

Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути

А. Я. КОГАН, А. В. САВИН

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

Аннотация. В настоящее время актуален вопрос о сферах применения безбалластного верхнего строения пути (БВСП) и сроках его службы. Результаты испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» дали ответы на многие вопросы, но этого недостаточно для принятия решения.

Благодаря высокой грузонапряженности на Экспериментальном кольце за небольшой промежуток времени можно получить представление о сроке службы БВСП при грузовом движении со скоростью 80 км/ч и осевой нагрузке 23,5 т на ось. Для получения информации о сроке службы БВСП в реальных условиях высокоскоростного движения до 400 км/ч и осевой нагрузке до 18 т на ось требуется несколько десятков лет.

Для разрешения этого противоречия предлагается применить новую методику прогнозирования расчетного срока службы БВСП в реальных условиях высокоскоростного движения по результатам испытаний на Экспериментальном кольце с использованием математического моделирования. В дальнейшем эта методика позволит учитывать изменения эксплуатационных факторов на участке, в том числе влияние повышения осевой нагрузки или скорости движения поездов на долговечность конструкции пути.

Ключевые слова: безбалластный путь; срок службы; прогибы; напряжения; повреждаемость; моделирование; испытания; скорость; осевая нагрузка

Актуальность вопроса. Тщательный анализ достоинств и недостатков безбалластного пути по сравнению с путем на балласте не дает однозначного ответа, какая из конструкций предпочтительнее. Основной вопрос заключается в том, успеет ли достаточно дорогой безбалластный путь окупиться в течение срока службы за счет дешевого текущего содержания в тех или иных сферах применения? При этом вопрос о продолжительности срока службы также остается открытым [1 – 6].

Перед широкомасштабным строительством БВСП необходимы его испытания в реальных условиях (при высокой скорости (до 400 км/ч) и небольшой осевой нагрузке (15...18 т на ось)). Экспериментальное кольцо дает возможность провести испытания при высокой осевой нагрузке (до 25 т на ось), но невысокой скорости (80 км/ч), что не в полной мере отвечает реальным сферам применения БВСП.

Для разрешения этого противоречия предлагается применить методологию прогнозирования ресурса безбалластной конструкции пути (БКП) в реальных

условиях эксплуатации по результатам испытаний на Экспериментальном кольце с использованием математического моделирования.

Натурные испытания безбалластного пути крайне затруднены из-за высокой стоимости его строительства и выбора подходящих условий эксплуатации. Предлагаемая методология позволяет прогнозировать состояние безбалластной конструкции пути в части пропущенного тоннажа (срока службы) и трудозатрат на текущее содержание. Это удастся сделать благодаря применению комбинированного метода, сочетающего натурные испытания и математическое моделирование.

Математическая модель. В предлагаемой модели колебания пути рассматриваются как колебания конструкции, содержащей три бесконечно длинные балки, нижняя из которых лежит на модифицированном основании Винклера, а верхняя и средняя опираются на упругие прослойки, в основном имеющие характеристики основания Винклера. Для конкретной конструкции безбалластного пути это соответственно рельс, бетонная несущая плита (путевой бетон) и гидравлически связанный слой (тощий бетон).

На верхнюю балку действует переменная во времени динамическая нагрузка $Q(t)$, движущаяся с постоянной скоростью v . Колебания данной системы описываются следующей системой дифференциальных уравнений в неподвижной системе координат [7]:

$$\begin{cases} E_1 I_1 \frac{\partial^4 z_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_1}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + U_1 (z_1 - z_2) = 0; \\ E_2 I_2 \frac{\partial^4 z_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 z_2}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_1}{\partial t} \right) + f_2 \left(\frac{\partial z_2}{\partial t} - \frac{\partial z_3}{\partial t} \right) + \\ + U_1 (z_2 - z_1) + U_2 (z_2 - z_3) = 0; \\ E_3 I_3 \frac{\partial^4 z_3}{\partial x^4} + m_3 \frac{\partial^2 z_3}{\partial t^2} + f_2 \left(\frac{\partial z_3}{\partial t} - \frac{\partial z_2}{\partial t} \right) + f_3 \frac{\partial z_3}{\partial t} + \\ + U_2 (z_3 - z_2) + U_3 z_3 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где z_i — вертикальный прогиб i -го слоя в подрельсовом сечении; E_i — модуль упругости материала i -го слоя; I_i — момент инерции i -го слоя при его изгибе относительно поперечной горизонтальной оси, отнесенный к одной рельсовой нити; m_i — распределенная приве-

денная масса i -го слоя, отнесенная к одной рельсовой нити; f_i — распределенное приведенное демпфирование i -го слоя, отнесенное к одной рельсовой нити; U_i — приведенный модуль упругости основания i -го слоя при вертикальном изгибе, отнесенный к одной рельсовой нити; x — абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от некоторого неподвижного начала координат; t — время; $Q(t)$ — переменная нагрузка.

Рассмотрим решение задачи в подвижной системе координат, перемещающейся вдоль оси x со скоростью v путем замены $u = x - vt$, где u — абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от начала координат, совмещенного с движущейся нагрузкой.

