МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Научная статья
УДК 625. 539.3
https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-1/18-26

Моделирование переходного участка железнодорожного пути балластной и безбалластной конструкции

Алексей Алексеевич Локтев, Лилия Алексеевна Илларионова✉

Российский университет транспорта,
Москва, Российская Федерация
✉ illarionova.roat@mail.ru

Аннотация. Современное развитие транспортных систем страны и отдельных населённых пунктов связано со строительством новых и реконструкцией существующих железнодорожных путей. Сочленение различных типов конструкций железнодорожного пути является «слабым местом» как с точки зрения расчётов элементов верхнего строения пути по предельным состояниям первой и второй группы, так и с точки зрения источника шума и вибрации из-за перепада жёсткостей основания. Статья посвящена разработке математической модели железнодорожного пути при переходе с балластной конструкции пути на безбалластную, что обеспечит плавное движение подвижного состава, а также даст возможность прогнозировать выбор материала и типа конструкции основания. Разрабатываемый подход направлен на создание двойного алгоритма, по которому можно проводить расчёт разных вариантов сочленения различных типов конструкций пути. Полученные решения могут быть обобщены на случай железнодорожного пути, проложенного по искусственным сооружениям.

Ключевые слова: железнодорожный путь, остаточная деформация, участок переменной жёсткости, осадка пути, уклон, упругая волна

Для цитирования: Локтев А.А., Илларионова Л.А. Моделирование переходного участка железнодорожного пути балластной и безбалластной конструкции // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 1(62). С. 18–26.

MECHANICS OF DEFORMABLE SOLIDS

Original article

Modeling of the transition section of a railway track with and without ballast structures

Alexey A. Loktev, Lilia A. Illarionova✉

Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation
✉ illarionova.roat@mail.ru

Abstract. The current development of the country's transport systems and individual settlements is associated with the construction of new and reconstruction of existing railway tracks. The articulation of various types of railway track structures is a "weak point" both from the point of view of calculating the elements of the upper structure of the track according to the limiting conditions of the first and second groups, and from the point of view of the source of noise and vibration due to the stiffness difference of the base. The article is devoted to the development of a mathematical model of a railway track during the transition from a ballast track structure to a ballast-free one, in order to ensure the smooth movement of rolling stock, and also make it possible to predict the choice of material and type of base structure. The solution being developed is aimed at creating a double algorithm, which can be used to calculate different cases of articulation of different path structures. The proposed solutions can be generalized to a railway track laid through artificial structures.

© Локтев А.А., Илларионова Л.А., 2025

***Keywords*:** railway track, residual deformation, section of variable rigidity, track draft, slope, elastic wave
For citation: Loktev A.A., Illarionova L.A. Modeling of the transition section of a railway track with and without ballast structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 1(62), pp. 18–26. (In Russ.).

Введение

В работе рассматривается проблема перехода в составе единого объекта транспортной инфраструктуры с традиционной конструкции железнодорожного пути, использующей в качестве основания для рельсошпальной решётки балластную конструкцию из щебня, на перспективную конструкцию железнодорожного пути на железобетонной плите. Важным аспектом является возможность увязки решений для определения параметров напряжённо-деформированного состояния в рельсах в рамках единой методики расчёта.

Развитие железных дорог в России в последнее время вызывает большой интерес. Оно затрагивает многие проблемы, одной из которых является увеличение скорости движения на железных дорогах. Для скоростного движения всё чаще выбирается безбалластная конструкция пути. Как уже известно, главной проблемой переходной зоны с обычной конструкции железнодорожного пути в виде рельсошпальной решётки на балласте и расположенной на земляном полотне на конструкцию безбалластного типа является разная степень упругости конструкций, что приводит к увеличению динамического напряжения на границе перехода. Многие отечественные и зарубежные авторы решают задачи движения экипажа по железнодорожному пути, состоящему из разных конструкций, учитывая демпфирование верхнего строения пути, армирование земляного полотна, использование длинных и сверхдлинных рельсовых плетей и применение композитных материалов и т.д., что сказывается на приведённую жёсткость пути. В ряде работ учитывается влияние анизотропных свойств верхнего строения железнодорожного пути на параметры динамической осадки низа балластной призмы. Подобные решения могут быть модифицированы и для низа подстилающего слоя под железобетонной плитой основания безбалластной конструкции [1].

