

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ПРИ ДЕЙСТВИИ АСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ

Королев В.В.

Российский университет транспорта, Москва

Ключевые слова: стрелочный перевод, асимметричная нагрузка, динамическое поведение, упругопластический контакт, волновые процессы, рельс, плитное основание, взаимодействие колеса и рельса.

Аннотация. В статье рассматривается динамическое поведение элементов стрелочного перевода при воздействии асимметричной нагрузки. Исследовано влияние неравномерного распределения нагрузки на динамические характеристики рельса и плитного основания. В работе использован комплексный подход, включающий: математическое моделирование рельса, анализ распространения волн в рельсе, моделирование взаимодействия колеса и рельса, моделирование плитного основания. Предложена математическая модель динамического взаимодействия колеса и рельса, учитывающая упругопластические свойства материалов и волновые процессы. Для моделирования рельса использованы определяющие соотношения для криволинейных стержней. Плитное основание представлено как плоский вязкоупругий элемент в трехмерном пространстве. Описан численный метод решения интегро-дифференциального уравнения динамического контакта. Полученные результаты могут быть использованы для оценки работоспособности и долговечности стрелочных переводов.

DYNAMIC BEHAVIOR OF THE SWITCH ELEMENTS UNDER THE ACTION OF AN ASYMMETRIC LOAD

Korolev V.V.

Russian University of Transport, Moscow

Keywords: switchboard, asymmetric load, dynamic behavior, elastic-plastic contact, wave processes, rail, plate base, wheel-rail interaction.

Abstract. The article examines the dynamic behavior of turnout elements under the influence of asymmetric loading. The effect of uneven load distribution on the dynamic characteristics of the rail and slab foundation is investigated. A comprehensive approach is used in the work, including: mathematical modeling of the rail, analysis of wave propagation in the rail, modeling of wheel-rail interaction, and modeling of the slab foundation. A mathematical model of the dynamic interaction between the wheel and the rail is proposed, taking into account the elastoplastic properties of materials and wave processes. Defining relations for curved rods are used for rail modeling. The slab foundation is represented as a flat viscoelastic element in three-dimensional space. A numerical method for solving the integro-differential equation of dynamic contact is described. The results obtained can be used to assess the performance and durability of turnouts.

Введение. Стрелочные переводы являются важными элементами железнодорожного пути, обеспечивая передачу нагрузок и перемещений между путями (рис. 1). Исследования показывают, что асимметричная нагрузка может привести к неоднородным деформациям и напряжениям в стрелочных переводах, что существенно влияет на их работоспособность и безопасность [1, 2].

Динамическое поведение элементов стрелочного перевода при действии асимметричной нагрузки напрямую зависит от того, как именно эта нагрузка воздействует на весь стрелочный перевод [3, 4]. Одним из ключевых аспектов здесь является влияние асимметричной нагрузки на динамику стрелочного перевода. Под динамикой в данном контексте понимается изменение положения, скорости и ускорения элементов стрелочного перевода в ответ на внешние воздействия.

Асимметричная нагрузка, представленная, например неравномерным распределением веса или давления, может привести к неравномерному распределению нагрузки по элементам стрелочного перевода [5, 6].



Рис. 1. Общий вид обыкновенного стрелочного перевода

Влияние асимметричной нагрузки на динамику стрелочного перевода может проявиться в изменении угловых скоростей элементов, в возникновении дополнительных колебаний или в искажении траектории движения. Это может повлиять на бесперебойность работы стрелочного перевода и на его долговечность [7, 8].

Для анализа влияния асимметричной нагрузки на динамику стрелочного перевода часто используются математические модели и компьютерное моделирование. Путем изменения параметров нагрузки и изучения реакции системы можно оценить воздействие асимметричной нагрузки на динамику стрелочного перевода [9].

Фактически, задачи о поперечном внешнем динамическом воздействии на стрелочный перевод со стороны проходящего по первому или второму пути экипажа можно представить как совокупность воздействий на отдельные плоские или балочные элементы, в постановках типа задач Тимошенко, Филиппова и Голдсмита, при чем, как в теоретическом, так и экспериментальном представлении. В этих работах рассматривались динамические воздействия с учетом стационарных и нестационарных процессов. Но появление новых конструкционных материалов и возрастающие потребности инженерной практики в транспортном строительстве заставляют исследователей совершенствовать модели динамического воздействия, поведения тел при деформировании, методы расчета и учитывать различные реологические свойства контактирующих тел (на которые и через которые передается внешняя нагрузка, т.е. фактически, колесная пара и рельс, закрепленный с учетом особенностей конструкции рельсошпальной решетки или плитного основания). Упругопластический характер местных деформаций впервые был рассмотрен в работах Н.А. Кильчевского, данное направление получило развитие в работах А.А. Бирюкова, Б.Б. Кадомцева и А.А. Локтева. Были проведены расчеты с учётом растяжения срединной линии балки (рельса) в работе, вязкоупругих свойств колесной пары, через которую передается внешняя динамическая нагрузка, в целом вязкоупругой модели взаимодействия, анизотропных свойств мишени (в данном случае такая модель может быть обобщена на верхнее строение железнодорожного пути) и предварительного напряжения. Но, несмотря на существенные достижения в задачах теории динамического воздействия, такие вопросы, как влияние неупругих свойств колеса и рельса в месте взаимодействия на динамические характеристики контакта с учетом волновых процессов, растяжения-сжатия срединной линии рельса и инерции контактной области, являются не до конца изученными [10, 11].

