НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 691.32
DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-4

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 50–58

Влияние анизотропных свойств верхнего строения железнодорожного пути на параметры динамической осадки предмостовых участков

Зульфия ФАЗИЛОВА

Зульфия Тельмановна Фазилова
Российский университет транспорта, Москва, Россия.
✉ fazil_1905@mail.ru
SPIN-код: 9817–6928, AuthorID: 459237, ORCID: 0000-0001-5933-1208

АННОТАЦИЯ

На сетях железных дорог эксплуатируется большое число искусственных сооружений, мостов, путепроводов, труб, лотков. Искусственные сооружения рассчитаны на длительные сроки эксплуатации, в ходе которой они нуждаются в капитальном ремонте или реконструкции с применением современных материалов и технологий. В современных условиях развития железных дорог происходит рост осевых нагрузок и скоростей движения, что повышает актуальность решения задач, связанных с динамическим воздействием поездов на искусственные сооружения и земляное полотно. В силу специфики строительства и содержания участков железнодорожного пути на подходах к мостовым сооружениям связанная с ними проблематика требует отдельного рассмотрения.

Исследование, результаты которого приведены в статье, было посвящено влиянию анизотропии верхнего строения пути на параметры динамической осадки предмостовых участков переходной жёсткости, устроенных с применением бездонных коробов.

В проведённом исследовании железнодорожный путь в пределах переходного участка предлагается моделировать в виде набора плоских элементов постоянной толщины, каждый из которых представлен анизотропной пластиной, опирающейся на деформируемое основание со своими параметрами деформативности. Показано, что, задавая граничные условия для отдельных фрагментов конструкции пути и варьируя коэффициенты анизотропии, определяющие соотношения её механических характеристик в разных направлениях, можно подобрать требуемые параметры жёсткости железнодорожного пути в пределах предмостового участка, что позволяет в дальнейших исследованиях перейти к рассмотрению конструктивных особенностей проектирования и устройства данных конструкций.

Ключевые слова: железные дороги, искусственные сооружения, переходной участок, модуль упругости, бездонные короба, частота собственных колебаний, анизотропная пластина, метод декомпозиций, изгибная и сдвиговая жёсткости, динамический прогиб.

Финансирование: данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта ОАО «РЖД» по Договору № 5106449 от 28.12.2022 года на развитие научно-педагогических школ на железнодорожном транспорте.

Благодарности: автор выражает искреннюю признательность своим коллегам по проведению научного исследования – доктору физико-математических наук, профессору А. А. Локтеву и кандидату физико-математических наук Э. Н. Егеревой за ценные советы и мнения при написании статьи.

Для цитирования: Фазилова З. Т. Влияние анизотропных свойств верхнего строения железнодорожного пути на параметры динамической осадки предмостовых участков // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 50–58. DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-4.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

© Фазилова З. Т., 2023

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы

На сети железных дорог Российской Федерации эксплуатируется около 83 тысяч искусственных сооружений (ИССО), из них мосты и путепроводы составляют 37 %, на долю труб и лотков приходится 59 %. Многие из искусственных сооружений нуждаются в неотложном капитальном ремонте либо реконструкции с применением современных материалов и технологий. Кроме этого, повышение осевых нагрузок и скоростей движения требует уточнения и детализации сложившихся подходов к решению задач, связанных с динамическим воздействием поездов на объекты ИССО и земляного полотна. При этом указанная проблема представляется актуальной для железных дорог большинства стран в силу большой длительности сроков эксплуатации ИССО и современных тенденций развития железнодорожного транспорта.

Места сопряжения железнодорожного пути с ИССО являются одним из основных участков резкого изменения вертикальной жёсткости пути, что приводит к ускоренному выходу из строя элементов верхнего строения пути (ВСП), увеличению времени и ресурсов, необходимых для технического обслуживания участка, а также требует применения специальных технологий строительства и содержания [1–8].

При устройстве участков переменной жёсткости используются различные конструкции, рекомендованные, в том числе и в рамках международных организаций, например ОСЖД, для создания постепенного нивелирования жёсткости подрельсового основания на подходе к ИССО [9].

Однако рост осевых нагрузок, увеличение полигона тяжеловесного и скоростного движения ставят задачу более детального исследования динамического воздействия подвижного состава на конструкцию участков переходной жёсткости с целью их оптимизации.

В целом, с точки зрения сформировавшихся подходов к научной методологии и проведению инженерных расчётов, проблемы динамического воздействия на участках различной жёсткости подрельсового основания рассматриваются путём моделирования с использованием дифференциальных расчётов, которые проводятся для двух сегментов, соединённых переходным участком.

В работах [10–17] по результатам анализа проведённых натурных экспериментов были смоделированы железнодорожные переходные зоны для прогнозирования их краткосрочного и долгосрочного поведения под повышенной поездной нагрузкой. Результаты показали, что прогиб рельса на переходном участке с насыпи на мост оказывает значительное влияние на величину динамического воздействия колеса на рельс, а также его вертикальное ускорение, величина которого в момент прохода колеса через контрольное сечение не должна превышать 0,1g, где g – ускорение свободного падения. Проведённый динамический анализ деформационных свойств мостового перехода и характера взаимодействия между составом и путём, позволил выявить основные факторы, влияющие на динамику процесса: скорость поездов по участку, деформацию от прогиба рельса, изменение жёсткостных характеристик подрельсового основания и др. При этом затухание вертикальных напряжений составляет 40 %–60 % на глубине 0,6 м, 80 %–90 % на глубине 2,5 м [18–21].