Жёсткость железнодорожного пути является одним из основных параметров, определяющих взаимодействие пути и подвижного состава. Причём важна не столько величина жёсткости, сколько характер её изменения.

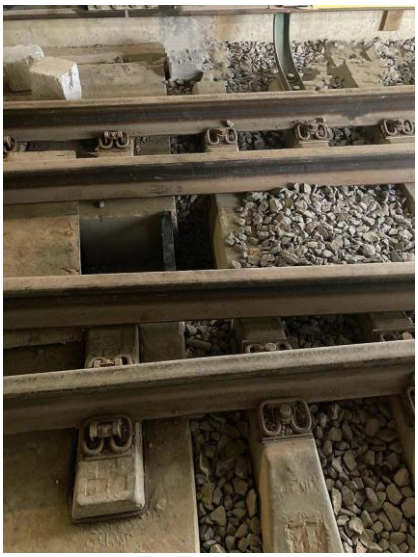


Рис. 1. Пример стыковки безбалластного железнодорожного пути и пути на балласте
Fig. 1. An example of connecting a railway track without ballast and a ballast track

Проблема переходных участков может усугубиться при эксплуатации железнодорожных путей поездами, движущимися с разной скоростью, оказывающими разную нагрузку и имеющими разную осевую конфигурацию. Переходные участки подвержены более высоким темпам разрушения, в основном из-за развития локальных осадков, которые усиливают дина-

мическое взаимодействие поездов и путей, тем самым приводя к росту деформации, которая ухудшает состояние компонентов путей и транспортных средств [2, 3, 4, 5].

Основной характеристикой при определении напряжённо-деформированного состояния железнодорожного пути является модуль упругости, который при расчётах на прочность позволяет определить связь между деформацией и прикладываемой нагрузкой на железнодорожный путь. В классических расчётах на прочность подразумевается, что жёсткость подрельсового основания распределена равномерно [6, 7]. Тем не менее реальное развитие путевой инфраструктуры говорит о том, что многие отдельные инженерные решения используются в составе одного линейного объекта (участка пути), это заставляет инженеров и исследователей усложнять используемые модели и агрегировать полученные решения.

В настоящей работе предлагается объединить решения для двух типов конструкций пути в рамках единого инженерного подхода, при этом начало продольных конструкций предлагается взять в точках стыкования балластной призмы и железобетонной путевой плиты (рис. 1).

Методы и подходы

В рамках предлагаемого подхода начало координат принимается на линии стыкования двух конструкций пути, влево от неё идёт положительная продольная координата (вдоль рельса). В зоне стыкования задаётся условие совместимости деформаций с учётом того, что напряжённо-деформированное состояние пути в разных типах конструкций определяется поразному и характеризуется разными параметрами деформирования.

В задаче напрямую не учитывается наличие дефектов конструкций пути, таких как негодность одиночных рельсовых скреплений и их кустов, наличие засорителей в балластном щебне, истираемость зёрен, их фракционный состав. Тем не менее эти факторы можно учесть в усреднённом виде посредством задания в геометрических и механических характеристиках пути [8].

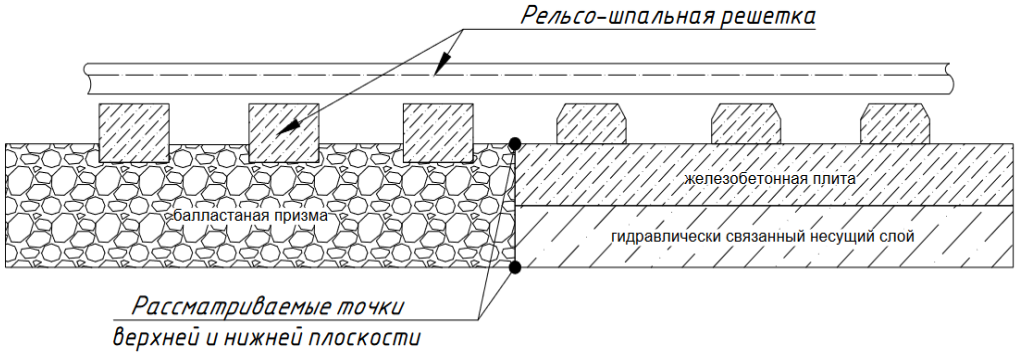


Рис. 2. Схема стыковки безбалластного железнодорожного пути и пути на балласте

Fig. 2. Connection diagram of a ballast-free railway track and a ballast track

Конструкция пути состоит из нескольких слоёв, каждый из которых обладает своей жёсткостью (жёсткостью компонента пути). Обычно такой слоистый композит не рассматривается в моделях напрямую, вместо этого вводится эффективная жёсткость конструкции, учитывающая свойства всех слоёв.

