

# Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 1

**В. М. БЕЛЬКОВ**

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

**Аннотация.** Настоящая статья посвящена постановке задачи и разработке модели вибродемпфирующих свойств земляного полотна на основной площадке подошвы балластной призмы нормированной толщины, защитной песчаной подушки и глинистых грунтов в условиях воздействия гармонических колебаний на базе физико-химической механики.

При анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути обычно используют тело Кельвина — Фойгта и земляное полотно представляют как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами. Но эта модель неприменима для слоистых систем, не имеющих сосредоточенных масс. Подобные задачи можно решать только с использованием теории волновых процессов.

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

**Введение.** При движении грузового поезда на нижнее строение пути в диапазоне частот 4–10 000 Гц действуют гармонические силы [1], воздействующие на упруговязкопластические свойства дисперсных слоев, состав граничных зон и их динамику. Как показано в работах [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], в поле гармонических напряжений нарушение устойчивости границы раздела двух сред с различной структурной вязкостью происходит вначале на неоднородностях границы: в местах с повышенным напряжением и большей пористостью слоя щебня, песка или суглинка. Причем среда с меньшей структурной вязкостью, т. е. песок, проникает в поровое пространство щебня, а суглинок или глина в поровое пространство слоя песка. Это существенно уменьшает локальную структурную вязкость щебня или песка, и, в конечном счете, приводит к заполнению порового пространства менее вязкой средой с образованием переходной области и, как следствие, снижению несущей способности песчаного и глинистого оснований [2]. Далее на построочной основной площадке (границе раздела накопленных балластных и дренирующих материалов и глинистых грунтов земляного полотна) вследствие пластических деформаций образуются балластные углубления — корыта и ложа. Влажность глинистых грунтов в местах с этими углублениями в 1,2...1,3 раза больше, чем

для ровной площадки. Из-за повышенной влажности происходят просадки пути, в том числе с выдавливанием разжиженного глинистого грунта, возникают пучины, проявляются сплывы и оползания откосных частей насыпей [9, 10].

**Постановка задачи моделирования.** При анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути обычно используют тело Кельвина — Фойгта (рис. 1) [11, 12] и земляное полотно представляют как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами.

Однако, как следует из выше рассмотренного и работы [13], тело Кельвина — Фойгта относится к приближенным моделям, не раскрывающим физические механизмы взаимодействия верхнего строения пути с земляным полотном. Слоистые системы не имеют сосредоточенных масс, отличаются различными акустическими свойствами и отражением вибрационных волн на границе раздела слоистой системы. За счет отражения на границе раздела в каждом слое амплитуда и поглощение энергии гармонических колебаний будут свои, отличные от начальной амплитуды смещения рельсов. Кроме того, для возникновения колебаний в суглинке необходимо, чтобы под ним находилась среда, отражающая вертикальную продольную волну, иначе обратная полуволна не сформируется, а компрессионная волна уйдет вглубь и превратится в итоге в тепло. То есть подобные задачи можно решать только с использованием теории волновых процессов.

Построим модель устойчивости системы «глинистые грунты — защитный песчаный слой — щебеночная балластная призма» в условиях воздействия гармонических колебаний с частотным спектром 4–250 Гц [14] в соответствии с изложенными выше положениями физико-химической механики [13] для различных свойств песчаного слоя и глинистого основания.

В настоящее время механизм возбуждения вибрации в грунтах изучен недостаточно детально, в частности процессы генерации вторичных волн сыпучими средами. Так, спектральная плотность силы, возникающей при воздействии колесных пар на верхнее строение пути, зависит от состояния поверхностей