Цель исследования

Целью настоящего исследования являлось решение осесимметричной задачи моделирования конструкции участка переменной жёсткости из бездонных коробов, соответствующей прямому участку железнодорожного пути. Гипотезой исследования была возможность подобрать при заданном максимальном значении вертикального перемещения требуемые параметры жёсткости конструкции участка переменной жёсткости в трех основных направлениях анизотропии, что в дальнейшем позволяет сформулировать особенности проектирования и устройства данных конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика исследования

Для участков повышенной осевой нагрузки предлагается применение бездонных коробов, заполняемых балластным материалом (рис. 1). Высота коробов варьируется по длине переходного участка от максимальной (около устоя моста) до минимальной (в месте сопряжения с обычным путём) в пределах

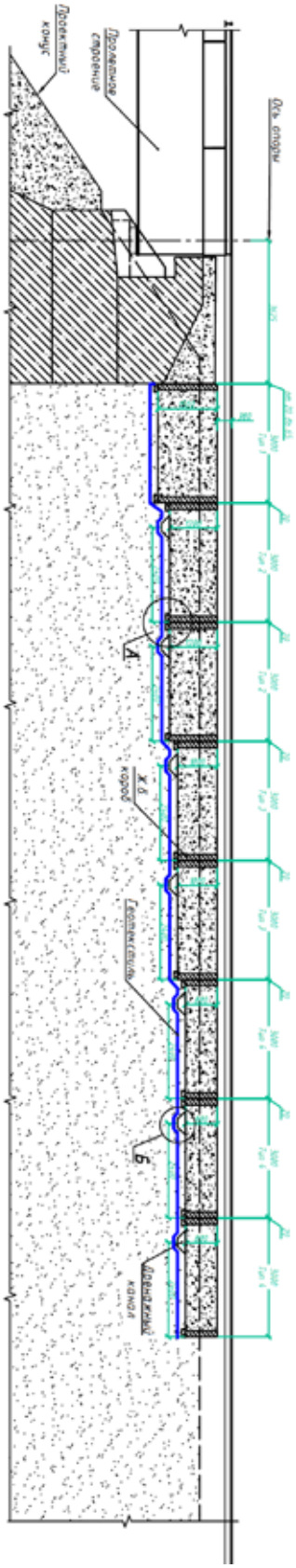


Рис. 1. Конструкция участка из бездонных коробов [схема подготовлена с участием автора].

2,5–0,8 м. При этом модуль деформации будет снижаться от места сопряжения ИССО с подходами по длине вдоль пути до 25 м от 130 МПа до 80 МПа (рис. 2).

Предлагается рассмотреть изменение частоты собственных колебаний конструкции участка переходной жёсткости для модельного плоского элемента с учётом взаимодействия с другими элементами конструкции пути, анизотропных свойств и различных граничных условий [22–25]. При этом верхнее строение железнодорожного пути и земляное полотно под ним на всю высоту насыпи представляется в виде набора слоёв постоянной толщины, плотно прилегающих друг к другу.

В отечественной и зарубежной литературе можно выделить два подхода к математическому моделированию таких сооружений. Первый подход заключается в агрегировании плоских послойных моделей с разнообразными свойствами в единую многослойную конструкцию. Второй подход основан на исследовании однослойной конструкции, для которой учитываются анизотропные свойства в различных направлениях анизотропии. Фактически изменение механических характеристик материала позволяет посредством использования приведённых величин моделировать неоднородные среды [26–28]. Модели, определяющие используемые для дальнейших расчётов уравнения, и в первом, и во втором случае необходимо дополнять граничными условиями на гранях и соприкасающихся поверхностях, а также с помощью начальных условий задавать особенности приложения динамической нагрузки от подвижного состава.

В настоящем исследовании за основу взят второй подход. Железнодорожный путь предлагается моделировать плоскими элементами, каждый из которых представлен анизотропной пластиной, опирающейся на деформируемое основание со своими параметрами деформативности. По контуру могут быть использованы различные краевые условия, варьируя которые, можно добиться хорошего соответствия реальной конструкции железнодорожного пути и её математической модели. Основными участками железнодорожного пути, для которых подходят такие, в целом не тривиальные подходы, являются участки переменной жёсткости перед и после искусственных сооружений на линейных объектах транспортной инфраструктуры.

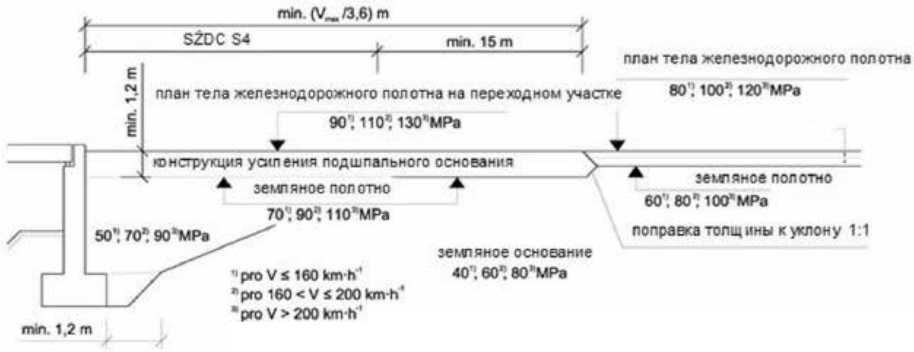


Рис. 2. Требование к конструкции переходного участка для моста с безбалластным полотном [9, рис. 23].