Жёсткость пути можно разделить на динамическую и статическую. Статической называется жёсткость, характеризующая сопротивление путевой структуры деформации под действием статической нагрузки. Динамическая жёсткость характеризует сопротивление структуры пути деформации при определённом динамическом возбуждении, которое определяется собственными частотами структуры пути. Динамическая жёсткость пути отражает опорную способность вибрирующей структуры пути и, следовательно, является важным фактором, влияющим на взаимодействие колеса и рельса, а также ходовые характеристики поезда.

Точность величины модуля упругости напрямую влияет на точность расчётов прогиба плети и возникающих в ней напряжений. На значение модуля упругости железнодорожного

пути одновременно влияет большое количество факторов, дающих при этом разный вклад: тип шпал, прокладок, земляного полотна, балластного слоя и т.д.

За основу расчёта рельсового пути на прочность с учётом переменной жёсткости основания воспользуемся расчётом рельсовой нити, когда основание под ней равноупругое, а приложенная к плети нагрузка вертикальная, при этом рассмотрим линейную зависимость модуля упругости и прогиба рельсовой плети. В нашем случае при решении задачи учитывается случай переменного модуля упругости основания с нелинейной поправкой вдоль вертикальной оси. Преобразование величины равноупругого основания решается путём определения малого параметра, который фактически имеет один градиент в границах приведённого слоя. Далее определяется влияние неравноупругости подрельсового основания на значение максимального прогиба.

Решение

При решении поставленной задачи используются следующие допущения: рельсовая плеть представляет собой бесконечную балку, подрельсовое основание неоднородное и неравноупругое, воздействие вертикальной нагрузки Q постоянное, также значение модуля упругости основания представлено нелинейной функцией от деформации рельсовой плети. В рассматриваемом случае стыковки двух типов конструкций пути параметры дифференциального уравнения для вертикального перемещения рельса примет следующий вид:

$$W(z) = W_0 + \alpha_1 W_1 z + \alpha_2 W_y z^2, \quad (1)$$

где E – значение модуля упругости рельсовой стали, J – момент инерции рельса; z – прогиб балки; W(z) – функция зависимости модуля упругости подрельсового основания по переменной z; $P(t)$ – внешняя сила воздействия от колёсной пары. Для задания внешних сил от подвижного состава используем функцию Хевисайда, t_0 – время прохода колёсной пары в заданную точку, фактически с этого момента времени перемещение записываем в виде (1), где W_0, W_1 – константы, $W_0 > W_1 > W_2$, α_1 и α_2 – экспериментальные постоянные величины.

При решении задачи примем, что W(z) – это нелинейная функция, показывающая зависимость перемещений и воздействующих усилий:

$z = z_{бал}$ – для левой части рис. 1;

$z = z_{пл}$ – для правой части рис. 1;

$z_{плэ}$ – вертикальное перемещение для плитного элемента безбалластного пути;

$z_{рэ}$ – вертикальное перемещение для плитного элемента, моделирующего по балочной схеме.

Уравнение для балочной схемы конструкции пути запишем в виде

$$EJ\frac{d^4 Z_{плэ}}{dx^4} + WZ_{плэ} = 0, EJ\frac{d^4 Z_{рэ}}{dx^4} + WZ_{рэ} = 0. \quad (2)$$

В зоне стыка конструкций выполняется условие совместимости деформаций для перемещений и их производных, что характеризует непрерывность рельсовой плети.

Введём следующие обозначения:

$z = z_{пл}$ при x>0; $z = z_{бал}$ при x<0.