качения колес и рельса, систем рессорного подвешивания вагона, характеристик пути и его основания, скорости движения поезда, профиля рельса, качества рихтовки пути и его кривизны на месте проведения испытания и от других факторов. Оценка уровней виброускорения расчетным путем представляет собой достаточно сложную задачу. В дополнение к математическим трудностям проблема осложняется отсутствием достоверных данных о геометрических характеристиках и упругих свойствах слоев грунта. Обычно данные о геологическом строении района в окрестности железнодорожной линии получают на основе анализа проб грунта при бурении, но количество пробуренных скважин ограничено и поэтому упругие свойства грунта определяются приблизительно. Иногда имеются данные о таких величинах, как модуль упругости, структурная вязкость по статическим характеристикам, а информация об их динамических параметрах на практике не известна. В «Руководстве по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтов земляного полотна» (ЦПИ-36) [10] к физико-механическим характеристикам отнесены следующие статические характеристики: 1) гранулометрический (зерновой) состав балластных материалов и грунтов земляного полотна; 2) характеристики засоренности щебня балластного слоя; 3) плотность балластных материалов и грунтов земляного полотна; 4) пористость и коэффициент пористости балластных материалов и грунтов земляного полотна; 5) максимальная плотность и оптимальная влажность накопленных балластных материалов; 6) влажность глинистых грунтов на границе раскатывания и границе текучести; 7) число пластичности; 8) подверженность морозному пучению, величина и интенсивность морозного пучения грунтов земляного полотна; 9) угол внутреннего трения и удельное сцепление для балластных материалов и грунтов земляного полотна; 10) упругая осадка грунтов подшпального основания; 10) вибродинамические характеристики грунтов земляного полотна (прочностные и деформативные свойства глинистых грунтов при вибродинамических воздействиях) и ряд других важных технологических характеристик. А динамические характеристики сред — скорость распространения волны, показатель и коэффициент потерь, коэффициент Пуассона в Руководстве [10] не приводятся.

В настоящей статье используются физико-механические свойства грунтов, приведенных в Своде правил по проектированию и строительству «Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена» СП 23–105–2004 [15]. Для расчета вибрационных полей в Своде правил применяются зависимости из линейной теории волновых процессов.

Передача вибрационной волны или статических и динамических сил, которые возникают от проходящего поезда и действуют вертикально по оси  $Z$  от рельса через резиновую прокладку на шпалу, а далее через подошву шпалы на щебень на границе  $Z=0$  (поверхность контакта шпалы со щебнем), — достаточно сложный процесс. Сила, воздействующая на шпалу, имеет квазипостоянную составляющую, модулируемую суммарной гармонической кривой с частотным спектром 4–250 Гц [14].

В области подшпального основания возникает нестационарная интерференция, увеличивающая амплитуду тензора напряжения в местах контакта шпалы и щебня. Диссипация энергии продольной волны вибрации вдоль пути, представленная на рис. 1, по оси  $X$  в сыпучем минеральном материале под шпалой заключается в разрушении кристаллической решетки острых граней и выступов на поверхности щебня и в основном определяется формой гранул, количеством на них острых выступов, плотностью упаковки и степенью загрязнения, понижающей структурную вязкость щебня. График зависимости амплитуды деформационной волны в плоскости  $Z-X$ , исходящей от шпалы, для каждого слоя щебня представляет собой приблизительно плоскую волну сжатия (рис. 2). Между шпалами амплитуда плоской деформационной волны уменьшается и за счет взаимодействия граней щебеночного камня преобразуется в сдвиговые и поперечные волны, которые распространяются вдоль оси движения вагонов  $X$  и от соседних шпал практически полностью компенсируются. Переменные напряжения вдоль оси  $Y$ , перпендикулярной оси  $X$ , приводят к дроблению гранул и возникновению дефектов упаковки за счет сдвигов щебеночного камня к боковым поверхностям призмы и ее уширению. Образующаяся мелкая фракция из-за вибрации сыпается и сосредотачивается в нижней части щебеночной призмы. По мере засорения пылевидными грузами и песком пористость щебеночной призмы падает.

Устойчивость насыпи в системе глинистые грунты — двухслойная призма из щебня и песчаной подушки в целом определяется по вертикальному профилю снизу вверх стабильностью границ «суглинок — слой песка» и «песчаный слой — слой щебня». Движущийся поезд возбуждает вибрации грунта из-за возникновения динамических сил между колесом и рельсом, обусловленных в основном ударными нагрузками при колебаниях колес тележек и их отрывом от рельсов. В интервале эксплуатационной скорости движения поездов от 30 до 110 км/ч спектр вибрации, передаваемой слою щебня, сосредоточен в частотном диапазоне 4–250 Гц [14].