В качестве математической модели, описывающей динамическое поведение трансверсально-изотропной пластины, лежащей на деформируемом основании и испытывающей воздействие внешней нормальной нагрузки, имитирующей воздействие подвижного состава, предлагается использовать уравнение поперечных колебаний для трансверсально-изотропной пластины постоянной толщины, жёстко опёртой по всем четырём сторонам. Именно такое представление является наиболее приближённым при использовании конструкций железобетонных коробов, ограничивающих перемещения материала, находящегося внутри оболочки, по всем направлениям. Принимаем, что до начала приложения нагрузки плоский элемент расположен в области следующих координат $\{0 \le x \le l_1; 0 \le y \le l_2; -h \le z \le h\}$, а уравнение колебаний можно представить в виде:

$$A_1 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + A_2 \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} - A_3 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Delta W + A_4 \Delta^2 W + P(W) = 0, \quad (1)$$

где W – поперечное смещение точек срединной плоскости пластины;

Δ – оператор Лапласа.

При этом коэффициенты анизотропии имеют вид:

$$A_1 = \rho_1;$$

$$A_2 = \rho_1^2 \left(A_{33}^{-1} + 3A_{44}^{-1} \right) \frac{h^2}{b};$$

$$A_3 = \left\{ -\rho_1 \left[2 - 2A_{11}A_{33}^{-1} - 3\left(A_{13}^2 - A_{11}A_{33} \right) A_{33}^{-1} A_{44}^{-1} \right] \right\} \frac{h^2}{b};$$

$$A_4 = 2A_{33}^{-1} \left(A_{11}A_{33} - A_{13}^2 \right) \frac{h^2}{b};$$

$$A_5 = \frac{S}{2h} \rho_1;$$

$$A_6 = \frac{S}{2h} \rho_1 \frac{h^2}{2} \left(\rho_1 A_{44}^{-1} + 3A_{33}^{-1} \right);$$

$$A_7 = -4 \frac{S}{2h} \rho_1 A_{11} A_{33}^{-1},$$

где введены следующие обозначения:

$$P(W) = A_5 \frac{\partial W}{\partial t} + A_6 \frac{\partial^3 W}{\partial t^3} + A_7 \Delta \frac{\partial W}{\partial t}$$ – отпор;

ρ_1 – плотность;

b – скорость поперечной волны;

$A_{11} = A_{13} = \ldots = A_{nm}$ – коэффициенты анизотропии, определяющие соотношения механических характеристик элементов конструкции в разных направлениях.

В настоящем исследовании выделяются три основных направления изменения механических и геометрических характеристик конструкции: горизонтальное – вдоль рельсовых плетей, поперечное – вдоль шпал, а также вертикальное направление – вниз от уровня головки рельса.

Граничные условия для отдельных фрагментов конструкции пути в этом случае принимают вид:

$$W = \frac{\partial W}{\partial x} = 0; x = 0, l_1, \; W = \frac{\partial W}{\partial y} = 0; y = 0, l_2. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) строится в следующем виде:

$$W(x, y, t) = W(x, y) \exp\left(\xi \frac{bt}{h} \right), \quad (3)$$

где ξ – частота собственных колебаний пластины.

Тогда уравнение (1) можно представить в виде:

$$W(x, y)(\Delta^2 + B_1 \Delta + B_2) = 0. \quad (4)$$

Здесь

$$B_1 = \frac{1}{A_4} \left(-A_3 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^2 + A_7 \left(\frac{b\xi}{h} \right) \right);$$

$$B_2 = \frac{1}{A_4} \left(A_1 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^2 + A_2 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^4 + A_5 \left(\frac{b\xi}{h} \right) + A_6 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^3 \right). \quad (5)$$

Для удобства представления переменных величин и нахождения геометрических соотношений используем безразмерные координаты и функции прогиба:

$$x=\frac{l_1}{\pi}\alpha;\ y=\frac{l_2}{\pi}\beta;\ W(x,y)=V(\alpha,\beta)\frac{l_1^4}{\pi^4}. \qquad (6)$$

Учитывая безразмерные координаты и соотношение $\eta = l_1/l_2$, определяющее уравнение можно представить в следующем виде:

$$V(\alpha,\beta)\left(\begin{array}{l}\left(\frac{\partial^4}{\partial\alpha^4}+2\eta^2\frac{\partial^4}{\partial\alpha^2\partial\beta^2}+\eta^4\frac{\partial^4}{\partial\beta^4}\right)+\\ +B_1\frac{l_1^2}{\pi^2}\left(\frac{\partial^2}{\partial\alpha^2}+\eta^2\frac{\partial^2}{\partial\beta^2}\right)+B_2\frac{l_1^4}{\pi^4}\end{array}\right)=0. \qquad (7)$$