Фактически индексы «пл» и «бал» определяют перемещения в окрестности рассматриваемой точки со стороны безбалластной конструкции и со стороны железнодорожного пути на балласте при подстановке уравнения (1) в уравнение (2).

Для нахождения $z_{пл}$, $z_{бал}$ решим следующие уравнения, учитывая граничные условия (4), (5):

$$EJ\frac{d^4z_{пл}}{dx^4}+Wz_{пл}=0, EJ\frac{d^4y_{бал}}{dx^4}+Wz_{бал}=0, \quad (3)$$

$$z_{пл}\Big|_{x=0}=z_{бал}\Big|_{x=0}, z'_{пл}\Big|_{x=0}=z'_{бал}\Big|_{x=0}, \quad (4)$$

$$z''_{пл}\Big|_{x=0}=z''_{бал}\Big|_{x=0}, z'''_{пл}\Big|_{x=0}=z'''_{бал}\Big|_{x=0}=\frac{Q}{EJ}. \quad (5)$$

Примем, что на бесконечном удалении от зоны стыка разных типов конструкций требуется перейти в уравнениях (3) от решения для балласта к решению для железобетонной плиты.

Решение уравнений предлагается искать в виде отрезков степенных рядов, которыми представляются искомые функции.

$$z_{пл}=z_{пл0}+\varepsilon z_{пл1}+\varepsilon^2 z_{пл2}, \quad (6)$$
$$z_{бал}=z_{бал0}+\varepsilon z_{бал1}+\varepsilon^2 z_{бал2}.$$

Учитывая уравнения (2), (3) с точностью до членов второго порядка малости O(ε2), получим следующие дифференциальные уравнения:

ε – параметр, фактически показывающий уменьшение перемещений при удалении от области контакта колеса рельса.

$$EJ\frac{d^4z_{пл1}}{dx^4}+z_{пл1}W_0=-\alpha_0 z_{бал0}^2-\alpha_1 z_{бал0}^3. \quad (7)$$

Решение данных функциональных уравнений можно представить в следующем виде:

$$z_{бал0}=\frac{Q}{8k^3EJ}e^{-kx}(\cos kx+\sin kx), z_{пл0}=\frac{Q}{8k^3EJ}e^{kx}(\cos kx-\sin kx), k=\sqrt{\frac{W^0}{4EJ}}. \quad (8)$$

Задаваясь начальными значениями $z_{пл0}$ и $z_{бал0}$ из представленного решения, можно определить слагаемые первых порядков в уравнении (7):

$$z_{пл0}=\frac{Q}{4\sqrt{2k^3EJ}}e^{-kx}\sin(kx+\psi), y_{бал0}=\frac{Q}{4\sqrt{2k^3EJ}}e^{kx}\sin(\psi-kx). \quad (9)$$

ψ – начальная фаза, зависящая от остающихся деформаций от предыдущей колёсной пары в момент прихода в исследованную точку следующей колёсной пары.

$$z_{пл1}=e^{-kx}(bcoskx+c\sin kx)+z_{пл0},$$
$$z_{бал1}=e^{kx}(bcoskx-c\sin kx)+y_{бал0}. \quad (10)$$

Значения функциональных коэффициентов b и c, определяющих конструктивные особенности пути, могут быть определены по экспериментальным данным на основе состояния конкурентного участка пути под поездной нагрузкой в различное время года.

Конструкция пути характеризуется нелинейностью материала и геометрической нелинейностью. Например, резиновая прокладка в системе скрепления имеет материальную нелинейность, а пустоты распределены между шпалой и балластом [9].

Для учёта нелинейности конструкции пути статическая жёсткость пути обычно рассчитывается по наклону линейной части кривой изменения нагрузки, по [10, 11].