Считая функции $z_i(u, t)$ реакциями системы (1) на воздействие $Q(t) = e^{i\omega t}$, с учетом линейности оператора, можно записать:

$$z_i(u, t) = e^{i\omega t} W_{z_i}^Q(u, i\omega); \quad i = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где ω — частота колебаний.

Тогда уравнения системы (1) примут следующий вид [7]:

$$\begin{cases} W_{z_1}^{IV} + a_1 W_{z_1}'' + a_2 W_{z_1}' + a_3 W_{z_1} + b_1 W_{z_2}' + b_2 W_{z_2} = 0; \\ W_{z_2}^{IV} + b_3 W_{z_2}'' + b_4 W_{z_2}' + b_5 W_{z_2} + a_4 W_{z_1}' + \\ + a_5 W_{z_1} + c_1 W_{z_3}' + c_2 W_{z_3} = 0; \\ W_{z_3}^{IV} + c_3 W_{z_3}'' + c_4 W_{z_3}' + c_5 W_{z_3} + b_6 W_{z_2}' + b_7 W_{z_2} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В уравнении (3) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} W_{z_i}^{IV} &= \frac{\partial^4 z_i}{\partial u^4}; \quad W_{z_i}'' = \frac{\partial^2 z_i}{\partial u^2}; \\ W_{z_i}' &= \frac{\partial z_i}{\partial u}; \quad i = \overline{1, 3}; \quad a_1 = \frac{m_1 v^2}{E_1 I_1}; \\ a_2 &= -\frac{v(f_1 + m_1 \omega i)}{E_1 I_1}; \\ a_3 &= \frac{U_1 - m_1 \omega^2 + f_1 \omega i}{E_1 I_1}; \quad a_4 = \frac{f_1 v}{E_2 I_2}; \\ a_5 &= -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_2 I_2}; \quad b_1 = \frac{f_1 v}{E_1 I_1}; \\ b_2 &= -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_1 I_1}; \quad b_3 = \frac{m_2 v^2}{E_2 I_2}; \\ b_4 &= -\frac{v(f_1 + f_2 + 2m_2 \omega i)}{E_2 I_2}; \\ b_5 &= \frac{U_1 + U_2 - m_2 \omega^2 + \omega(f_1 + f_2) i}{E_2 I_2}; \\ b_6 &= \frac{f_2 v}{E_3 I_3}; \quad b_7 = -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_3 I_3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{f_2 v}{E_2 I_2}; \quad c_2 = -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_2 I_2}; \\ c_3 &= \frac{m_3 v^2}{E_3 I_3}; \quad c_4 = -\frac{v(f_2 + f_3 + 2m_3 \omega i)}{E_3 I_3}; \\ c_5 &= \frac{U_2 + U_3 - m_3 \omega^2 + \omega(f_2 + f_3) i}{E_3 I_3}. \end{aligned}$$

Частотные характеристики систем, определяющих при входе по силам $Q_i(t)$ прогибы слоев конструкции, могут быть представлены в виде

$$W_{z_i}^Q(u, i\omega) = \begin{cases} W_{z_i+}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \geq 0; \\ W_{z_i-}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{cases} W_{z_1+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 A_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} & \text{при } u \geq 0; \\ W_{z_1-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 A_{2i} e^{\lambda_{2i} u} & \text{при } u \leq 0; \\ W_{z_2+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 B_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} & \text{при } u \geq 0; \\ W_{z_2-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 B_{2i} e^{\lambda_{2i} u} & \text{при } u \leq 0; \\ W_{z_3+}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 C_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} & \text{при } u \geq 0; \\ W_{z_3-}^Q(u, i\omega) = \sum_{i=1}^6 C_{2i} e^{\lambda_{2i} u} & \text{при } u \leq 0. \end{cases}$$

С учетом краевых условий задачи коэффициенты A_i, B_i и C_i ($i = \overline{1, 12}$) определяются так [3, 4]

$$\begin{aligned} A_i &= C_i \left[\frac{(\lambda_i^4 + c_3 \lambda_i^2 + c_4 \lambda_i + c_5)(\lambda_i^4 + b_3 \lambda_i^2 + b_4 \lambda_i + c_5)}{(b_6 \lambda_i + b_7)(a_4 \lambda_i + a_5)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(b_6 \lambda_i + b_7)(c_1 \lambda_i + c_2)}{(b_6 \lambda_i + b_7)(a_4 \lambda_i + a_5)} \right]; \\ B_i &= -C_i \frac{\lambda_i^4 + c_3 \lambda_i^2 + c_4 \lambda_i + c_5}{b_6 \lambda_i + b_7}; \\ C_i &= (-1)^{i+1} \prod_{1 \leq l \leq 12} (\lambda_i - \lambda_l)^{-1} \times \\ &\quad \times \left[\gamma_{11} - \sum_{j=1}^{12} \lambda_j^{11} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12 \\ l \neq i, j}} (\lambda_j - \lambda_l)^{-1} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[\gamma_{10} - \gamma_9 \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i, j}}^{12} \lambda_n^{10} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12 \\ l \neq i, j, n}} (\lambda_n - \lambda_l)^{-1} \right] \right]; \\ \gamma_9 &= \frac{a_4 b_6}{E_1 I_1}; \quad \gamma_{10} = \frac{a_5 b_6 + a_4 b_7}{E_1 I_1}; \\ \gamma_{11} &= \frac{a_5 b_7 - a_4 b_6 (a_1 + b_3 + c_3)}{E_1 I_1}. \end{aligned}$$