Для решения уравнения (7) воспользуемся методом декомпозиций, предполагающим разделение общей задачи на три вспомогательных, после решения каждой из которых результат предлагается агрегировать:

$$\frac{\partial^4 V_1}{\partial\alpha^4}=f_1(\alpha,\beta)\ \ V_1=\frac{\partial V_1}{\partial\alpha}=0\ \ \alpha=0,\pi;$$

$$\eta^4\frac{\partial^4 V_2}{\partial\beta^4}=f_2(\alpha,\beta)\ \ V_2=\frac{\partial V_2}{\partial\beta}=0\ \beta=0,\pi; \qquad (8)$$

$$\left[\begin{array}{l}2\eta^2\frac{\partial^4}{\partial\alpha^2\partial\beta^2}+\\ +B_1\frac{l_1^2}{\pi^2}\left(\frac{\partial^2}{\partial\alpha^2}+\eta^2\frac{\partial^2}{\partial\beta^2}\right)+B_2\frac{l_1^4}{\pi^4}\end{array}\right]V_3+f_1+f_2=0.$$

Согласно методу декомпозиций, будем приближённо полагать, что

$$V_1\cong V_2;V_3=\frac{1}{2}(V_1+V_2), \qquad (9)$$

а в заданных точках пластинки произвольные функции будем искать в виде:

$$f_i(\alpha,\beta)=\sum_{n,m=1}^{\infty}a_{n,m}^{(i)}\sin(n\alpha)\sin(m\beta), \qquad (10)$$

где $a_{n,m}^{(i)}$ – произвольные постоянные, где $i = 1,2$.

Общее решение вспомогательных задач будем искать в виде:

$$V_1(\alpha,\beta)=\sum_{n,m=1}^{\infty}\frac{a_{n,m}^{(1)}}{n^4}\sin(n\alpha)\sin(m\beta)+$$
$$+\frac{\alpha^3}{6}\psi_1(\beta)+\frac{\alpha^2}{2}\psi_2(\beta)+\alpha\psi_3(\beta)+\psi_4(\beta);$$

$$V_2(\alpha,\beta)=\sum_{n,m=1}^{\infty}\frac{a_{n,m}^{(2)}}{\eta^4 m^4}\sin(n\alpha)\sin(m\beta)+\frac{\beta^3}{6}\phi_1(\alpha)+$$
$$+\frac{\beta^2}{2}\phi_2(\alpha)+\beta\phi_3(\alpha)+\phi_4(\alpha), \qquad (11)$$

где $\psi_1(\beta)$ и $\varphi_1(\alpha)$ – произвольные функции.

Удовлетворяя общее решение граничным условиям и учитывая вспомогательные задачи, можно определить все произвольные функции $\Psi_1(\beta)$ и $\phi_i(\alpha)$ через систему:

$$\begin{cases}c_{11}a_{11}^{(1)}+c_{12}a_{11}^{(2)}=0\\ c_{21}a_{11}^{(1)}+c_{22}a_{11}^{(2)}=0\end{cases}, \qquad (12)$$

где

$$c_{11}=B_1\frac{l_1^2}{2\pi^2}\left[-1+\frac{2}{\pi}-\eta^2\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\right]+$$
$$+B_2\frac{l_1^4}{2\pi^4}\left(1-\frac{\pi}{4}\right)-\eta^2\left(-1+\frac{2}{\pi}\right)+1;$$

$$c_{12}=B_1\frac{l_1^2}{2\pi^2\eta^2}\left[-1+\frac{2}{\pi}-\frac{1}{\eta^2}\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\right]+$$
$$+B_2\frac{l_1^4}{2\pi^4}\frac{1}{\eta^4}\left(1-\frac{\pi}{4}\right)-\frac{1}{\eta^2}\left(-1+\frac{2}{\pi}\right)+1;$$

$c_{21} = 1;$

$c_{22} = -1/\eta^4.$

Неизвестные величины, входящие в систему определяющих функциональных уравнений, имеют не нулевое значение только при равенстве нулю главного определителя. Исходя из этого условия, можно получить характеристическое уравнение, разрешаемое относительно частот собственных колебаний плоской конструкции:

$$d_1\xi^4+d_2\xi^3+d_3\xi^2+d_4\xi+d_5=0, \qquad (13)$$

где

$$d_1=-\frac{A_2}{A_4}\frac{l_1^4}{\pi^4\eta^4}\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{b}{h}\right)^4;$$

$$d_2=-\frac{A_6}{A_4}\frac{l_1^4}{\pi^4\eta^4}\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{b}{h}\right)^3;$$

$$d_3=\frac{l_1^2}{A_4\pi^2\eta^2}\left\{\begin{array}{l}\frac{A_3}{2}\left[\begin{array}{l}\frac{2}{\pi}\left(\frac{1}{\eta^2}+2\right)-\\ -\left(\frac{1}{\eta^2}+1\right)\left(2-\frac{\pi}{4}\right)\end{array}\right]-\\ -A_1\frac{l_1^4}{\pi^4\eta^4}\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\end{array}\right\}\left(\frac{b}{h}\right)^2; \qquad (14)$$