Материалы и методы исследований. В настоящей работе предпринята попытка расширить представление о деформировании плитного основания стрелочного перевода при динамическом воздействии колесной пары с учетом упругопластических свойств материалов, волновых процессов в рельсе и инерцию контактной области.

Первым элементом, на который воздействует нагрузка подвижного состава, является рельс. Для моделирования динамического поведения рельса под действием колесной пары предлагается использовать определяющие соотношения для криволинейных стержней нетонкостенного поперечного сечения, которые могут иметь различное удлинение и условия закрепления, в зависимости от используемых промежуточных скреплений, подуклонки и разуклонки в прямых и стрелочных кривых [12, 13]. Динамическое поведение рельса с учётом растяжения срединной плоскости описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{du}{ds} = (\varphi \times \tau) + \frac{N \cdot \tau}{EF} \tau; \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = A \cdot M + B \cdot N; \quad (2)$$

$$\frac{dM}{ds} = (N \times \tau) + C \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - (N^0 \times (\varphi \times \tau)); \quad (3)$$

$$\frac{dN}{ds} = \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + f \frac{du}{dt} - q \sin(\Omega t); \quad (4)$$

$$\frac{dN^0}{ds} = -q^0, \quad (5)$$

где приняты следующие обозначения: t – время; s – продольная координата, отсчитываемая вдоль рельса; u – вектор линейного смещения оси стержня; φ – вектор углового смещения сечения; M и N – векторы моментов и сил в выбранном сечении; τ – орт, касательный к оси криволинейного стержня; A и B – матрицы податливостей в ортогональном базисе n и b (нормаль и бинормаль, относительно орта τ в естественном трехграннике); C – матрица приведенных к длине массовых моментов инерции; ρ – плотность материала рельса; f – коэффициент вязкого трения; q – вектор распределенной нагрузки, приведенной к продольной оси; N^0 и q^0 – векторы силы и распределенной нагрузки, предварительно действующих на стержень; Ω – циклическая частота внешних вынуждающих воздействий.

При этом считается, что в базисе естественного трехгранника и ортов τ , n и b матрицы A и C являются диагональными, причем значения их компонент определяются следующими соотношениями:

$$a_{11} = \frac{1}{GJ_{kp}}; a_{22} = \frac{1}{EJ_n}; a_{33} = \frac{1}{EJ_b}; \quad (6)$$

$$c_{11} = \rho \cdot (J_n + J_b); c_{22} = \rho J_n; c_{33} = \rho J_b; \quad (7)$$

где G – модуль сдвига, J_{kp} – момент инерции при кручении, J_n , J_b – моменты инерции относительно осей коллинеарных нормали и бинормали естественного трехгранника.

Предполагается, что в результате динамического воздействия на рельс в нем распространяются продольные и изгибные волны, фронты которых являются плоскими поверхностями сильного разрыва, расширяющимися с нормальными скоростями $G^{(\alpha)}$.

За волновым фронтом некоторая искомая функция Z может быть представлена в виде ряда:

$$Z(z, t) = \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} [Z_{, (k)}] \left(t - \frac{z}{G^{(\alpha)}} \right)^k H \left(t - \frac{z}{G^{(\alpha)}} \right), \quad (8)$$

где $[Z_{, (k)}] = Z_{, (k)}^+ - Z_{, (k)}^- = \left[\frac{\partial^k Z}{\partial t^k} \right]$ – скачки k -го порядка по времени t от функции Z на волновой

поверхности Σ , т.е. при $t = \frac{z}{G^{(\alpha)}}$; z – продольная координата; индексы «+» и «-» означают,

что величина вычисляется, соответственно, непосредственно перед и за волновым фронтом; индекс α обозначает порядковый номер волны ($\alpha = 1$ для квазипродольной волны (волны

растяжения-сжатия), $\alpha = 2$ для квазипоперечной волны (изгибная волна)); $H(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Для перехода от производной по координате к производной по времени необходимо использовать условие совместности на волновой поверхности Σ , которое для рельса имеет вид:

$$G \left[\frac{dZ_{,(k)}}{dz} \right] = -[Z_{,(k+1)}] + \frac{\delta[Z_{,(k)}]}{\delta t}, \quad (9)$$

где $\frac{\delta}{\delta t}$ – полная производная по времени от функции на движущейся поверхности Σ .

Дифференцируя уравнения движения (1)-(5) k раз по времени, переходя от неизвестных величин к их скачкам и используя условие совместности (9), получим систему рекуррентных дифференциальных уравнений для определения скоростей волн и скачков неизвестных величин.

Учитывая только нулевой член лучевого ряда (8), что допускается из-за малого времени динамического контакта колеса и рельса в заданной точке, из уравнений (1)-(5) можно определить скорости продольной и изгибной волн и динамические условия совместности:

$$G^{(1)} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, G^{(1)} = \sqrt{\frac{K\mu}{\rho}}, \quad (10)$$

$$Q = -\rho F G^{(2)} W, N = -\rho F G^{(1)} v, \quad (11)$$

а также соотношение, которое связывает нормальный прогиб с его же скоростью и скоростью упругой волны второго порядка (скорость изгибной волны):

$$\frac{dw}{dz} = -\frac{W}{G^{(2)}}. \quad (12)$$

Колесо моделируется цилиндром массой m , оказывает динамическое воздействие на рельс с нормальной компонентой скорости v_0 . Динамическое воздействие начинается в момент времени $t = 0$ (рис. 2).