Величины λ_i определяются из уравнения $\Delta = 0$, где Δ — характеристический определитель системы (3),

$$\Delta = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{vmatrix}, \text{ где}$$

$$e_{11} = \lambda^4 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3; \quad e_{12} = b_1 \lambda + b_2;$$

$$e_{13} = 0; \quad e_{21} = a_4 \lambda + a_5;$$

$$e_{22} = \lambda^4 + b_3 \lambda^2 + b_4 \lambda + b_5;$$

$$e_{23} = c_1 \lambda + c_2; \quad e_{31} = 0; \quad e_{32} = b_6 \lambda + b_7;$$

$$e_{33} = \lambda^4 + c_3 \lambda^2 + c_4 \lambda + c_5,$$

причем λ_i удовлетворяет условиям

$$\operatorname{Re} \lambda_{(2i-1)} \geq 0; \quad \operatorname{Re} \lambda_{2i} \leq 0.$$

Воспользовавшись найденными частотными характеристиками $W_{z_i}^Q(u, i\omega)$ (4), находим среднюю величину вектора прогибов $\langle \mathbf{z}_i \rangle$ под действием вектора нагрузки $\mathbf{Q}(t)$ по формулам:

$$\langle \mathbf{z}_i \rangle = \mathbf{W}_{z_i}^Q(0) \cdot \langle \mathbf{Q} \rangle; \quad i = 1, 3,$$

$\langle \mathbf{Q} \rangle$ — вектор-столбец средних значений вертикальных сил Q .

Среднеквадратическое отклонение величин прогибов σ_{z_i} от их средних значений определяется диагональными членами матрицы спектральных плотностей прогибов слоев балки:

$$\sigma_{z_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\int_0^\infty S_{z_i, j}(\omega) d\omega \right),$$

где $n \times n$ — размерность матрицы спектральных плотностей $S_{z_i}(\omega)$,

$$\mathbf{S}_{z_i}(\omega) = \overline{\mathbf{W}}_{z_i}^Q(i\omega) \cdot \mathbf{S}_Q(\omega) \cdot \mathbf{W}_{z_i}^{Q^T}(i\omega). \quad (5)$$

В выражении (5) через $\overline{\mathbf{W}}_{z_i}^Q(i\omega)$ обозначена матрица, комплексно сопряженная с матрицей $\mathbf{W}_{z_i}^Q(i\omega)$, а через $\mathbf{W}_{z_i}^{Q^T}(i\omega)$ — матрица, транспонированная по отношению к матрице $\mathbf{W}_{z_i}^Q(i\omega)$, где $\mathbf{W}_{z_i}^Q(i\omega)$ — матрица частотных характеристик, определяющих прогибы i -го слоя балки под воздействием вектора вертикальных сил; $\mathbf{S}_Q(\omega)$ — матрица спектральных плотностей процесса изменения динамических сил в контактах колес экипажа и рельса.

Для четырехосного грузового вагона имеем $n = 4$ и

$$\mathbf{W}_{z_i}^Q(i\omega) = \mathbf{R}, \text{ где}$$

$$R_{11} = W_{z_{1+}}^Q(0, i\omega); \quad R_{12} = W_{z_{1-}}^Q(-d, i\omega);$$

$$R_{13} = W_{z_{1-}}^Q(-l, i\omega); \quad R_{14} = W_{z_{1-}}^Q(-l-d, i\omega);$$

$$R_{21} = W_{z_{1+}}^Q(d, i\omega); \quad R_{22} = W_{z_{1+}}^Q(0, i\omega);$$

$$R_{23} = W_{z_{1-}}^Q(d-l, i\omega); \quad R_{24} = W_{z_{1-}}^Q(-l, i\omega);$$

$$R_{31} = W_{z_{2+}}^Q(l, i\omega); \quad R_{32} = W_{z_{2+}}^Q(l-d, i\omega);$$

$$R_{33} = W_{z_{2+}}^Q(0, i\omega); \quad R_{34} = W_{z_{2+}}^Q(-d, i\omega);$$

$$R_{41} = W_{z_{2+}}^Q(l+d, i\omega); \quad R_{42} = W_{z_{2+}}^Q(l, i\omega);$$

$$R_{43} = W_{z_{2+}}^Q(d, i\omega); \quad R_{44} = W_{z_{2+}}^Q(0, i\omega),$$

где d — расстояние между колесными парами; l — расстояние между центрами тележек.

$$\mathbf{S}_Q(\omega) = \begin{pmatrix} S_{Q11} & S_{Q12} & S_{Q13} & S_{Q14} \\ S_{Q21} & S_{Q22} & S_{Q23} & S_{Q24} \\ S_{Q31} & S_{Q32} & S_{Q33} & S_{Q34} \\ S_{Q41} & S_{Q42} & S_{Q43} & S_{Q44} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где S_{Qij} — взаимные спектральные плотности динамических вертикальных сил, возникающих при пространственных колебаниях экипажа.