$$d_4=-\frac{l_1^2}{A_4\pi^2\eta^2}\left\{\begin{array}{l}\frac{A_7}{2}\left[\begin{array}{l}\frac{2}{\pi}\left(\frac{1}{\eta^2}+2\right)-\\ -\left(\frac{1}{\eta^2}+1\right)\left(2-\frac{\pi}{4}\right)\end{array}\right]+\\ +A_5\frac{l_1^4}{\pi^4\eta^4}\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\end{array}\right\}\left(\frac{b}{h}\right);$$

$$d_5=\frac{2}{\eta^2}\left(-1+\frac{2}{\pi}\right)-\frac{1}{\eta^4}-1.$$

Если заменить бесконечный протяжённый плоский элемент на пластину с конечными размерами, то к описанным уравнениям можно добавить краевые условия по граням, в этом случае можно получить характеристическое уравнение относительно частот собственных колебаний. Варьируя параметры A_i и приводя их в соответствие с геометрическими и механическими характеристиками реальной конструкции железнодорожного пути, можно получить не только математическое решение инженерной задачи деформирования верхнего строе-

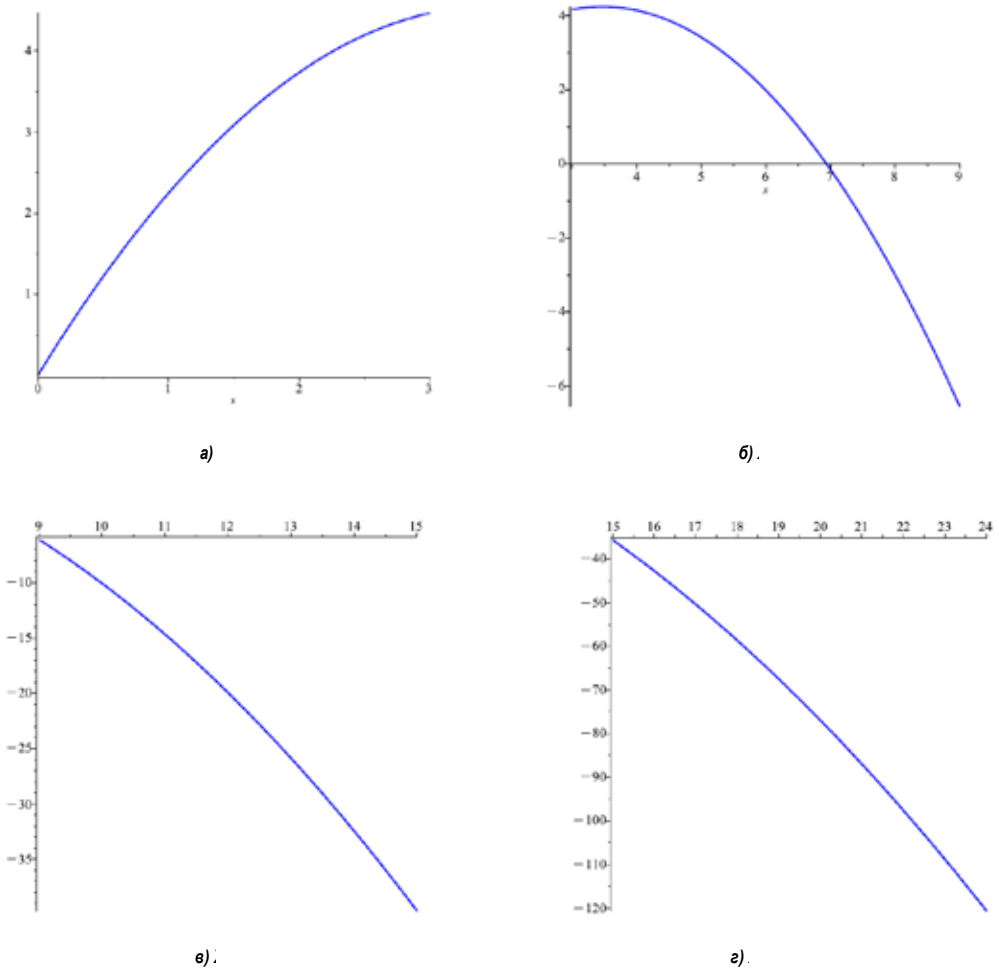


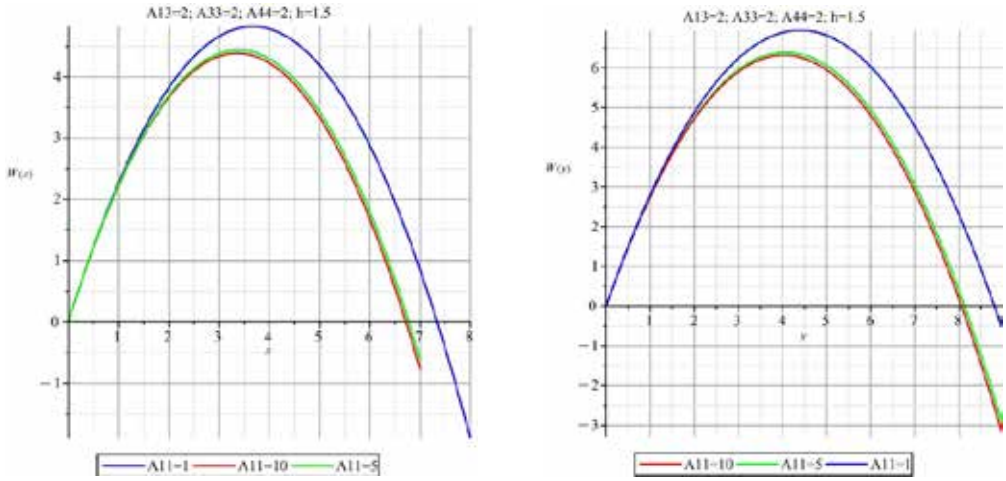
Рис. 3. Графики зависимости $W_{(x)}$ по длине участка переходной жёсткости:
а) x = 0–3 м; б) x = 3–9 м; в) ч = 9–15 м; г) x = 15–24 м при значениях A11 = 2, A1 = 1, A33 = 2 и A44 = 2
[графики построены при участии автора]:
А – коэффициент анизотропии; вертикальная ось (W) – величина прогиба рельса, мм;
горизонтальная ось (X) – координаты точки замера на рельсовой плети от начала рассматриваемого сегмента, м.

ния пути под подвижной динамической нагрузкой, но и апробировать различные элементы и процедуры технологических процессов содержания железнодорожного пути [29–30].

После определения частот собственных колебаний можно построить и проанализировать графические зависимости для вертикального перемещения точек медианной поверхности плоского элемента, моделирующего сегмент железнодорожного пути. Вертикальное перемещение вычисляется согласно соотношениям (3) и по факту представляет собой сумму всех возможных вертикальных перемещений (просадка, осадка, перекос, приведённый к одной из нитей и т. д.). Полученные значения могут быть сравнены с суммарными значениями некоторых величин, вносящих вклад в вертикальное перемещение точек пути и определяемых вагоном-путеизмерителем.

ОБСУЖДЕНИЕ

Описанная выше математическая модель была применена для проведения практических расчётов конструкции пути в пределах участка переменной жёсткости. Первые из построенных графиков (рис. 3а, б) показывают зависимость вертикального перемещения от координаты местоположения исследуемой точки конструкции вдоль рельсовой плети. Полученные результаты позволяют опреде-