В этом смысле касательная жёсткость и секущая жёсткость на кривой нагрузки или кривой разгрузки могут быть определены:

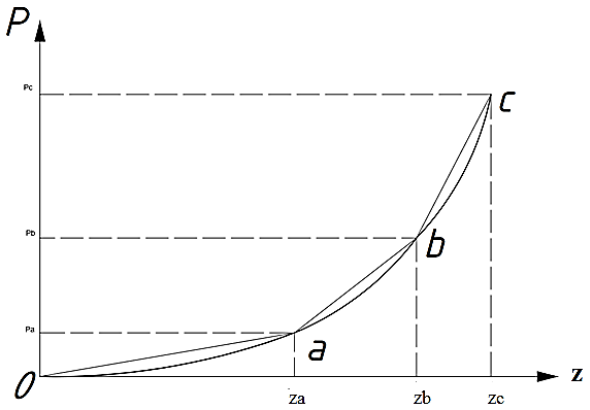


Рис. 3. Зависимость силы взаимодействия колеса и рельса от местной деформации в окрестности контакта

Fig. 3. The dependence of the force of interaction between the wheel and the rail on local deformations in the vicinity of the contact

Соотношение коэффициентов $K_{0-a}, K_{a-b}, K_{b-c}$ показывает не только зависимость силовой и геометрической компоненты напряжённо-деформированного соотношения, но и их характеристики, зависящие от особенности движения экипажа, его скорость, состояние поверхностей катания и жёсткость пути в целом [7].

$$K_{0-a}=\frac{-P_a}{z_a} \quad ,K_{a-b}=\frac{P_b-P_a}{z_b-z_a} \quad ,K_{b-c}=\frac{P_c-P_b}{z_c-z_b} \quad . \tag{11}$$

Значения слагаемого в разности задаются для рельсовой конструкции пути и во многом определяются состоянием поверхности катания колеса и рельса, то есть сменой коэффициентов типа выражения (11) также типом состояния рельсовых креплений.

Фактически максимальные амплитудные значения определяющих функций можно записать в следующем виде:

$$z_{пл0}=\frac{Qe^{-kx}}{4\sqrt{2k^3EJ}}, z_{бал0}=\frac{Q^{kx}}{4\sqrt{2k^3EJ}} \cdot \tag{12}$$

Параметры жёсткости основания зависят не только от геометрических и механических характеристик конструкции и её отдельных элементов, но и от характеристики внешнего динамического воздействия: частоты и интенсивности вынуждающих сил, амплитуды вертикальных и горизонтальных возмущений, скорости подвижного состава и его типа.

Если в первом приближении предположить, что нагрузка приводится к вертикальной гармонической силе, то при известном смещении точек конструкции жёсткость пути в отдельный момент времени может быть представлена с помощью следующего соотношения амплитудного значения силы к модулю динамического перемещения:

$$k_d=\left|\frac{P}{Z}\right|. \tag{13}$$

Согласно этому определению, динамическая жёсткость пути может быть принята для отражения характеристик жёсткости при устойчивых вынужденных колебаниях на определённой частоте.

Перемещение всей конструкции можно вычислить, послойно агрегируя величины, но можно и представить весь железнодорожный путь в виде однослойной конструкции, параметры которой меняются по градиенту с изменением высоты до рассматриваемой точки.

Общее однородное решение запишем традиционным образом:

$$z(x)=C_1U_1(Bx)+C_2U_2(Bx)+C_3U_3(Bx)+C_4U_4(Bx)+z^*(x) \cdot \tag{14}$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 имеют здесь совершенно определённый смысл. Каждое слагаемое определяет производную соответствующего порядка, каждая из которых вносит свой вклад в деформированное состояние элемента конструкции пути [11].

Действительно, если положить x=0 и воспользоваться физическим смыслом представленной функции, получим из соотношений (4), (5):

$$\begin{aligned} &z(0) = C_1; \\ &z'(0) = C_2 = \varphi_0; \\ &z''(0) = C_3 = -\frac{M_0}{EJ_z}; \\ &z'''(0) = C_4 = -\frac{Q_0}{EJ_z} \end{aligned} \tag{15}$$

Обсуждение результатов

Таким образом, используя граничные условия соотношения (4), (5), (15) для каждого порядка производной от перемещения, получим общее итоговое выражение для вертикальных перемещений:

$$z(x) = z(0)U_1(Bx) + z'(0)U_2(Bx) + z''(0)U_3(Bx) + z'''(0)U_4(Bx) + z^*(x),$$

$$z_n = z_I(Bx) + \sum_{i=1}^{n-1}\left\{-\frac{\triangle M_i}{EJ_z}U_3(Bx_i) - \frac{\triangle Q_i}{EJ_z}U_4(Bx) + \frac{\triangle q_i}{4EJ_z} \vdash [1 - U_1\,(Bx_i)]\right\}. \tag{16}$$

Таким образом, полученные решения для участка стыкований двух конструкций железнодорожного пути в общей форме соответствуют традиционному решению для балочной конструкции, а за счёт параметров, позволяющих детализировать данное соотношение для балласта и безбалласта конструкции с учётом описанного подхода, данное выражение может использоваться для самых современных конструкций объектов транспортной инфраструктуры.