Частотные характеристики изгибающих моментов в слоях определяются следующим образом:

$$W_{M_i}^Q(u, i\omega) = \begin{cases} W_{M_{i+}}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \geq 0; \\ W_{M_{i-}}^Q(u, i\omega) & \text{при } u \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $W_{M_i}^Q(u, i\omega)$ — частотная характеристика, определяющая при входе по динамической силе в контакте колеса и рельса $Q(t)$ изгибающие моменты в балках трех слоев безбалластной конструкции пути в сечениях u .

$$W_{M_{1+}}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 A_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0;$$

$$W_{M_{1-}}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 A_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0;$$

$$W_{M_{2+}}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 B_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0;$$

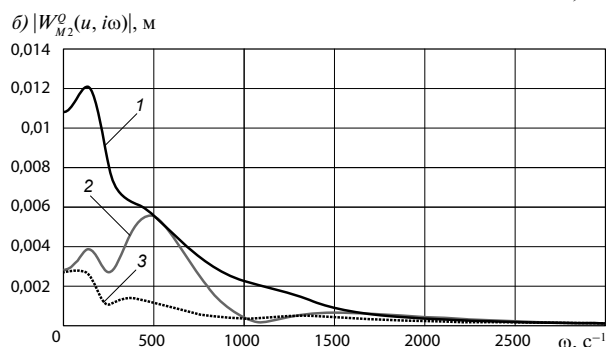
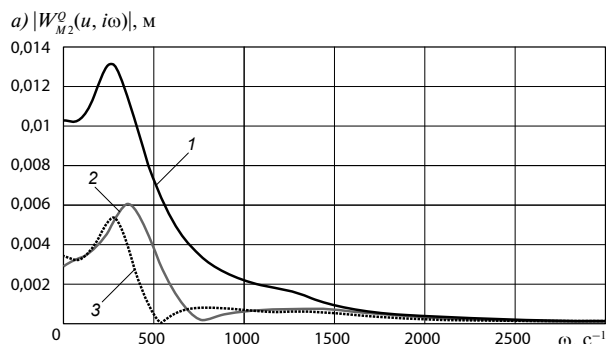
$$W_{M_{2-}}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 B_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0;$$

$$W_{M_{3+}}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 C_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при } u \geq 0;$$

$$W_{M_{3-}}^Q(u, i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 C_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \quad \text{при } u \leq 0.$$

На рисунке представлены амплитудно-частотные характеристики изгибающих моментов во втором слое безбалластной конструкции пути $|W_{M_2}^Q(u, i\omega)|$.

С учетом того, что амплитудно-частотная характеристика не зависит от осевой нагрузки, вычисления произведены для частного случая при значениях $u = 0$, $u = +185$ см и $u = -185$ см (расстояние $u = 185$ см соответствует базе двухосной тележки d вагона) и скоро-



Амплитудно-частотные характеристики $|W_{M_2}^Q(u, i\omega)|$:
 а — для скорости $v = 80$ км/ч; б — для скорости $v = 300$ км/ч;
 1, 2, 3 — соответственно при $u = 0$, $u = -185$ см и $u = +185$ см
 The amplitude-frequency characteristics $|W_{M_2}^Q(u, i\omega)|$:
 а — for speed $v = 80$ km/h; б — for speed $v = 300$ km/h;
 1, 2, 3 — respectively for $u = 0$, $u = -185$ см и $u = +185$ см

стях движения $v = 80$ км/ч и $v = 300$ км/ч при следующих параметрах (см. табл.).

Воспользовавшись частотными характеристиками $W_{M_i}^Q(u, i\omega)$ (7), найдем среднюю величину векторов напряжений в заданных точках слоев $\langle \sigma_i \rangle$ под действием вектора нагрузки $Q(t)$ по формулам:

$$\langle \sigma_i \rangle = W_{M_i}^Q(0) \cdot \frac{\langle Q \rangle}{W_i}; \quad i = \overline{1, 3}, \quad (8)$$

где $\langle Q \rangle$ — вектор-столбец средних значений вектора вертикальных сил Q ; W_i — момент сопротивления в заданной точке i -го слоя.

Среднеквадратическое отклонение величин напряжений от их средних значений определяется диагональными членами матрицы спектральных плотностей напряжений в слоях балки:

$$\sigma_{\sigma_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\int_0^\infty S_{\sigma_i, j}(\omega) d\omega \right), \quad (9)$$

где $n \times n$ — размерность матрицы спектральных плотностей $S_{\sigma_i}(\omega)$,

$$S_{\sigma_i}(\omega) = \frac{\overline{W}_{M_i}^Q(i\omega)}{W_i} \cdot S_Q(\omega) \cdot \frac{W_{M_i}^{Q^T}(i\omega)}{W_i}, \quad (10)$$

где $W_{M_i}^Q(i\omega)$ — матрица частотных характеристик, определяющих изгибающие моменты i -го слоя балки под воздействием вектора вертикальных сил.