а) б)

Рис. 4. Графики зависимости: а) $W_{(x)}$ и б) $W_{(y)}$ при разных наборах значений A11 [графики построены при участии автора]: A – коэффициент анизотропии; вертикальная ось – а) ($W_{(x)}$) – зависимость прогиба от значения перемещения вдоль рельсовой цепи, мм; б) ($W_{(y)}$) – зависимость прогиба от значения вертикального перемещения, мм; горизонтальная ось (X) – координаты точки замера на рельсовой плети, м.

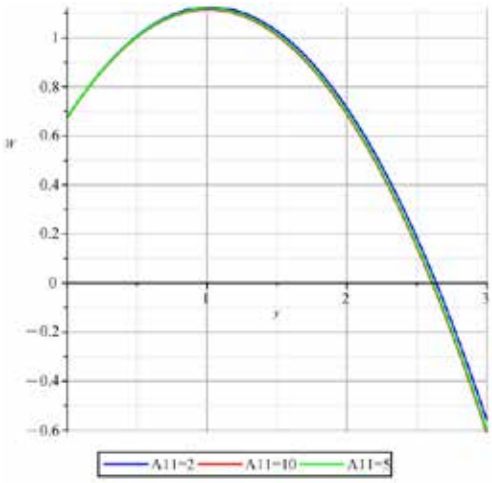


Рис. 5. График $W_{(y)}$ при изменении A11 [график построен при участии автора]: A – коэффициент анизотропии; вертикальная ось – ($W_{(y)}$) – зависимость прогиба от изменения жёсткости вдоль рельсовой плети, мм; горизонтальная ось (y) – координаты точки замера в поперечном направлении от оси пути, м.

лить места наибольших и наименьших перемещений при приложении динамической нагрузки, а также вычислить оптимальный размер сегмента конструкции железнодорожного пути (это может быть железобетонная плита, короб, кессон и т. д.) с точки зрения минимизации перемещений при фиксации механических (модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона и т. д.) и жёсткостных (изгибная, сдвиговая жёсткости, цилиндрическая жёсткость и т. д.) параметров, что является одной из основных характеристик эксплуатации железнодорожного пути.

Для заданных при расчётах параметров (для вертикального перемещения можно использовать максимальные значения, указанные в отечественных и зарубежных нормативных документах; они составляют порядка 10 мм) наибольший прогиб наблюдался в точке с координатой 3 м, а наименьший – в точке с координатой 6,8 м: в этом диапазоне и должны находиться размеры в плане для элементов конструкций, усиливающих участок пути перед или после искусственного сооружения или в иных местах с увеличенной осадкой железнодорожного пути.

Серия других графических зависимостей показывает влияние на вертикальный прогиб коэффициентов анизотропии в трёх основных направлениях. В качестве аргумента, как и в предыдущем случае, выступает координата искомой точки конструкции, отсчитываемая вдоль рельсовой плети от начала рассматриваемого сегмента (фактически, это начало железобетонного короба). Сравнивая отдельные кривые, можно отметить вклад анизотропных свойств конструкции железнодорожного пути в итоговое значение вертикального перемещения. При этом видно (рис. 4 а), что

увеличение приведённого параметра анизотропии вдоль рельсовой плети даже в два раза мало влияет на общее значение прогиба.