Решение задачи в виде предложенных отрезков степенных рядов после постановки множителей можно записать после верификации функциональных коэффициентов.

Если ориентировать предложенную методику для проектирования учёта сопряжения двух типов конструкций железнодорожного пути, то можно алгоритм работы представить в виде следующей последовательности:

1. Строится графическая зависимость искомой функции согласно теоретическим исследованиям.

2. На графики накладывается кусочно-линейная функция из нормативно-технических документов.

3. Проверяются отклонения тангенса угла наклона секущей между двумя функциями, делается вывод о характере деформирования элементов и при необходимости меняются коэффициенты.

4. На график наносятся точки, полученные при экспериментальном исследовании.

5. Точки соединяются линиями, вычисляются углы с поправкой на точность проведения эксперимента.

6. Полученные значения подставляются в формулу для перемещений, усилий и напряжений, и т.д.

Предложенный подход позволяет совмещать решения для двух типов конструкций исходя из условий совместимости деформаций.

Заключение

Предложенное решение объединяет в себе два разных подхода к расчёту железнодорожного пути на железобетонном безбалластном основании и балластной призме. Использу-

ется математическая модель, основанная на применении отрезков степенных рядов для неизвестных функций. Абсолютные значения функциональных коэффициентов уменьшаются с увеличением показателя степени времени, который является основной переменной величиной. Поскольку ряд является знакопеременным, он сходится при учёте чётного числа слагаемых.

Полученные решения являются приближёнными, и на значительном удалении от места соединения двух разных типов конструкций использование различных методов для пути на балластном щебне и железобетонной плите не позволяет точно обеспечить выполнение условий совместимости деформаций.

Предложенный подход позволяет инженерам рассчитывать деформации (осадки) пути на участках переменной жёсткости, на подходах к искусственным сооружениям и в других местах резкой смены параметров жёсткости основания рельсошпальной решётки.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.А. Локтев – разработка концепции и алгоритма исследования; Л.А. Илларионова – получение аналитической выкладки, получение итоговых зависимостей.

A.A. Loktev – development of the research concept and algorithm; L.A. Illarionova – obtaining analytical calculations, obtaining final dependencies.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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/10.18720/MCE.76.11
2. Локтев А.А., Бучкин В.А., Виноградов В.В. Модели взаимодействия колеса и рельса при высоких скоростях движения // Мир транспорта. 2016. Т. 14, № 1(62). С. 54–60. EDN: VWEIAJ
3. 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 пролётными строениями и гибкими опорами // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8(76). С. 115–129. DOI: https://doi.org/10.18720/MCE.76.11
4. Сычева А.В. Управление жёсткостью пути на переходных участках // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 2. С. 16–20. EDN: BDXXXI
5. Шехтман Е.И., Черняева В.А., Чупырин А.А., Наумов А.В. Переходные участки бесстыкового пути, примыкающие к стрелочным переводам // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. № 3. С. 73–82. DOI: https://doi.org/10.20295/2223-9987-2024-03-73-82
6. Кругликов А.А., Ермолов Я.М., Хакиев З.Б., Окост М.В., Явна В.А. Оценка воздействия подвижного состава на переходные участки железнодорожного пути переменной жёсткости // Транспорт: наука, образование, производство: труды международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 12–15 апреля 2016 г. Т. 4. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2016. С. 78–82.
7. Шаповалов В.Л., Лазоренко Г.И., Явна В.А., Холодный З.В., Дорошкевич А.А. Расчёт конструкции сопряжения участков пути с различной жёсткостью // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 12. С. 12–14. EDN: RWTQFF
8. Иванова К.И., Колос А.Ф., Ван С. Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути // Транспорт БРИКС. 2023. Т. 2, № 1. DOI: https://doi.org/10.46684/2023.1.4
9. Chattopadhyay S. Permanent indentation effects on the impact response of elastic plates // Journal of the Acoustical Society of America. 1987. Vol. 82, Iss. 2. P. 493–497. DOI: https://doi.org/10.1121/1.395450
10. Ашпиз Е.С., Замуховский А.В., Шмаков А.П., Салмин А.О., Кузнецова А.В. Исследование армирования защитного слоя плоской георешёткой // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвящённые памяти профессора Г.М. Шахунянца.