При прохождении состава на рельсы и шпалу действует квазипостоянная составляющая силы нагрузки, а при приближении колес к шпалам и наезде

на них начинает действовать переменная составляющая. В результате шпала достигает максимального смещения в сторону грунта, а при съезде колеса переменная составляющая силы нагрузки уменьшается. Вертикальная сила возбуждает в шпале вертикальную продольную волну: вдоль оси  $X$  — продольную и поперечную волны из-за объемного сжатия сегмента под резиновой прокладкой, а вдоль оси  $Y$  — также продольную и поперечную волны, направленные к концам шпал. Вертикальная продольная волна частично отражается от границы «шпала — щебень», и меньшая по амплитуде ее часть проходит в щебень.

Напряжение сжатия, проходящее через резиновую прокладку, возбуждает в материале шпалы вертикальную продольную волну, и на криволинейной границе «шпала — щебень» одномерный тензор напряжения  $T_z$  переходит в трехмерный  $T_{x,y,z}$  (рис. 1). Волна в областях шпалы, контактирующей с гранулами щебня, переходит в области контакта в щебеночный материал. Волна напряжений сжатия в местах, где отсутствует плотный контакт подошвы шпалы со щебнем, отражается на границе «шпала — воздух» и в противофазе взаимодействует с набегающей вибрационной волной, практически полностью ее компенсируя. В результате материал бетонной шпалы будет испытывать локальные знакопеременные изгибные деформации по своей длине и ширине.

Объемные напряжения в области шпалы под резиновой прокладкой будут генерировать продольные и поперечные волны по осям  $X$  и  $Y$ , которые, отражаясь от границы «бетон — воздух», практически полностью компенсируют друг друга. В области шпалы между резиновыми прокладками по оси  $Y$  также происходит компенсация продольных и поперечных волн, которые генерируются колебаниями вагона в плоскости  $X-Z$ . Эти волны в плоскости  $Y-Z$  также компенсируются практически полностью благодаря отражению от торца шпалы. Таким образом, волновой процесс распространения деформаций и смещений можно считать одномерным и происходящим в основном вдоль оси  $Z$ .

Вторичные вибрационные, продольные и сдвиговые волны, которые генерируются в сыпучих материалах, представляют собой шум в частотном диапазоне от 4 до 150 Гц [14, 16]. Но амплитуда вторичных вибрационных волн меньше амплитуды основных волн, возникающих при наезде на шпалы колес проходящих вагонов.

В рамках одномерной задачи можно получить точное решение в виде суперпозиции аналитических функций, что удобно для анализа и разработки методических рекомендаций выбора оптимальной конструкции пути для конкретного грунта. В волновой одномерной задаче (рис. 3) рассмотрим составной резонатор: «рельс — резиновая накладка — шпала — слой щебня — песчаная подушка — глинистый грунт», позволяющий учесть отражение волны от границ разде-

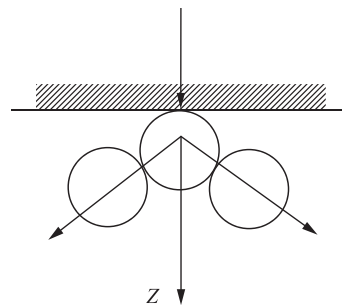


Рис. 1. Схематическое изображение эффекта «расширения» площадки приложения тензора напряжений для гексагональной упаковки

Fig. 1. Schematic representation of the "expansion" effect of the stress tensor application area for hexagonal packing

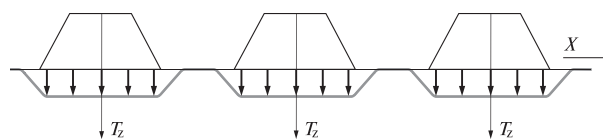


Рис. 2. Вид волны деформации, исходящей от шпалы.  $T_z$  — напряжение, действующее вглубь грунта по направлению к оси  $Z$

Fig. 2. The form of the deformation wave coming from the sleeper.  $T_z$  — the stress acting deep into the ground in the direction of the  $Z$  axis

ла и диссипацию энергии в различных слоях. Предполагается также, что толщина слоев составного резонатора значительно меньше поперечных размеров и все точки в некоторой плоскости, параллельной плоскости подошвы рельса, движутся с одинаковыми амплитудами и в одной и той же фазе. Исходя из принципа суперпозиции волн суммарная волна деформации, распространяющаяся в среде, равна сумме волн деформации всех волн системы.