Параметры для расчета колебаний слоев балки
 безбалластной конструкции пути
 Parameters for calculation of the vibrations of beam layers
 of ballastless track structure

Слой балки	E , Н/м ²	I , м ²	U , Па	m , кг/м	f , Н·с/м ²
Верхний	$2,1 \cdot 10^{11}$	$0,355 \cdot 10^{-4}$	$0,1042 \cdot 10^9$	65	$0,173 \cdot 10^5$
Средний	$4,5 \cdot 10^8$	0,00288	$0,1415 \cdot 10^9$	1635	$0,31 \cdot 10^6$
Нижний	$1,81 \cdot 10^8$	0,128625	$0,25 \cdot 10^9$	945	$0,515 \cdot 10^7$

Для вагона имеем $n = 4$ и

$$W_{M_i}^Q(i\omega) = F, \quad \text{где} \quad (11)$$

$$F_{11} = W_{M_1}^Q(0, i\omega); \quad F_{12} = W_{M_1}^Q(-d, i\omega);$$

$$F_{13} = W_{M_1}^Q(-l, i\omega); \quad F_{14} = W_{M_1}^Q(-l-d, i\omega);$$

$$F_{21} = W_{M_2}^Q(d, i\omega); \quad F_{22} = W_{M_2}^Q(0, i\omega);$$

$$F_{23} = W_{M_2}^Q(d-l, i\omega); \quad F_{24} = W_{M_2}^Q(-l, i\omega);$$

$$F_{31} = W_{M_3}^Q(l, i\omega); \quad F_{32} = W_{M_3}^Q(l-d, i\omega);$$

$$F_{33} = W_{M_3}^Q(0, i\omega); \quad F_{34} = W_{M_3}^Q(-d, i\omega);$$

$$F_{41} = W_{M_4}^Q(l+d, i\omega); \quad F_{42} = W_{M_4}^Q(l, i\omega);$$

$$F_{43} = W_{M_4}^Q(d, i\omega); \quad F_{44} = W_{M_4}^Q(0, i\omega),$$

а матрица $S_Q(\omega)$ определяется выражением (6).

Ранее было принято, первый слой это рельс, второй — несущая бетонная плита, третий — гидравлически связанный слой.

Как показали исследования на Экспериментальном кольце в 2010–2014 гг. [8], основной причиной выхода из строя безбалластного пути становится разрушение несущей бетонной плиты вследствие образования пустот на стыке второго и третьего слоя. Это происходит из-за разницы прогибов бетонной несущей плиты и тощего бетона. В момент прохода поезда в этом месте периодически образуется зазор, куда в период дождей или таяния снега попадет вода. Испытания четырех типов безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце в 2014–2016 гг. также подтверждают, что основная неисправность безбалластного пути это повреждаемость бетонного несущего слоя вследствие образования пустот под ним, что нашло отражение и в зарубежных исследованиях [9–11].

Определение расчетного срока службы безбалластного пути. Долговечность безбалластной конструкции пути определяется интенсивностью повреждаемости второго слоя, который обеспечивает стабильность геометрии рельсовой колеи. Она зависит от среднего квадрата напряжений растяжения в арматуре подрельсовой зоны нижней грани этого слоя при прохождении осей подвижного состава. Представляется целесообразным за меру повреждаемости второго слоя безбалластной конструкции пути в одном

цикле нагружения (при проходе одной оси экипажа) принять величину

$$\mu = \langle \sigma_2^2 \rangle^K, \quad (12)$$

где $\langle \sigma_2^2 \rangle$ — средний квадрат напряжений растяжения в подрельсовой зоне нижней грани второго слоя рассматриваемой безбалластной конструкции пути в момент прохода через заданное сечение пути оси экипажа.

Показатель степени K в первом приближении можно принять равным $K = 2 \div 3$.

При проходе поездов через заданное сечение рассматриваемого участка пути под осями экипажа в этом сечении создаются растягивающие напряжения в нижней грани второго слоя конструкции пути со следующими статистическими характеристиками:

$$\langle \sigma_2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle \sigma_{2i} \rangle; \quad \sigma_{\sigma_2}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{\sigma_{2i}}^2, \quad (13)$$

где i — номер экипажа, проходящего через заданное сечение пути; $\langle \sigma_{2i} \rangle$ — среднее значение напряжений растяжения в нижней грани второго слоя рассматриваемой безбалластной конструкции пути, возникающих при проходе через заданное сечение рассматриваемого участка пути i -ой оси всей совокупности экипажей; $\sigma_{\sigma_{2i}}$ — среднеквадратическое отклонение напряжений растяжения в нижней грани второго слоя конструкции пути от его среднего значения $\langle \sigma_{2i} \rangle$; N — общее количество осей экипажей, проходящих через заданное сечение рассматриваемого участка пути в течение суток.

Средний квадрат напряжений растяжения в подрельсовой зоне нижней грани второго слоя рассматриваемой безбалластной конструкции составляет величину

$$\langle \sigma_2^2 \rangle = \langle \sigma_2 \rangle^2 + \sigma_{\sigma_2}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\langle \sigma_{2i} \rangle^2 + \sigma_{\sigma_{2i}}^2 \right] \alpha_i, \quad (14)$$

где α_i — доля экипажей группы i в общем многообразии экипажей, обращающихся на участке.