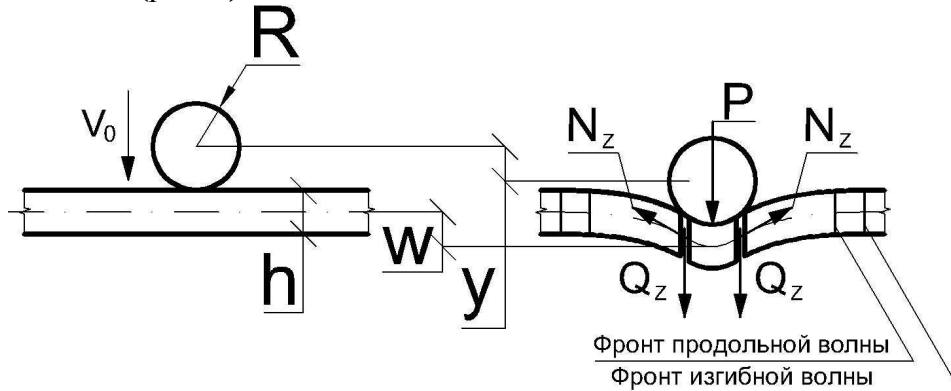


Рис. 2. Схема динамического взаимодействия колеса и рельса

Движение колеса после начала динамического воздействия на рельс в заданной точке с учётом инерции пятна контакта описывается уравнением:

$$m\ddot{y} = m(\ddot{\delta} + \dot{W}) = \begin{cases} -P(t) - \rho h \pi \alpha^2 W, \frac{dP}{dt} \geq 0, \\ -P(t) - \rho h \pi \alpha_{\max}^2 W, \frac{dP}{dt} < 0, \end{cases} \quad (13)$$

где $P(t)$ – контактная сила; $\delta(t)$ – смятие материала в зоне контакта; $a(t)$ – радиус области контакта ω ; h – высота сечения рельса.

$$P(t) = \iint_{\omega} q(x, y, t) dx dy, \quad (14)$$

где $q(x, y, t)$ – давление в области контакта ω .

Для упругопластического контакта на каждом этапе взаимодействия (упругое деформирование, упругопластическое деформирование и упругая разгрузка) записывается отдельное интегро-дифференциальное уравнение с учётом начальных условий, полученных при решении уравнения, соответствующего предыдущему этапу взаимодействия [14, 15].

Получившееся уравнение решаем численно методом разложения искомой величины в степенной ряд:

$$\delta(t_{i+1}) = \delta(t_i) + H\dot{\delta}(t_i) + \frac{H^2}{2}\ddot{\delta}(t_i), \quad (15)$$

$$\dot{\delta}(t_{i+1}) = \dot{\delta}(t_i) + H\ddot{\delta}(t_i), \quad (16)$$

где $H = t_{i+1} - t_i$ – шаг по времени. Здесь $\ddot{\delta}(t_i)$ находится из функционального уравнения на каждом шаге. Интегралы в функциональном уравнении типа (14) можно преобразовать с помощью метода трапеций.

Далее динамическое воздействие передается от нижней грани подошвы рельса на плоский элемент плитного основания конструкции стрелочного перевода. Плитное основание предлагается рассматривать как плоский элемент в трехмерном пространстве, т.е. плоский элемент будем считать трехмерной вязкоупругой средой той же структуры из аналогичного материала и той же геометрии при условии геометрической и физической линейности в зависимости напряжений от деформаций [16, 17]. Будем считать, что слоистая среда сверху и снизу ограничена поверхностями $z = F_1(x, y)$ и $z = F_2(x, y)$ соответственно, при этом среда не ограничена в плоскости, границы раздела неоднородности являются плоскими и находятся в тех или иных условиях контактного взаимодействия (рис. 3).

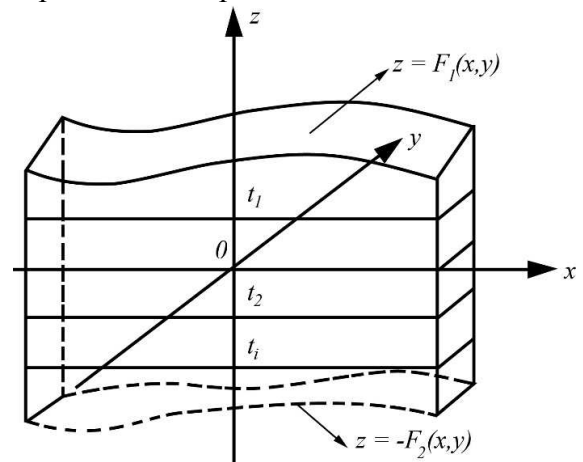


Рис. 3. Фрагмент плоского элемента основания стрелочного перевода

Параметры слоев будем обозначать индексом « l », где l пробегает значения по количеству слоев.