При воздействии сильных продольных волн на сыпучий материал из-за трения частиц друг о друга генерируется широкополосный спектр вторичных гармоник [16, 17, 18] за счет энергии основной волны, что приводит к увеличению коэффициента поглощения и уменьшению амплитуды основной деформационной волны. На рис. 4 изображены результаты экспериментов, проведенных В. А. Куликовым (ИГФ СО РАН) по измерению показателей поглощения сильных продольных волн в разных материалах. Автором наблюдалась существенная нелинейность поведения продольных волн: расплывание и амплитудно-зависимое затухание, пропорциональное первой степени частоты. Как отмечено в работе [16], это и есть переходный процесс от одного закона взаимодействия частиц (модифицированного закона Герца), характеризующегося малыми деформациями и «сухим» трением, к другому закону, который характеризуется сверхмалыми деформациями на уровне атомного размера и большей скоростью распространения. А это приводит к дополнительному перекачиванию энергии в область сверхнизких частот, пропорциональному первой степени

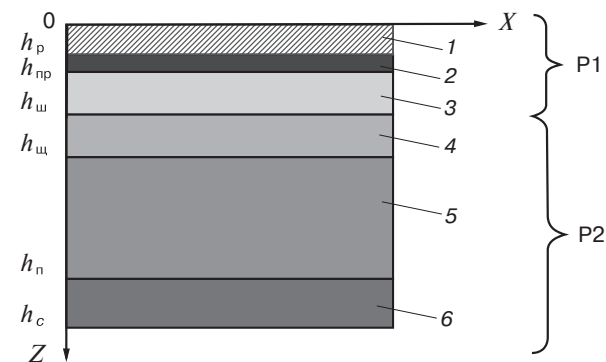


Рис. 3. Схематическое изображение слоистой системы:  
1 — рельс; 2 — подкладка; 3 — шпала; 4 — щебень; 5 — песчаная подушка; 6 — суглинок; P1, P2 — резонаторы  
Fig. 3. Schematic representation of a layered system:  
1 — rail; 2 — pad; 3 — sleeper; 4 — crushed ballast; 5 — sand cushion;  
6 — loam; P1, P2 — resonators

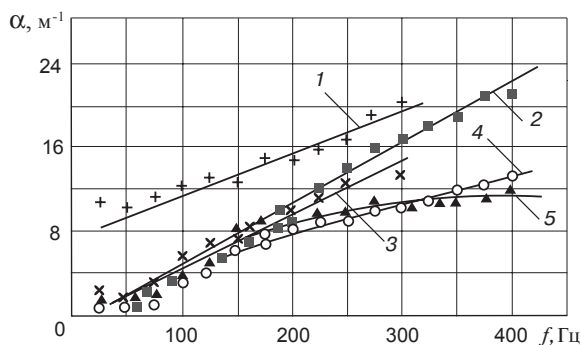


Рис. 4. Показатели поглощения  $\alpha_i$  продольных волн в различных материалах: 1 — стружечно-плиточная смесь; 2 — влажный песок; 3 — рыхлый сухой грунт; 4 — мелкий щебень; 5 — крупный щебень [15]  
Fig. 4. Absorption coefficients  $\alpha_i$  of longitudinal waves in various materials: 1 — chip-slab mix; 2 — wet sand; 3 — loose dry soil; 4 — fine crushed stone; 5 — large crushed stone [15]

частоты, и существенной нелинейности распространения высокочастотных гармоник. И, следовательно, по нашему мнению, к возможным автоколебаниям слоистой среды.

Коэффициенты поглощения продольных вибрационных волн в Своде правил по проектированию и строительству [15] определяли в трехоктавных диапазонах со среднегеометрическими частотами 16, 31,5, 63 Гц. Поэтому их величины ближе к поставленной задаче, чем показатели поглощения  $\alpha_i$  в работе [16], найденные при микровзрывах, т. е. когда исходный импульс имеет длительность десятки микросекунд, а измеренные  $\alpha_i$  относятся к вторичным волнам, продольным и поперечным, возникающим при внутреннем трении в материале, рассеянии на неоднородностях и интерференции. Экспериментальные данные из [16] тем не менее свидетельствуют о том, что гармоники с частотой более 100 Гц поглощаются в слое крупного щебня из-за инерционности его гранул (кривая 5, рис. 4).