Подставляя выражение (14) в (12) получим формулу, определяющую меру повреждения безбалластной конструкции пути μ при проходе одной оси во всем многообразии экипажей, обращающихся на участке

$$\mu = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\langle \sigma_{2i} \rangle^2 + \sigma_{\sigma_{2i}}^2 \right] \alpha_i \right)^K. \quad (15)$$

Изложенный метод оценки меры повреждаемости конструкции пути можно использовать для «переноса» результатов наблюдений за сроком службы безбалластной конструкции пути на опытном участке на любой другой участок с учетом соотношения пропущенных осей при расчетной и экспериментально полученной повреждаемости бетонной несущей плиты (второго слоя).

Действительно, если через n обозначить число осей, которое можно пропустить по участку до исчер-

пания ресурса долговечности второго слоя безбалластной конструкции пути G , можно записать

$$n_1 \mu_1 = n_0 \mu_0 = G = const, \quad (16)$$

где n_1 — число осей, которое можно пропустить по участку 1 до исчерпания ресурса долговечности безбалластной конструкции пути на этом участке; μ_1 — мера повреждаемости второго слоя безбалластной конструкции пути, лежащей на участке 1, при проходе всего многообразия экипажей, обращающихся на этом участке; n_0 — число осей, пропущенных по опытному участку до исчерпания ресурса G ; μ_0 — мера повреждаемости второго слоя безбалластной конструкции пути в одном цикле нагружения при проходе по опытному участку всего многообразия экипажей, обращающихся по нему.

Учитывая, что

$$n_1 = \frac{T_1}{\langle P_1 \rangle}; \quad n_0 = \frac{T_0}{\langle P_0 \rangle}, \quad (17)$$

где T_1 — тоннаж брутто, который можно пропустить по участку 1 до исчерпания ресурса долговечности безбалластной конструкции пути, лежащей на этом участке; T_0 — тоннаж брутто, пропущенный на опытном участке до исчерпания ресурса долговечности G ; $\langle P_1 \rangle$ — средняя осевая нагрузка на участке 1; $\langle P_0 \rangle$ — средняя осевая нагрузка на опытном участке, получим выражение, определяющее размеры тоннажа брутто, который можно пропустить по участку 1.

$$T_1 = T_0 \frac{\mu_0 \langle P_1 \rangle}{\mu_1 \langle P_0 \rangle} \cdot K_r. \quad (18)$$

В выражении (18) введен коэффициент K_r , учитывающий снижение долговечности безбалластной конструкции пути за счет увеличения расстройств пути в период оттаивания весной и замерзания осенью. Коэффициент K_r может быть определен из соотношения

$$K_r = 0,13 \frac{\gamma_1}{\gamma_0}, \quad (19)$$

где γ_1 — число переходов оттаивания/замерзания на 100 млн т брутто на участке 1; γ_0 — число переходов оттаивания/замерзания на 100 млн т брутто на опытном участке.

Величину γ_1/γ_0 можно принять как отношение грузонапряженностей на участках 1 и 0 соответственно.

Коэффициент K_r получен на основании анализа интенсивности осадки пути и трудозатрат на его текущее содержание на Экспериментальном кольце.

Формула (18) позволяет вычислить тоннаж брутто, который можно пропустить по определенному участку с заданными характеристиками, если известен тоннаж брутто, пропущенный на опытном участке до исчер-

пания ресурса долговечности второго слоя безбалластной конструкции пути, лежащей на этом участке.

Как следует из формулы (18), определяющим в решении задачи является отношение параметров μ_0 , μ_1 и $\langle P_0 \rangle$, $\langle P_1 \rangle$ в сжатом виде характеризующих условия эксплуатации опытного и заданного участков. При вычислении величин μ_0 и μ_1 по формуле (15) следует воспользоваться выражениями (8), (9) и (10) при $i = 2$.

Компоненты матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных сил $S_{ij}(\omega)$, входящей множителем в выражение (10), могут быть определены по программе «Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава» [12], которая использует прямые методы теории случайных процессов для оценки средних значений и взаимных спектральных плотностей сил взаимодействия пути и подвижного состава.

При расчете по указанной программе элементы матрицы взаимных плотностей вертикальных сил, передаваемых от колес подвижного состава на путь, в первом приближении могут быть вычислены при рассмотрении конструкции пути в виде балки на сплошном модифицированном (имеющим распределенную массу и распределенное демпфирование) основании. В этом случае модуль упругости пути U следует определять из соотношения

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{U_i}. \quad (20)$$

Методы определения параметров распределенного демпфирования f и распределенной массы m для любой конструкции пути, в том числе безбалластной, изложены в [13].

Предлагаемый алгоритм можно использовать для «переноса» результатов испытаний конструкций пути в условиях Экспериментального кольца на действующую линию. Таким образом, можно прогнозировать поведение той или иной конструкции пути в реальных условиях эксплуатации на линии по результатам испытаний на Экспериментальном кольце.

В заключение отметим, что за меру повреждаемости второго слоя безбалластной конструкции пути можно принять также некоторую степень от среднего квадрата максимальных напряжений растяжения цикла в этом слое при проходе одной тележки экипажа.