Предполагая кусочно-однородную пластинку слоистой трехмерной средой, зависимости напряжений $\sigma_{ij}^{(l)}$ от деформаций $\epsilon_{ij}^{(l)}$ в точках слоев принимаем в виде:

$$\sigma_{ij}^{(l)} = L_l(\epsilon_{ij}^{(l)}) + 2M_l(\epsilon_{ij}^{(l)}); \sigma_{ij}^{(l)} = M_l(\epsilon_{ij}^{(l)}), \quad (i \neq j; i, j = x, y, z), \quad (17)$$

где операторы L_l и M_l типа:

$$L_l(\varsigma) = \lambda_l \left[\varsigma(t) - \int_0^t f_{1l}(t - \xi) \varsigma(\xi) d\xi \right]; \quad M_l(\varsigma) = \mu_l \left[\varsigma(t) - \int_0^t f_{2l}(t - \xi) \varsigma(\xi) d\xi \right], \quad (18)$$

$f_{kl}(t)$ – ядра вязкоупругих операторов, которые связаны с балластным или безбалластным основанием (с учетом неоднородности подбивки подрельсового основания); λ_l, μ_l – упругие постоянные.

С введением потенциалов $\Phi^{(l)}$ и $\bar{\Psi}^{(l)}$ продольных и поперечных волн:

$$\bar{U}^l = \text{grad} \Phi^{(l)} + \text{rot} \bar{\Psi}^{(l)}, \quad (19)$$

при этом векторный потенциал $\bar{\Psi}^{(l)}$ удовлетворяет условию соленоидальности:

$$\text{div} \bar{\Psi}^{(l)} = 0, \quad (20)$$

уравнения движения материала слоев принимают вид:

$$N_l(\Delta \Phi^{(l)}) = \rho_1 \frac{\partial^2 \Phi^{(l)}}{\partial t^2}; \quad N_l = L_l + 2M_l; \quad M_l(\Delta \bar{\Psi}^{(l)}) = \rho_1 \frac{\partial^2 \bar{\Psi}^{(l)}}{\partial t^2}, \quad (21)$$

При формулировке граничных условий будем предполагать, что плоскости раздела неоднородности или слоев находятся в жестком контакте, а верхняя и нижняя поверхности слабо изогнуты.

Граничные условия на верхней поверхности имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}^{(l)} - 2(F'_{lx}\sigma_{xz}^{(l)} + F'_{ly}\sigma_{yz}^{(l)}) &= f_z^{(l)}(x, y, z); \\ F'_{1x}(\sigma_{zz}^{(l)} - \sigma_{xx}^{(l)}) - F'_{1y}\sigma_{xy}^{(l)} + \sigma_{xz}^{(l)} &= f_{xz}^{(l)}(x, y, t); \\ F'_{1y}(\sigma_{zz}^{(l)} - \sigma_{yy}^{(l)}) - F'_{1x}\sigma_{xy}^{(l)} + \sigma_{yz}^{(l)} &= f_{yz}^{(l)}(x, y, t);\end{aligned}\quad (22)$$

на поверхностях слоев (внутренних):

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}^{(l)} &= \sigma_{zz}^{(l+1)}; \sigma_{xz}^{(l)} = \sigma_{xz}^{(l+1)}; \sigma_{yz}^{(l)} = \sigma_{yz}^{(l+1)}; \\ u^{(l)} &= u^{(l+1)}; v^{(l)} = v^{(l+1)}; w^{(l)} = w^{(l+1)}; \\ (l &= 1, 2, \dots, n_{0-1}), (z = h_l),\end{aligned}\quad (23)$$

на нижней поверхности:

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}^{(n_0)} - 2(F'_{2x}\sigma_{xz}^{(n_0)} + F'_{2y}\sigma_{yz}^{(n_0)}) &= f_z^{(2)}(x, y, t); \\ F'_{2x}(\sigma_{zz}^{(n_0)} - \sigma_{xx}^{(n_0)}) - F'_{2y}\sigma_{xy}^{(n_0)} + \sigma_{xz}^{(n_0)} &= f_{xz}^{(2)}(x, y, t); \\ F'_{2y}(\sigma_{zz}^{(n_0)} - \sigma_{yy}^{(n_0)}) - F'_{2x}\sigma_{xy}^{(n_0)} + \sigma_{yz}^{(n_0)} &= f_{yz}^{(2)}(x, y, t).\end{aligned}\quad (24)$$

Начальные условия в задаче будем считать нулевыми, т.е.

$$\Phi^{(l)} = \frac{d\Phi^{(l)}}{dx} = 0; \bar{\Psi}^{(l)} = \frac{d\bar{\Psi}^{(l)}}{dt} = 0(t = 0). \quad (25)$$

Начальные условия (25) адекватны начальным условиям для перемещений $u^{(l)}, v^{(l)}, w^{(l)}$ при $t = 0$:

$$u^{(l)} = v^{(l)} = w^{(l)} = 0; \quad \frac{du^{(l)}}{dt} = \frac{dv^{(l)}}{dt} = \frac{dw^{(l)}}{dt} = 0.$$