**Модельные уравнения.** В сформулированных выше приближениях для гармонических колебаний с угло-

вой скоростью  $\omega$  уравнение распространения плоских продольных вибрационных волн в слоях из металла и бетона, а также плотно упакованного щебня и сухого песка при наиболее плотной гексагональной упаковке, будет иметь вид [19]

$$\begin{aligned} E_i \frac{d^2 u_{zi}}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_{zi}}{\partial \tau^2} &= 0; \\ v_{zi} &= \sqrt{\frac{3K_i + 4G_i}{3\rho_i}} = \sqrt{\frac{E_i(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_i}}; \\ G_i \frac{d^2 u_{yi}}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_{yi}}{\partial \tau^2} &= 0; \\ G_i \frac{d^2 u_{xi}}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_{xi}}{\partial \tau^2} &= 0; \quad v_{x,yi} = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u_i$  — функция упругого смещения;  $K_i$ ,  $\rho_i$  — модуль всестороннего сжатия среды  $i$ -го слоя и ее плотность;  $E_i$  — модуль Юнга среды;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $G_i$  — модуль сдвига среды  $i$ -го слоя;  $z$  — координата, нормальная поверхности подошвы шпалы;  $x$  — координата, совпадающая с направлением движения;  $y$  — координата, перпендикулярная координате  $x$ ;  $\tau$  — время;  $v_i$  — фазовая скорость волны смещения в  $i$ -ом слое.

Для пористых материалов (песок, щебень, глина) расчет волновых характеристик проводят по (1), но вместо  $\rho_i$  в уравнении (1) подставляют величину [20]

$$\rho_i^* = \rho_i(1 - \beta), \quad (2)$$

где  $\beta$  — пористость материала.

Волны по осям  $X$  и  $Y$  отражаются от границ раздела в горизонтальных плоскостях и рассеиваются, поэтому их сумма практически равна 0. В соответствии с вышесказанным система уравнений (1) вырождается в

$$E_i \frac{d^2 u_i}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial \tau^2} = 0; \quad v_i = \sqrt{\frac{E_i(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_i}}. \quad (3)$$

В соответствии с общей теорией упруговязких материалов под действием напряжения, зависящего от времени, для слоев резиновой подкладки, щебня, песка и суглинка уравнения плоских продольных волн имеют вид [19, 21]

$$\begin{aligned} E_i^* \frac{d^2 U_i}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial \tau^2} &= 0; \quad v_i = \sqrt{\frac{E_i^*}{\rho_i}}; \quad Z_i = \rho_i v_i; \\ E_i^* &= E_i' + E_i''; \quad |E_i^*| = \sqrt{E_i'^2 + E_i''^2}; \quad E_i'' = \omega \eta_{ct}; \\ \operatorname{tg} \delta_i &= \frac{E_i''}{E_i'}; \quad E_i^* = |E_i^*|(\cos \delta_i + j \sin \delta_i) = |E_i^*| e^{-j \delta_i}. \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнении (4):  $E_i^*$  — комплексный модуль упругости упруговязкого  $i$ -го слоя;  $U_i$  — функция упруговязкого смещения с диссипацией энергии в резиновой прокладке и слоях щебня, песка и суглинка;  $Z_i$  — импеданс среды;  $E_i'$  — модуль объемной упругости;  $E_i''$  — мо-



доль потерь;  $\omega$  — частота гармонического напряжения;  $\eta_{\text{ст}}$  — структурная вязкость среды;  $\delta_i$  — угол сдвига фаз между напряжением и скоростью деформации.

Для чисто упругого материала  $\delta_i = 0$ ,  $|E_i^*| = E_i'$ , для сред со свойствами ньютоновской жидкости  $\delta_i = \pi/2$ ,  $|E_i^*| = \omega\eta_{\text{ст}}$ . Решения уравнений (1) и (4) с учетом отражения от границ имеют вид [19, 20, 21, 22]

$$u_i = \text{Re}(A_i e^{j(\omega\tau - k_i z)} + B_i e^{j(\omega\tau + k_i z)}) = A_i^0 e^{-\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau - k_i z) + B_i^0 e^{\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau + k_i z); \quad (5)$$

$$U_i = \text{Re}(C_i e^{j(\omega\tau - \Gamma_i z)} + D_i e^{j(\omega\tau + \Gamma_i z)}) = C_i^0 e^{-\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau - k_i z + \delta_i) + D_i^0 e^{\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau + k_i z + \delta_i), \quad (6)$$