Москва, 05–06 апреля 2017 г. Москва: МГУПС, 2017. С. 112–115. EDN: XPQQXJ
11. Шапран В.В. Проектирование и реконструкция участков пути с переменной жёсткостью // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2013. Т. 6, № 6(6). С. 124–131. EDN: WTPPUX.

REFERENCES

1. Fazilova Z.T. The impact of anisotropic properties of the rail track superstructure on the parameters of dynamic settlement of bridge approaches. *World of Transport*, 2023, vol. 21, no. 3(106), pp. 50–58. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-4
2. Loktev A.A., Buchkin V.A., Vinogradov V.V. Models of interaction of wheel and rail at high speed. *World of Transport and Transportation*, 2016, vol. 14, no. 1(62), pp. 54–60. (In Russ.).
3. Smirnov V.N., Shestakova E.B., Chizhov S.V., Antonyuk A.A., Ledyaev A.P., Indeikin A.V., Evtyukov S.A. Dynamic interaction of high-speed trains with spans and flexible supports. *Journal of Civil Engineering*, 2017, no. 8(76), pp. 115–129. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18720/MCE.76.11
4. Sycheva A.V. Railway track stiffness control on transition sections. *Track and Track Facilities*, 2021, no. 2, pp. 16–20. (In Russ.).
5. Shehtman E.I., Chernyaeva V.A., Chupyrin A.A., Naumov A.V. Transitional sections of continuous track adjacent to turnouts. *Bulletin of Scientific Research Results*, 2024, no. 3, pp. 73–82. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.20295/2223-9987-2024-03-73-82
6. Kruglikov A.A., Ermolov Ya.M., Khakiev Z.B., Okost M.V., Yavna V.A. Impact assessment of rolling stock in the transition sections of railway track with variable stiffness. *Transport: Science, Education, Production:* Proceedings of the international scientific and practical conference, Rostov-on-Don, April 12–15, 2016. Iss. 4. Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Engineering, 2016, pp. 78–82. (In Russ.).
7. Shapovalov V.L., Lazorenko G.I., Yavna V.A., Kholodny Z.V., Doroshkevich A.A. Calculation of the design of the connection of track sections with different stiffness. *Track and Track Facilities*, 2013, no. 12, pp. 12–14. (In Russ.).
8. Ivanova K.I., Kolos A.F., Wang S. Modulus of elasticity of non-ballasted track. *BRICS Transport*, 2023, vol. 2, no. 1. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.46684/2023.1.4
9. Chattopadhyay S. Permanent indentation effects on the impact response of elastic plates // Journal of the Acoustical Society of America. 1987. Vol. 82, Iss. 2. P. 493–497. DOI: https://doi.org/10.1121/1.395450
10. Ashpiz E.S., Zamukhovsky A.V., Shmakov A.P., Salmin A.O., Kuznetsova A.V. Study of reinforcement of protective layer with flat geogrid. *Modern Problems of Design, Construction and Operation of Railway Track.* Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants, Moscow, April 05–06, 2017. Moscow, MIIT, 2017, pp. 112–115. (In Russ.).
11. Shapran V.V. Design and reconstruction of track sections with variable stiffness. *Implementation of Modern Designs and Advanced Technologies in the Track Facilities*, 2013, vol. 6, no. 6(6), pp. 124–131. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Локтев Алексей Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство», Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация).

✉ aaloktev@yandex.ru https://orcid.org/0009-0004-5978-2219

Alexey A. Loktev, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Construction, Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation).

Илларионова Лилия Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство», Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация).

✉ illarionova.roat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3432-8982

Lilia A. Illarionova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Transport Construction, Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 22.01.2025.
Доработана после рецензирования / Revised: 27.02.2025.
Принята к публикации / Accepted: 18.03.2025.