Аналогично решения интегро-дифференциальных уравнений (21) будем искать в виде:

$$\begin{aligned}\Phi^{(l)} &= \int_0^\infty \frac{\sin(ky)}{-\cos(ky)} \left\{ dk \int_0^\infty \frac{\sin(qy)}{-\cos(qy)} \right\} dq \int_{(L)} \Phi_0^{(l)} \exp(pt) dp; \\ \Psi_1^{(l)} &= \int_0^\infty \frac{\sin(kx)}{-\cos(kx)} \left\{ dk \int_0^\infty \frac{\cos(qy)}{\sin(qy)} \right\} dq \int_{(L)} \Psi_{10}^{(l)} \exp(pt) dp; \\ \Psi_2^{(l)} &= \int_0^\infty \frac{\cos(kx)}{\sin(kx)} \left\{ dk \int_0^\infty \frac{\sin(qy)}{-\cos(qy)} \right\} dq \int_{(L)} \Psi_{20}^{(l)} \exp(pt) dp; \\ \Psi_3^{(l)} &= \int_0^\infty \frac{\cos(kx)}{\sin(kx)} \left\{ dk \int_0^\infty \frac{\cos(qy)}{\sin(qy)} \right\} dq \int_{(L)} \Psi_{30}^{(l)} \exp(pt) dp.\end{aligned}\quad (26)$$

Подставляя предложенные соотношения в уравнения (21), для $\Phi_0^{(l)}, \Psi_{io}^{(l)}$ получим уравнения:

$$\frac{\partial^2 \Phi_0^{(l)}}{\partial z^2} - \alpha_l^2 \Phi_0^{(l)} = 0; \quad \frac{\partial^2 \Phi_{i0}^{(l)}}{\partial z^2} - \beta_l^2 \Phi_{i0}^{(l)} = 0, \quad (27)$$

$$\text{где} \quad \alpha_l^2 = k^2 + q^2 + \rho_l \rho^2 [N_l^{(0)}]^{-1}; \quad \beta_l^2 = k^2 + q^2 + \rho_l \rho^2 [M_l^{(0)}]^{-1}, \quad (28)$$

при этом $N_l^{(0)}$ и $M_l^{(0)}$ преобразованные по Лапласу операторы N_l и M_l .

Имея общие решения (27), для преобразованных перемещений $u_0^{(l)}, v_0^{(l)}, w_0^{(l)}$ точек слоев получим выражения:

$$\begin{aligned}
u_0^{(l)} &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[k\alpha_l^{2n} A_1^{(l)} - (\beta_l B_{21}^{(l)} + qB_{31}^{(l)}) \beta_l^{2n} \right] \frac{(z-z_l)^{2n}}{(2n)!} + \left[k\alpha_l^{2n+1} A_2^{(l)} - (\beta_l B_{22}^{(l)} + qB_{32}^{(l)}) \beta_l^{2n+1} \right] \frac{(z-z_l)^{2n+1}}{(2n+1)!} \right\}; \\
v_0^{(l)} &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[q\alpha_l^{2n} A_1^{(l)} - (\beta_l B_{11}^{(l)} + kB_{31}^{(l)}) \beta_l^{2n} \right] \frac{(z-z_l)^{2n}}{(2n)!} + \left[q\alpha_l^{2n+1} A_2^{(l)} - (\beta_l B_{12}^{(l)} + kB_{32}^{(l)}) \beta_l^{2n+1} \right] \frac{(z-z_l)^{2n+1}}{(2n+1)!} \right\}; \\
w_0^{(l)} &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[\alpha_l^{2n+2} A_1^{(l)} + (qB_{11}^{(l)} + kB_{21}^{(l)}) \beta_l^{2n+1} \right] \frac{(z-z_l)^{2n+1}}{(2n+1)!} + \left[\alpha_l^{2n+1} A_2^{(l)} + (qB_{12}^{(l)} - kB_{22}^{(l)}) \beta_l^{2n} \right] \frac{(z-z_l)^{2n}}{(2n)!} \right\},
\end{aligned} \quad (29)$$

где постоянные $B_{ij}^{(l)}$ удовлетворяют зависимостям:

$$kB_{1j}^{(l)} + qB_{2j}^{(l)} + \beta_l B_{3j}^{(l)} = 0,$$

при этом гиперболические функции в (24) представлялись в виде степенных рядов по аргументу.

При решении некоторых задач можно предположить идеальный контакт между отдельными элементами конструкции, тогда граничные условия можно записать в виде:

$$\sigma_{zz}^{(l)} = \sigma_{zz}^{(l+1)}; \sigma_{jz}^{(l)} = \sigma_{jz}^{(l+1)} = 0 (j = x, y); w^{(l)} = w^{(l+1)}; z = h_l. \quad (30)$$

Результаты. На рисунке 4 приведены зависимости вертикальных перемещений при воздействии на отдельный плитный элемент колесной пары, на которую действует сила 230 кН, коэффициент Пуассона – 0,3, модуль упругости – $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, плотность материала контактирующих тел – 7850 кг/м³. Для случая упругопластического характера местного смятия предел текучести принимался равным 240 МПа. Расчёт проводился как с учётом (сплошная линия), так и без учёта (пунктирная линия) сдвиговых деформаций поперечных сечений и распространения упругих волн, а затем сравнивался с результатами натурного эксперимента на железнодорожном полигоне (окружности маленького радиуса). Время, используемое в расчетах, отсчитывается с момента прихода колесной пары на границу рассматриваемого плитного элемента длиной 4,8 м, экипаж находится на втором (правом) пути.