где  $k_i = \omega/v_i$  — волновое число;  $A_i, C_i, B_i, D_i$  — комплексные коэффициенты падающей и отраженной от границы волны соответственно;  $\eta_i$  — коэффициент поглощения амплитуды в  $i$ -ом слое, безразмерная величина;  $\Gamma_i$  — постоянная распространения в  $i$ -ом слое, определяется из уравнения [21]

$$\Gamma_i = j\omega \frac{1}{v_i} = j\omega \sqrt{\frac{\rho_i}{E_i^*}} = j\omega \sqrt{\frac{\rho_i}{|E_i^*|}} e^{j\frac{\delta_i}{2}} = \alpha_i + j\gamma_i = \frac{\omega}{v_i} (tg \frac{\delta_i}{2} + j); \quad \alpha_i = \gamma_i tg \frac{\delta_i}{2}; \quad \gamma_i = \frac{\omega}{v_i}; \quad \alpha_i = \frac{\omega\eta_i}{v_i}. \quad (7)$$

В выражениях (7)  $\delta_i$  — угол потерь в материале  $i$ -го слоя;  $\gamma_i$  — модуль вязкоупругости или комплексное волновое число среды;  $\alpha_i$  — показатель поглощения или затухания амплитуды волны частотой  $\omega$  [22].

**Выводы.** 1. При анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути земляное полотно представляют как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами. Но эта модель принципиально неприменима для слоистых систем. Кроме того, для возникновения колебаний в суглинке необходимо, чтобы под ним находилась среда, отражающая вертикальную продольную волну. Иначе обратная полуволна не сформируется, а компрессионная волна уйдет вглубь и превратится в итоге в тепло.

2. За счет отражения на границе раздела слоистой системы в каждом слое амплитуда и поглощение энергии гармонических колебаний будут свои, отличные от начальной амплитуды смещения рельсов. То есть подобные задачи можно решать только с использованием теории волновых процессов.

3. Ввиду отражения деформационных волн от внешних поверхностей шпалы (торцов, боковых поверхностей) и их компенсации задача моделирования сводится к одномерной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коншин Г. Г. Вибрационный метод диагностики насыпей // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 10. С. 22–25.

2. Бельков В. М., Антипов Б. В. Физико-химические основы устойчивости пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 12. С. 21–24.

3. Рыбкина О. В. Об устойчивости движения границ раздела двух вязкопластических жидкостей // Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва: тезисы докладов Всероссийской конф., 17–22 сентября 2007 г. Новосибирск, 2007. С. 54–57.

4. Иванцов А. О. Численное исследование осредненных эффектов воздействия высокочастотных поступательных вибраций на неоднородные гидродинамические системы: автореф. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Пермь, 2009. 25 с.

5. Бельков В. М., Шатов А. А. Математическая модель капиллярной пропитки пористых сред вязкопластическими жидкостями // Коллоидный журнал. 1992. Т. 54. № 3. С. 16–20.

6. Belkov V. M. Meniscus Shape of Visco-Plastics Liquid in Capillaries // Proceedings of Conf. Wetting and Self-Organization in Thin Liquid Film, 18–21 Sept., 1995, Konstans, Germany.

7. Бельков В. М. Динамика пропитки пористых сред при перепаде давления // Журнал физической химии. 1996. Т. 70. № 3. С. 549–554.

8. Бельков В. М., Теплякова Е. А. Динамика миграции нефтепродуктов во влажных почвогрунтах // Проблемы железнодорожного транспорта, задачи и пути их решения: сб. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2012. С. 207–215.

9. Дыдышко П. И., Шарапов С. Н. Защитные слои под рельсового основания // Вестник ВНИИЖТ. 1998. № 4. С. 23–27.

10. ЦПИ-36. Руководство по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтов земляного полотна: утв. Департаментом пути и сооружений 30.01.2004.

11. Трофимович В. В. Динамика электроподвижного состава: методические указания. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. 39 с.

12. Рубан В. Г., Матва А. М. Решение задач динамики железнодорожных экипажей в пакете Mathcad: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2009. 99 с.

13. Бельков В. М. Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 6. С. 334–338.

14. Комкин А. И. Вибрация, воздействие, нормирование, защита // Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности». 2004. № 5. С. 1–41.