При увеличении жёсткости вдоль рельсов зависимость перемещения от координаты с момента возникновения максимального значения фактически параллельна характеристике с предыдущими значениями, это говорит о линейности влияния изменяемых параметров. Влияние анизотропии в вертикальном направлении (рис. 4 б) более интересно с точки зрения поведения функции прогиба: представленные графики $W_{(y)}$ пересекаются между собой практически в одной точке, величина прогиба в которой практически не зависит от параметров сцепления горизонтальных слоев между собой (именно эту характеристику можно увеличить, используя сваи или иные конструкции нагельного характера), а зависит от цилиндрической жёсткости самого железобетонного короба.

График $W_{(y)}$ при изменении A11 (рис. 5) также показывает незначительное влияние изменения жёсткости вдоль рельсовой плети на итоговую величину вертикального прогиба, интересным результатом является точка равенства нулю прогиба, фактически она означает геометрический размер короба в плане и может варьироваться для однопутного и двухпутного участка железной дороги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройство участка переходной жёсткости на подходах к искусственным сооружениям является необходимым элементом, позволяющим снизить риск возникновения остаточных деформаций и создающим предпосылки к сокращению расходов на текущее содержание железнодорожного пути в зоне подходов к ИССО. Устройство таких конструкций особенно актуально на участках высокоскоростного и тяжёловесного движения.

В работе рассмотрена осесимметричная задача моделирования конструкции участка переменной жесткости из бездонных коробов, соответствующая прямому участку железнодорожного пути. Задавая максимальное значение вертикального перемещения, указанное в отечественных и зарубежных нормативных документах, можно подобрать требуемые параметры жёсткости конструкции участка переменной жёсткости в трёх основных направлениях анизотропии, что позволит в дальнейших исследованиях перейти к рассмотрению конструктивных особенностей проектирования и устройства данных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Серебряков Д. В., Конон А. А., Ганчиц В. В. Исследование колебательных процессов в земляном полотне на участках сопряжения с мостами // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 9. – С. 9–11. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/item.asp?id=30026800. EDN: ZHBZLF [ограниченный доступ].

2. Иванова К. И., Колос А. Ф., Ван Кситонг. Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути // Транспорт БРИКС. – 2023. – Т. 2. – № 1. – С. 1–7. DOI: 10.46684/2023.1.4.

3. Джоунс К. Д. Сооружения из армированного грунта. Пер. с англ. В. С. Забавина / Под ред. В. Г. Мельника. – М.: Стройиздат, 1989. – 281 с. ISBN 5-274-00475-X.

4. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO. German Geotechnical Society, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Germany, 2011 (first published 09.01.2012). Print ISBN:9783433029831. DOI:10.1002/9783433600931 [частично ограниченный доступ].

5. Ольховская Е. В., Серебряков Д. В. Конструкции переходного пути на подходах к искусственным сооружениям на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях // Сб. трудов LXXXII Всероссийской научно-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в двух томах. Том 1. – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург), 2022. – С. 47–50. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/dmmclz [метаданные].

6. Меренченко К. В. Новые подходы к проектированию пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения / Транспортное строительство. 2014. – № 6. – С. 7–9. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/item.asp?id=21673959 [метаданные].

7. Fischer, S. Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. Acta Polytechnica Hungarica, 2022, Vol. 19, Iss. 3, pp. 89–101. DOI:10.12700/APH.19.3.2022.3.8.

8. Алтынников Д. С. Сравнительный анализ конструкций для усиления участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям на железных дорогах // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2017. – № 5. – С. 32–39. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30586243. EDN: ZTIHFP. Доступ 26.05.2023.

9. Новые конструкции переходных участков с насыпи на мост. Документ Р 760/4 (дата вступления в силу 21.10.2016). Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД), 35 с. [Электронный ресурс]: https://osjd.org/api/media/resources/11613. Доступ 26.05.2023.

10. Федоренко Е. Расчёты осадки, устойчивости и стабильности земляного полотна с геосинтетическими материалами путем численного моделирования // Инженерная защита. – 2014. – № 3 (3). – С. 34–38. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/item.asp?id=23144482. Доступ 26.05.2023.

11. Апшикур Б., Ипалаков Т. Т., Касымов Д. К. Расчёт напряженно-деформированного состояния земляного полотна, усиленного геосинтетическми материалами // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2019. –

№ 2. – С. 18–26. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44348774. EDN: PRKKOA. Доступ 26.05.2023.

12. Дружинина О. В., Локтев А. А., Ванюшаник И. С., Федорова С. В., Климова Д. В. Обобщенные спектры реакций для проектирования мостовых переходов транспортной инфраструктуры // В сб.: Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии. Материалы VII Международной научно-практ. конференции. – Елец, 2021. – С. 329–334. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46685164 [метаданные; полный текст сборника]. Доступ 26.05.2023.

13. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Решение задачи равенства деформаций вязких и упругих элементов подрельсового основания железнодорожного пути // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2022. – Т. 18. – С. 62–71. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50120155. Доступ 26.05.2023.