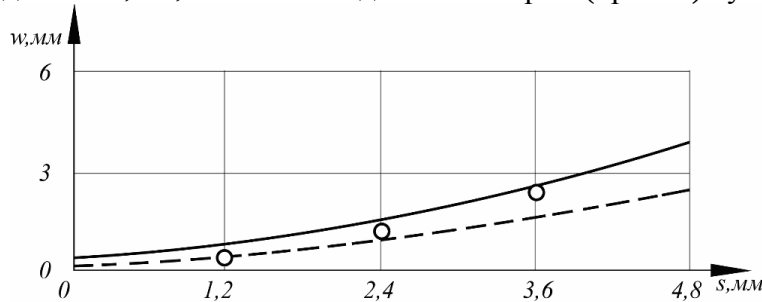


Рис. 4. Зависимость вертикальных перемещений точек бруса стрелочного перевода от продольной координаты

При анализе кривых на рисунке 4 видна неравномерность осадок под действием асимметричной нагрузки на стрелочном переводе. На левой незагруженной экипажем части бруса результаты эксперимента лучше описываются моделью без учета волновых процессов, в правой части, непосредственно под наезжающей колесной парой, результаты использования модели с учетом упругих волн более точно описывают полученные при натурных измерениях величины динамических осадок.

Величина напряжений на основной площадке и их распределение по площади зависят от многих факторов: характеристик подвижного состава (и в первую очередь осевых нагрузок и расстояний между ними); скорости движения поезда; типа верхнего строения железнодорожного пути; характеристик самого земляного полотна, времени года и т.д. Поэтому задача определения параметров нагрузки от воздействия подвижного состава сложная и зависит от того, в каких расчетах она будет применена. Рассмотрим методику расчета эквивалентной поездной нагрузки на железнодорожный стрелочный перевод.

Под эквивалентной поездной нагрузкой $P_{эkv}$ подразумевается такое ее значение в общей статистической совокупности фактических поездных нагрузок P , при котором воздействие

$N_{раз}P_{эв} = \text{const}$ равно (эквивалентно) по накопленным повреждениям железнодорожного пути N воздействию P с заданным (фактическим) распределением вероятностей значений.

Исходным условием излагаемой методики является положение о том, что накапливаемые за какой-либо период эксплуатации повреждения элементов железнодорожного пути зависят не только от величины действующих поездных нагрузок, но и от количества динамических воздействий в указанный период, имеющегося времени на восстановление пути (фактически время между поездами). При этом в качестве меры повреждения могут быть: износ, усталостные трещины, остаточные деформации, выход из строя элементов железнодорожного пути, остаточная деформация основания и т.п.

Так как средняя интенсивность накопления повреждения $h_{cp}^{(y\delta)}$ (средняя величина повреждения от одного воздействия нагрузки) зависит от величины нагрузки P (чем больше P , тем больше $h_{cp}^{(y\delta)}$) (рис. 5, а), то очевидно, что значение накопленных повреждений от воздействия нагрузок, соответствующих левой (заштрихованной) половине площади дифференциальной функции распределения $p(P)$, не равно (меньше) значению накопленных повреждений от воздействия нагрузок, соответствующих правой (незаштрихованной) половине (рис. 5, б).

Следовательно, средние значения нагрузок P_{cp} не могут быть таким параметром, поскольку $P_{cp.1} = P_{cp.2}$, а накапливаемые за какой-либо заданный период эксплуатации повреждения элементов железнодорожного пути на пути 2 больше, чем на пути 1. Это видно из рисунка 5, в, на котором показаны графики функции:

$$h_{cp}(P) = h_{cp}^{(y\delta)}(P)p(P). \quad (31)$$

Т.е. графики распределения накапливаемых за какой-либо заданный период эксплуатации повреждений элементов железнодорожного пути на путях 1 и 2 по величинам действующих на них нагрузок. Если принять площадь, заключенную между графиком функции $h_{cp}(P)$ и осью абсцисс за единицу, или за 100 % накапливаемых за заданный период повреждений, то заштрихованная площадь показывает долю повреждений, вызванных действием левой (заштрихованной) половины (рис. 5, б) нагрузок.