15. 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.

16. Куликов В. А., Сибиряков Е. Е. Распространение сильных волн в неоднородных сыпучих средах // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. Новосибирск: ИГИЛ СО РАН, 2003. Вып. 121. С. 103–110.

17. Назаров В. Е., Радостин А. В. Амплитудная модуляция звука звуком // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 5. С. 596–599.

18. Сибиряков Е. Б. Зависимость между коэффициентом Пуассона и микроструктурой микрон неоднородной среды // Физическая мезомеханика. 2004. Вып. 7. № 1. С. 63–67.

19. Мэзон У. Распространение упругих волн в жидкостях и твердых средах. Физическая акустика. М.: Мир, 1966. Ч. 1А. 589 с.

20. Соловьянинов И. П., Шабурин С. Н. Теория волновых процессов. Акустические волны: учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. 308 с.

21. Филиппов В. Релаксация в растворах полимеров, полимерных жидкостях и гелях // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1969. Ч. 2Б. С. 9–109.

22. Литовиц Т., Девис К. Свойства газов, жидкостей и растворов // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1968. Ч. 2А. С. 298–370.

## 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 1

V. M. BEL'KOV

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

**Abstract.** The present article is devoted to the formulation of the problem and the development of a model for the vibration damping properties of the roadbed at the base of the ballast prism's bottom of normalized thickness, a protective sand cushion and clayey soils under the influence of harmonic oscillations based on physical and chemical mechanics. When analyzing the interaction between the car and the railway, typically the Kelvin—Voigt body is used and the roadbed is represented as a certain adjusted concentrated mass participating in vibrations with sleepers and rails. But this model is inapplicable for layered systems that do not have, in principle, concentrated masses. Such problems can only be solved using the theory of wave processes. In addition, for the occurrence of oscillations in loam it is necessary to have a medium under it reflecting the vertical longitudinal wave. Otherwise, the reverse half-wave will not form, and the compression wave will go deeper and turn into heat in the end. Due to the reflection at the interface of the layered system in each layer, the amplitude and absorption of the energy of the harmonic oscillations will be different from the initial displacement amplitude of the rails. That is, such problems can be solved only using the theory of wave processes. In view of the reflection of deformation waves from the outer surfaces of the sleepers (faces, side surfaces) and their compensation, the task of modeling becomes a one-dimensional.