14. Loktev A. A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate. Acta Mechanica. 2011, Vol. 222, art. 17. DOI:10.1007/s00707-011-0517-8 [ограниченный доступ].

15. Сычёва А. В., Локтев А. А., Сычёв В. П. Управление жёсткостью пути на переходных участках // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 16–20. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44717335. EDN: BDXXXI [ограниченный доступ].

16. Джанмулдаев Б. Д., Локтев А. А., Аленов К. Т., Фазилова З. Т. Поперечные колебания секции плиты в основании безбалластного пути // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 2 (81). – С. 72–78. DOI:10.30932/1992-3252-2019-17-2-72-78.

17. Виноградов В. В., Локтев А. А., Фазилова З. Т. Математическое моделирование участков переменной жёсткости перед искусственными сооружениями // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 72–85. DOI:10.30932/1992-3252-2018-16-3-7.

18. Ашпиз Е. С., Замуховский А. В., Шмаков А. П., Салмин А. О., Кузнецова А. В. Исследование армирования защитного слоя плоской георешеткой // В сб.: Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца. – 2017. – С. 112–115. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xpqqxj [метаданные; полный текст сборника]. Доступ 26.05.2023.

19. Danyang Ji, Zheng Ma, Junjie Zhou, Yajun Li, Shuai Shao. A Coupled Discrete-Finite Element Method for Shear Strength Analysis of Geogrid-Reinforced Railway Ballast. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, art. ID 3685709. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/3685709.

20. Шапран В. В. Проектирование и реконструкция участков пути с переменной жесткостью // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2013. – Т. 6. – № 6 (6). – С. 124–131. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27034714. EDN: WTPPUX. Доступ 26.05.2023.

21. Марочка В. В., Бобошко С. Г., Тютькин А. Л. Натурные испытания участков с переходным показателем жесткости на подходах к железнодорожным мостам // В сб. Политранспортные системы. Материалы XI Международной научно-техн. конференции. – Новосибирск, 2020. – С. 59–63. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44896409&pff=1. EDN: VPUORU [метаданные; полный текст сборника]. Доступ 26.05.2023.

22. Loktev A. A., Fazilova Z. T., Zaytsev A. A., Borisova N. L. Analytical Modeling o the Dynamic Behavior of the Railway Track on Areas of Variable Stiffness. In: Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Vol. 1. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019 (Part of the Lecture Notes in Civil Engineering Book series, Vol. 49), 2020, Vol. 1. pp. 165–172. DOI:10.1007/978-981-15-0450-1_17 [ограниченный доступ].

23. Илларионова Л. А., Локтев А. А., Боков С. С. Динамическое воздействие экипажа на вязко-упругую плиту основания городского транспорта // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 1. – С. 52–56. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=chmokl. EDN: CHMOKL. Доступ 26.05.2023.

24. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Обоснование эффекта притормаживания упругой волны от воздействия колес подвижного состава на рельс с локализацией волны в зоне дефекта железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 3. – С. 25–30. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49518278. EDN: ZXFZPY. Доступ 26.05.2023.

25. Илларионова Л. А., Локтев А. А. Анизотропные конструкции при строительстве и ремонте железнодорожной инфраструктуры. Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2021. – Т. 17. – № 17. – С. 55–60. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45795349. EDN: KSSAYK. Доступ 26.05.2023.

26. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с. ISBN 5-277-02025-X.

27. Смирнов В. Н., Шестакова Е. Б., Чижов С. В., Антонюк А. А., Ледяев А. П., Индейкин А. В., Евтюков С. А. Динамическое взаимодействие высокоскоростных поездов с пролетными строениями и гибкими опорами Инженерно-строительный журнал. – 2017. – № 8 (76). – С. 115–129. DOI: 10.18720/MCE.76.11.

28. Chattopadhyay, S. Permanent indentation effects on the impact response of elastic plates. Journal of the Acoustical Society of America. 1987, Vol. 82, Iss. 2, pp. 493–497. DOI: https://doi.org/10.1121/1.395450 [ограниченный доступ].

29. Loktev A. A., Gridasova E. A., Zapol'nova E. V. Simulation of the railway under dynamic loading. Part 1. Ray method for dynamic problem. Contemporary Engineering Sciences. 2015, 8 (17–20), pp. 799–807. DOI:10.12988/CES.2015.57204.

30. Loktev, A., Sychev, V., Gridasova, E., Stepanov, R. Mathematical Modeling of Railway Track Structure under Changing Rigidity Parameters. Chapter in: Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. [Eds.]: Uvarova, L. A., Nadykto, A. B., Latyshev, A. V. Series: Theoretical and Applied Mathematics, 2017, Vol. 1, pp. 291–307. [Электронный ресурс]: https://novapublishers.com/shop/nonlinearity-problems-solutions-and-applications-volume-1/ [ограниченный доступ].

Информация об авторе:

Фазилова Зульфия Тельмановна *– кандидат технических наук, доцент кафедры транспортного строительства Российского университета транспорта, Москва, Россия, fazil_1905@mail.ru.*

Статья поступила в редакцию 26.05.2023, одобрена после рецензирования 23.06.2023, принята к публикации 10.07.2023.