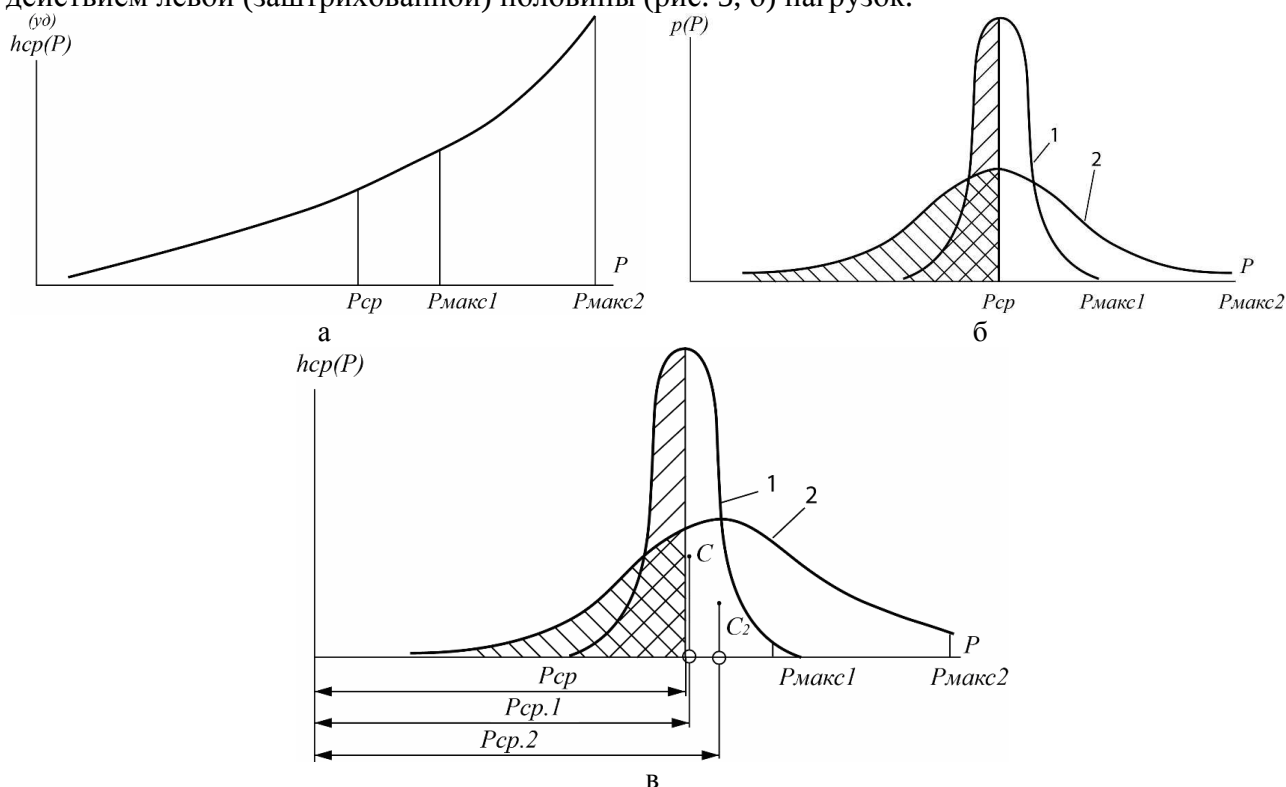


Рис. 5. Распределение интенсивности накопления повреждений по величине нагрузки:
1 – для пути 1; 2 – для пути 2

Выводы. Учет динамических процессов позволяет спрогнозировать состояние конструкции и ее основания при циклических воздействиях и подобрать параметры упругого нижнего слоя, которые могут отличаться по длине плоского элемента подрельсового основания стрелочного перевода. Фактически предлагается регулировать жесткость основания, делая ее различной под первым и вторым путем в зависимости от грузонапряженности и скорости движения экипажей.

Заключение. Учитывая такие факторы, как упругопластические свойства материалов, волновые процессы в рельсе и инерцию контактной области, было рассмотрено понятие деформирования плитного основания стрелочного перевода под динамическим воздействием колесной пары.

Предложенная математическая модель, основанная на определяющих соотношениях для криволинейных стержней и уравнениях движения с учетом растяжения срединной плоскости рельса, позволяет оценить скорости распространения продольных и изгибных волн, а также динамические условия совместности. Моделирование динамического взаимодействия колеса и рельса, с учетом упругопластического контакта и инерции пятна контакта, дает возможность определить контактную силу и смятие материала в зоне контакта.

Предложен подход к моделированию плитного основания как плоского элемента в трехмерном пространстве, с учетом вязкоупругих свойств материала и слоистой структуры. Использование потенциалов продольных и поперечных волн позволяет описать уравнения движения материала слоев.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования методов расчета и проектирования стрелочных переводов, а также для разработки новых конструкционных материалов, способных более эффективно справляться с динамическими нагрузками, обеспечивая повышение надежности и безопасности железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Королев В.В. Информационное моделирование стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – №8. – С. 37-39.
2. Королев В.В. Стрелочная продукция в эпоху цифрового проектирования // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – №6. – С. 17-19.
3. Королев В.В. Современные решения для стрелочных переводов на плитном основании // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2025. – №1. – С. 79-83.
4. Королев В.В. Инновационные стрелочные переводы нового поколения «ГЕКСА» // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2024. – №1. – С. 39-43.
5. Королев В.В. Сравнительный анализ технологических процессов сборки стрелочных переводов // Транспортное строительство: Сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12-14 апреля 2021 года. – М.: Изд-во "Перо", 2021. – С. 56-72.
6. Королев В.В. Подготовка технических средств и нормативной документации по стрелочному хозяйству для линий высокоскоростного движения // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – Т. 14, №14(14). – С. 21-26.
7. Максимова Л.А. Прямые и обратные задачи в механике деформируемого твердого тела // Строительство и застройка: жизненный цикл – 2024: Материалы VII Международной (XIII Всероссийской) конференции (Чебоксары, 20-21 ноября 2024 г.). – В 2-х т. – Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. – Чебоксары: Среда, 2024. – С. 181-186.
8. Литвинов Р.Г. Фундаментальный закон механики твердого деформируемого тела о сохранении потенциальной энергии квазиупругих деформаций растяжения // Актуальные проблемы современной науки. – 2011. – №5(61). – С. 129-131.
9. Васильев В.В., Федоров Л.В. Принципиальные проблемы релятивистской механики деформируемого твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2023. – № 6. – С. 125-135. – DOI: 10.31857/S0572329923700083.
10. Нагоев З.В., Ошхунов М.М. Метод дискретно-динамических частиц в задачах механики деформируемого твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – №4. – С. 155-169.
11. Вальдман Я., Фролов М.Е. Функциональные апостериорные оценки точности решений задач механики деформируемого твердого тела // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2020. – Т. 13, №4. – С. 203-215. – DOI: 10.18721/JPM.13416.
12. Бакушев С.В. Дифференциальные уравнения и краевые задачи механики деформируемого твердого тела. – М.: Ленанд, 2020. – 304 с.