Выводы. Предлагаемый алгоритм и методика дают возможность переносить результаты наблюдений за процессами деградации опытной безбалластной конструкции пути на Экспериментальном кольце (ст. Щербинка) на другие участки, где предполагается укладка любой безбалластной конструкции пути для совмещенного движения.

В перспективе эта методика позволит учитывать изменения эксплуатационных факторов на участке, в том числе влияние повышения осевой нагрузки или

скорости движения поездов на долговечность конструкции пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 55–59.
2. Коваленко Н. И., Замуховский А. В., Коваленко А. Н. Критерий выбора конструкций пути для ВСМ // Мир транспорта. 2013. № 4. С. 88–94.
3. Замуховский А. В. Перспективы полигона безбалластного пути // Мир транспорта. 2013. № 3. С. 168–172.
4. Замуховский А. В., Копыленко В. А., Фридкин В. М. О технико-экономической целесообразности применения железнодорожных эстакад вместо высоких насыпей // Транспортное строительство. 2012. № 10. С. 15–18.
5. Schilder R., Diederich D. Installation Quality of Slab Track – A Decisive Factor for Maintenance // RTR Special. Austria. July 2007. P. 76–78. URL: <http://www.eurailpress.de/leseprobe/203/download/magazine.pdf> (дата обращения: 20.08.2016 г.).
6. Zoeteman A., Esveld C. Evaluating track structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach // Delft University of Technology. World Congress on Railway Research Tokyo, 1999. P. 1–9. URL: [http://www.silvertipdesign.com/BR\(Imperial\)/\[18\]%20Paper%20WCRR99%20Tokyo.pdf](http://www.silvertipdesign.com/BR(Imperial)/[18]%20Paper%20WCRR99%20Tokyo.pdf) (дата обращения: 01.09.2016 г.).
7. Коган А. Я., Барабошин В. Ф., Гаврилов В. М. Колебания пятислойной балки на упругом основании под действием подвижной динамической нагрузки // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений: межвуз. сб. науч. тр. Новосибирск, НИИЖТ. 1986. С. 33–43.
8. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути / А. В. Савин, А. М. Бржезовский, В. В. Третьяков [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 6. С. 23–32.
9. Muramoto K., Sekine E., Nakamura T. Roadbed Degradation Mechanism under Ballastless Track and Its Countermeasures // QR of RTRI. 2006. Vol. 47. No. 4. Nov. P. 222–227. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/47/4/47_4_222/_pdf (дата обращения: 13.09.2016 г.).
10. Development of Slab Tracks for Hokuriku Shinkansen Line / Katsutoshi Ando, Makoto Sunaga, Hifumi Aoki, Osamu Haga // QR of RTRI. 2001. Vol. 42. No. 1. Mar. P. 35–41. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/42/1/42_1_35/_pdf (дата обращения: 20.09.2016 г.).
11. Takahashi T., Sekine E. Evaluation of Factors Contributing to Deterioration of Track-slab in Cold Areas // QR of RTRI. 2011. Vol. 52. No. 3. Aug. P. 149–155. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/52/3/52_3_149/_pdf (дата обращения: 26.09.2016 г.).
12. Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава. Описание программы / А. Я. Коган, М. А. Левинзон, И. О. Войтов [и др.] // Информационный бюллетень ВНИИЖТ. М., ГОСФАП. 1985. № 4/67. 40 с.
13. Коган А. Я., Никитин Д. А., Полешук И. В. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса. М.: Интекст, 2007. 168 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОГАН Александр Яковлевич,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

САВИН Александр Владимирович,

канд. техн. наук, заместитель Генерального директора — начальник Испытательного центра железнодорожной техники, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 16.10.2016 г., принята к публикации 26.12.2016 г.

Method for determining design life of ballastless way

A. Ya. KOGAN, A. V. SAVIN

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

Abstract. The problem of the scope of ballastless track superstructure (BTS) and its service life currently is urgent. Due to the high traffic density at the Test Loop of JSC "VNIIZhT" for a short period of time it is possible to get an idea of BTS service life with freight transport at a speed of 80 km/h and axle load of 23.5 tonnes per axle. For information on BTS service life in real conditions of high-speed up to 400 km/h and axle load to 18 tonnes it would takes several decades.

To resolve this contradiction it is proposed to apply a new methodology for forecasting the estimated service life of BTS at actual high-speed traffic by the results of tests on Test Loop with using mathematical modeling.

In the proposed model track vibrations are considered as vibrations of construction comprising of three endlessly long beams, the bottom of which is based on a modified Winkler base and the upper and middle rely on the elastic layer mainly having a base characteristics as Winkler base. For specific design of ballastless track it would be the rail, the concrete support plate (track concrete) and hydraulically bound layer (lean concrete) correspondingly.

The calculation results are presented in the form of amplitude-frequency characteristics of the bending moments in the second layer of ballastless track structure. Given the fact that the amplitude-frequency characteristic is not dependent on the axial load, the calculations are made for the particular case when the values of the speed of 80 km/h and 300 km/h with the actual characteristics of the layers of ballastless track that is operated on the Test Loop of JSC "VNIIZhT".

