovoznykh dorog iz shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonov*. Kand. tekhn. nauk diss. avtoref. [Technology of construction of forest roads from gravel-mastic asphalt concrete. Cand. tech. sci. diss. synopsis]. Ioshkar-Ola, 2010, 16 p.

14. Radzishevskiy A. Yu. *Osnovy analogovogo i tsifrovogo zvuka* [Basics of analog and digital sound]. Moscow, Williams Publ., 2006, 320 p.

15. *Elektronnyy spravochnik khimika* [Electronic reference book of the chemist]. URL: <http://chem21.info/> (retrieved on 10.05.2016).

16. Kikoin I. K. *Tablitsy fizicheskikh velichin*. Spravochnik [Tables of physical quantities. Directory]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 1008 p.

17. Kay J., Laby T., Yakovlev K. P. *Tablitsy fizicheskikh i khimicheskikh postoyannykh* [Tables of physical and chemical constants]. Moscow, State publishing Fizmatliteratura, 1962, 247 p.

18. Shakhunyan G. M. *Zheleznodorozhnyy put'* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1987, 479 p.

19. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of railway track]. Moscow, Transport Publ., 1965, 184 p.

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. BEL'KOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Consultant of Science and consultancy center (NKTs), JSC "VNIIZhT"

Received 03.06.2016

Revised 30.10.2016

Accepted 17.11.2016

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (V. M. Bel'kov)