13. Гольдштейн Р.В., Демьянов Ю.А., Никитин Л.В., Смирнов Н.Н., Шемякин Е.И. Научное наследие Х.А. Рахматулина в области механики деформируемых твердых тел // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2010. – №1. – С. 5-12.
14. Роговой А.А. Формализованный подход к построению моделей механики деформируемого твердого тела. – Пермь: Институт механики сплошных сред УрО РАН, 2023. – 320 с.
15. Маркочев В.М. Гибридные функции второго рода в механике деформируемого твердого тела // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2024. – Т. 90, №12. – С. 72-78. – DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-12-72-78.
16. Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Вовнова И.Г., Старенченко В.А., Белов Н.Н., Черепанов Д.Н., Валуйская Л.А. Макролокализация пластической деформации при одноосном сжатии в модели синтеза дислокационной кинетики и механики деформируемого твердого тела // Известия вузов. Физика. – 2023. – Т. 66, №12(793). – С. 48-54. – DOI: 10.17223/00213411/66/12/6.
17. Боряняк Л.А. Оптические методы в механике твердого деформируемого тела // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 5, №3. – С. 7-10.

References

1. Korolev V.V. Information modeling of switch switches // Path and track management. 2022, no. 8, pp. 37-39.
2. Korolev V.V. Switch products in the era of digital design // Path and track management. 2023, no. 6, pp. 17-19.
3. Korolev V.V. Modern solutions for switches on a slab base // History and prospects of transport development in the north of Russia. 2025, no. 1, pp. 79-83.
4. Korolev V.V. Innovative switches of the new generation "HEXA" // History and prospects of transport development in the north of Russia. 2024, no. 1, pp. 39-43.
5. Korolev V.V. Comparative analysis of technological processes for assembling switches // Transport construction: Collection of articles of the second All-Russian Scientific and Technical conference, Moscow, April 12-14, 2021. – M.: Publ. house "Pero", 2021. – P. 56-72.
6. Korolev V.V. Preparation of technical means and regulatory documentation for switch facilities for high-speed traffic lines // The introduction of modern structures and advanced technologies in the railway industry. 2019, vol. 14, no. 14(14), pp. 21-26.
7. Maksimova L.A. Direct and inverse problems in the mechanics of deformable solids // Construction and construction: life cycle – 2024: Proceedings of the VII International (XIII All-Russian) Conference (Cheboksary, November 20-21, 2024). – In 2 vol. – I.N. Ulianov Chuvash State University. – Cheboksary: Wednesday, 2024. – P. 181-186.
8. Litvinov R.G. The fundamental law of mechanics of a rigid deformable body on the conservation of potential energy of quasi-elastic tensile deformations // Actual problems of modern science. 2011, no. 5(61), pp. 129-131.
9. Vasiliev V.V., Fedorov L.V. Fundamental problems of relativistic mechanics of deformable solids // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid state mechanics. 2023, no. 6, pp. 125-135. DOI: 10.31857/S0572329923700083.
10. Nagoev Z.V., Oshkhunov M.M. The method of discrete dynamic particles in the problems of mechanics of a deformable solid // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid state mechanics. 2011, no. 4, pp. 155-169.
11. Waldman Ya., Frolov M.E. Functional a posteriori estimates of the accuracy of solutions to problems of deformable solid mechanics // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Physical and mathematical sciences. 2020, vol. 13, no. 4, pp. 203-215. DOI: 10.18721/JPM.13416.
12. Bakushev S.V. Differential equations and boundary value problems of deformable solid mechanics. – M.: Lenand, 2020. – 304 p.
13. Goldstein R.V., Demyanov Yu.A., Nikitin L.V., Smirnov N.N., Shemyakin E.I. The scientific legacy of Kh.A. Rakhmatulin in the field of mechanics of deformable solids // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid state mechanics. 2010, no. 1, pp. 5-12.
14. Rogovoy A.A. A formalized approach to the construction of models of mechanics of deformable solids. – Perm: Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023. – 320 p.
15. Markochev V.M. Hybrid functions of the second kind in the mechanics of deformable // Factory Laboratory. Diagnostics of materials 2024, vol. 90, no. 12, pp. 72-78. – DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-12-72-78.
16. Lipatnikova Ya.D., Solovyova Yu.V., Vovnova I.G., Starenchenko V.A., Belov N.N., Cherepanov D.N., Valuyskaya L.A. Macrolocalization of plastic deformation under uniaxial compression in a model for the synthesis of dislocation kinetics and mechanics of a deformable solid // News of universities. Physics. 2023, vol. 66, no. 12(793), pp. 48-54. – DOI: 10.17223/00213411/66/12/6.
17. Borynyak L.A. Optical methods in mechanics of a rigid deformable // Interexpo Geo-Siberia. 2013, vol. 5, no. 3, pp. 7-10.

Сведения об авторах:

Королев Вадим Вадимович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Верхнее строение железнодорожного пути и путевое хозяйство» кафедры «Транспортное строительство»
Korolevadim@mail.ru

Information about authors:

Korolev Vadim Vadimovich – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Laboratory "Upper structure of railway track and track facilities" of the Department "Transport construction"

Получена 08.10.2025