The proposed algorithm and methodology make it possible to transfer the results of observations of the processes of degradation of tested ballastless track design, obtained at the Test Loop (st. Scherbinka), on sections of network, where installation of track of this design for mixed transport is assumed. In the future, this technique allows taking into account changes in the area of operational factors, including the effect of increasing the axial load or speed of trains on the durability of track design.

Keywords: ballastless track; service life; deflections; stresses; damageability; modeling; tests; speed; axle load

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-3-9>

REFERENCES

1. Savin A. V. *Vybor konstruktsii puti dlya vysokoskorostnogo dvizheniya* [Selecting track design for high-speed traffic]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 1, pp. 55–59.
2. Kovalenko N. I., Zamukhovskiy A. V., Kovalenko A. N. *Kriteriy vybora konstruktsiy puti dlya VSM* [Selection criterion of railway track construction for the high-speed traffic]. Mir transporta [World of transport], 2013, no. 4, pp. 88–94.
3. Zamukhovskiy A. V. *Perspektivy poligona bezballastnogo puti* [Prospects for test site of ballastless track]. Mir transporta [World of transport], 2013, no. 3, pp. 168–172.
4. Zamukhovskiy A. V., Kopylenko V. A., Fridkin V. M. *O tekhniko-ekonomicheskoy tselesoobraznosti primeneniya zheleznodorozhnykh estakad vmesto vysokikh nasypey* [On the technical and economic feasibility of railway overpasses instead of high embankments]. Transportnoe stroitel'stvo [Transport construction], 2012, no. 10, pp. 15–18.

5. Schilder R., Diederich D. *Installation Quality of Slab Track – A Decisive Factor for Maintenance*. RTR Special. Austria, July 2007, pp. 76–78. Available at: URL: <http://www.eurailpress.de/leseprobe/203/download/magazine.pdf> (retrieved on 20.08.2016).

6. Zoeteman A., Esveld C. *Evaluating track structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach*. Delft University of Technology. World Congress on Railway Research Tokyo, 1999, pp. 1–9. Available at URL: [http://www.silvertipdesign.com/BR\(Imperial\)/\[18\]%20Paper%20WCRR99%20Tokyo.pdf](http://www.silvertipdesign.com/BR(Imperial)/[18]%20Paper%20WCRR99%20Tokyo.pdf) (retrieved on 01.09.2016).

7. Kogan A. Ya., Baraboshin V. F., Gavrilov V. M. *Kolebaniya pyatisloynoy balki na uprugom osnovanii pod deystviem podvizhnoy dinamicheskoy nagruzki* [Vibrations of five-layer beam on an elastic foundation under the action of moving dynamic load]. Mekhanika deformiruemogo tela i raschet transportnykh sooruzheniy: mezhvuz. sb. nauch. tr. [Mechanics of deformable body and the calculation of the transport facilities: Proc. of sci. works]. Novosibirsk, NIIZhT Publ., 1986, pp. 33–43.

8. Savin A. V., Brzhezovskiy A. M., Tret'yakov V. V., Smelyanskiy I. V., Tolmachev S. V. *Issledovaniya bezballastnoy konstruktsii verkhnego stroeniya puti* [Research of ballastless design of track superstructure]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2015, no. 6, pp. 23–32.

9. Muramoto K., Sekine E., Nakamura T. *Roadbed Degradation Mechanism under Ballastless Track and Its Countermeasures*. QR of RTRI, 2006, Vol. 47, no. 4, Nov., pp. 222–227. Available at URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/47/4/47_4_222/_pdf (retrieved on 13.09.2016).

10. Ando Katsutoshi, Sunaga Makoto, Aoki Hifumi, Haga Osamu *Development of Slab Tracks for Hokuriku Shinkansen Line*. QR of RTRI, 2001, Vol. 42, no. 1, Mar., pp. 35–41. Available at URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/42/1/42_1_35/_pdf (retrieved on 20.09.2016).

11. Takahashi T., Sekine E. *Evaluation of Factors Contributing to Deterioration of Track-slab in Cold Areas*. QR of RTRI, 2011, Vol. 52, no. 3, Aug., pp. 149–155. Available at URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/52/3/52_3_149/_pdf (retrieved on 26.09.2016).

12. Kogan A. Ya., Levinzon M. A., Voytov I. O., Gavrilov V. M., Perel'shtein A. L. *Vozdeystvie ekipazha na put' pri prostranstvennykh kolebaniyakh podvizhnogo sostava. Opisanie programmy* [The impact of the carriage on track at spatial oscillations of the rolling stock. Program description]. Informatsionnyy byulleten' VNTTsentr [Information bulletin of VNIITsentr]. Moscow, GOSFAP Publ., 1985, no. 4/67, 40 p.

13. Kogan A. Ya., Nikitin D. A., Poleshchuk I. B. *Kolebaniya puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya ekipazhey i udarnom vzaimodeystvii koleba i rel'sa* [Vibrations of the track at high speeds of carriages and impact interaction of wheel and rail]. Moscow, Intext Publ., 2007, 168 p.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander Ya. KOGAN,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Aleksander V. SAVIN,
Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director – Head of Test Center of railway transport, JSC "VNIIZhT"

Received 16.10.2016

Accepted 26.12.2016

■ E-mail: savin.aleksandr@vniizht.ru (A. V. Savin)