**Keywords:** vibration damping; roadbed; elastic-viscoplastic properties; harmonic analyses; vertical oscillating waves

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>

### REFERENCES

1. Konshin G.G. *Vibratsionnyy metod diagnostiki nasypye* [Vibration method of diagnosing embankments]. Put' i putevoe khozyaystvo [Railway Track and Facilities], 2007, no. 10, pp. 22–25.
2. Bel'kov V.M., Antipov B.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy ustoychivosti puti* [Physicochemical basis of the track stability]. Put' i putevoe khozyaystvo [Railway Track and Facilities], 2013, no. 12, pp. 21–24.
3. Rybkina O.V. *Ob ustoychivosti dvizheniya granits razdela dvukh vyazkoplasticheskikh zhidkostey* [On the stability of the motion of interfaces between two viscoplastic fluids]. Tezisy dokladov Vserossiyskoy konferentsii "Problemy mekhaniki sploshnykh sred i fiziki vzryva", 17–22 sentyabrya 2007 g. [Abstracts of the All-Russian Conference Problems of Continuum Mechanics and Explosion Physics, September 17–22, 2007]. Novosibirsk, 2007, pp. 54–57.
4. Ivantsov A.O. *Chislennoe issledovanie osrednennykh effektov vozdeystviya vysokochastotnykh postupatel'nykh vibratsiy na neodnorodnye gidrodinamicheskie sistemy*. Kand. fiz.-mat. nauk diss. avtoref. [Numerical investigation of averaged effects of high-frequency translational vibrations on heterogeneous hydrodynamic systems. Cand. phys.-math. sci. diss. synopsis]. Perm', 2009, 25 p.
5. Bel'kov V.M., Shatov A.A. *Matematicheskaya model' kapillyarnoy propitki poristyykh sred vyazkoplasticheskimi zhidkostyami* [A mathematical model of the capillary impregnation of porous media by viscoplastic fluids]. Kolloidnyy zhurnal [Colloid Journal], 1992, Vol. 54, no. 3, pp. 16–20.
6. Belkov V.M. *Meniscus Shape of Visco-Plastics Liquid in Capillaries*. Proceedings of Conf. Wetting and Self-Organization in Thin Liquid Film, 18–21 Sept., 1995, Konstanz, Germany.
7. Bel'kov V.M. *Dinamika propitki poristyykh sred pri perepade davleniya* [Dynamics of impregnation of porous media at a pressure drop]. Zhurnal fizicheskoy khimii [Journal of Physical Chemistry], 1996, Vol. 70, no. 3, pp. 549–554.
8. Bel'kov V.M., Teplyakova E.A. *Dinamika migratsii nefteproduktov vo vlazhnykh pochvogruntakh* [Dynamics of migration of petroleum products in moist soils]. Problemy zhelezнодорожного transporta, zadachi i puti ikh resheniya. Sb. tr. OAO "VNIIZhT"
9. Dydyshko P.I., Sharapov S.N. *Zashchitnye sloi podrel'sovogo osnovaniya* [Protective layers of the under-rail base]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1998, no. 4, pp. 23–27.
10. TsPI-36. *Guidelines for the determination of physical and mechanical characteristics of ballast materials and soils of the roadbed*. Approved by the Department of roads and structures on 30.01.2004 (in Russ.).
11. Trofimovich V.V. *Dinamika elektropodvizhnogo sostava: metodicheskie ukazaniya* [Dynamics of an electric rolling stock: methodical instructions]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2007, 39 p.
12. Ruban V.G., Matva A.M. *Reshenie zadach dinamiki zhelezнодорожных ekipazhey v pakete Mathcad: ucheb.posobie* [Solving the problems of the dynamics of the railway crews in the Mathcad package: a training manual]. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2009, 99 p.
13. Bel'kov V.M. *Modelirovanie uprugovyazkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modeling of elasto-viscoplastic properties of a roadbed. Statement of the problem 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 6, pp. 334–338.
14. Komkin A.I. *Vibratsiya, vozdeystvie, normirovanie, zashchita* [Vibration, impact, rationing, protection]. Prilozhenie k zhurnalu "Bezopasnost' zhznedeyatel'nosti" [Supplement to the journal "Life safety"], 2004, no. 5, pp. 1–41.
15. SP 23–105–2004. *Assessment of vibration in the design, construction and operation of metro facilities. Code of rules for design and construction*. Approved by the Gosstroy of Russia no. 20 on 09.03.2004 (in Russ.).
16. Kulikov V.A., Sibiriyakov E.E. *Rasprostraneniye sil'nykh voln v neodnorodnykh sypuchikh sredakh* [Propagation of strong waves in inhomogeneous granular media]. Dinamika sploshnoy sredy. Akustika neodnorodnykh sred [Dynamics of a continuous medium. Acoustics of inhomogeneous media]. Novosibirsk, IGIL SO RAN Publ., 2003, no. 121, pp. 103–110.
17. Nazarov V.E., Radostin A.V. *Amplitudnaya modulyatsiya zvuka zvukom* [Amplitude sound modulation by sound]. Akusticheskyy zhurnal, 2011, Vol. 57, no. 5, pp. 596–599.
18. Sibiriyakov E.B. *Zavisimost' mezhdru koeffitsientom Puassona i mikrostrukturoy mikroneodnorodnoy sredy* [The relationship between the Poisson's ratio and the microstructure of a microinhomogeneous medium]. Fizicheskaya mezomekhanika [Physical me-mechanics], 2004, Vol. 7, no. 1, pp. 63–67.
19. Mezon U. *Propagation of elastic waves in liquids and in solid media*. Physical acoustics. Moscow, Mir Publ., 1966, Vol. 1A, 589 p.
20. Solov'yaninov I.P., Shaburin S.N. *Theory of wave processes. Acoustic waves*. Textbook. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU–UPI Publ., 2004, 308 p.
21. Mezon U., Filippov V. *Relaxation in solutions of polymers, polymer liquids and gels*. Physical acoustics. Moscow, Mir Publ., 1969, Vol. 2B, pp. 9–109.
22. Mezon U., Litovits T., Devis K. *Properties of gases, liquids and solutions*. Physical acoustics. Moscow, Mir Publ., 1968, Vol. 2A, pp. 298–370.

### 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