

Научная статья
УДК 625.143.0+656.21.064.5
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_47

Интеграция физической нагрузочной и статистической деградационной моделей при прогнозировании ресурса верхнего строения железнодорожного пути для новых условий эксплуатации

Александр Сергеевич Ададунов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург,
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), Москва, Россия,
vorudada@ya.ru

Аннотация. В современной практике управления ресурсом верхнего строения железнодорожного пути используются два принципиально различных подхода к прогнозированию: физическое моделирование с учетом проходов подвижного состава с дефектными колесными парами и статистическое моделирование деградации пути с горизонтом до 15 лет. Указанные подходы развивались независимо и не имели методической связи, что ограничивало возможности прогнозирования для новых условий эксплуатации, не имеющих накопленного массива данных о деградации.

В статье предложена методика двусторонней интеграции физической нагрузочной модели (микроуровень) и статистической деградационной модели Единой корпоративной автоматизированной системы мониторинга деградации инфраструктуры ОАО «РЖД» (макроуровень). Интеграция осуществляется в двух направлениях: снизу вверх – вычисление коэффициентов деградации из физических параметров коэффициента эквивалентности (повреждаемости ε -го элемента верхнего строения пути от прохода колесной пары с дефектом поверхности катания, который определяет аналогичное число проходов бездефектной колесной пары, создающее ту же повреждаемость данного элемента, и наблюдаемой доли дефектованных колесных пар); сверху вниз – уточнение физических параметров по накопленным данным диагностики эталонных участков.

Показано, что характеристическая длительность накопленных данных, при которой вклады физической и статистической моделей равноценны, составляет $(3,5 \pm 0,8)$ года: при меньших сроках накопления прогноз преимущественно физический, при больших – статистический. Апробация методики выполнена для четырех участков Восточного полигона ОАО «РЖД» с обращением грузовых поездов массой 14 200 т. Среднее расхождение гибридного прогноза с фактическими данными составило 8–12 %, что превосходит точность отдельных моделей (15–25 % у статистической, 12–18 % у физической без калибровки). Предложенный подход существенно расширяет применимость прогнозирования ресурса верхнего строения пути для условий, в которых накопленный массив данных диагностики ограничен или отсутствует.

Ключевые слова: верхнее строение пути, деградация, нагрузочная модель, переходная деградационная функция, гибридное прогнозирование, тяжеловесное движение, правило Пальмгрена – Майнера, байесовское взвешивание, дефекты поверхности катания

Для цитирования: Ададунов А. С. Интеграция физической нагрузочной и статистической деградационной моделей при прогнозировании ресурса верхнего строения железнодорожного пути для новых условий эксплуатации // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 47–54. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_47.

Original article

Integration of physical load and statistical degradation models in predicting the resource of the upper structure of the railway track for new operating conditions

Aleksandr S. Adadurov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Railway Research Institute
of JSC Russian Railways (VNIIZhT), Moscow, Russia, vorudada@ya.ru

Abstract. In the modern practice of managing the resource of the upper structure of the railway track, two fundamentally different approaches to forecasting are used: physical modeling, taking into account the passages of rolling stock with defective wheelsets, and statistical modeling of track degradation with a horizon of up to 15

years. These approaches were developed independently and did not have a methodological connection, which limited the possibilities of forecasting for new operating conditions that did not have an accumulated array of degradation data.

The article proposes a method of bilateral integration of the physical load model (micro-level) and the statistical degradation model of the Unified Corporate Automated System for Monitoring the Degradation of the Infrastructure of Russian Railways, UCASMD (macro-level). The integration is performed in two directions: bottom-up – calculation of the degradation function coefficient from the physical equivalence coefficient and the observed proportion of defective wheelsets – and top-down – refinement of physical parameters from accumulated diagnostic data of reference sections.

The inverse-variance weighting principle is applied to determine the optimal balance between the two models. It is shown that the characteristic duration of accumulated data at which the contributions of the physical and statistical models are equal is (3.5 ± 0.8) years: below this threshold the forecast is predominantly physical, above it – predominantly statistical. The method was validated on four sections of the Eastern polygon of Russian Railways carrying 14,200-tonne freight trains. The average deviation of the hybrid forecast from actual data was 8–12 %, which outperforms the accuracy of the individual models (15–25 % for the statistical model, 12–18 % for the physical model without calibration). The proposed approach substantially extends the applicability of upper track structure resource forecasting to conditions where accumulated diagnostic data are limited or unavailable.

Keywords: upper track structure, degradation, load model, transition degradation function, hybrid forecasting, wheel flat, Palmgren–Miner rule, Bayesian weighting, track surface defects

For citation: Adadurov A. S. Integration of physical load and statistical degradation models in predicting the resource of the upper structure of the railway track for new operating conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):47–54. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_47.

Введение

Прогнозирование ресурса верхнего строения железнодорожного пути (ВСП) исторически развивалось в двух методически различных направлениях. Первое направление – физическое моделирование процессов взаимодействия колеса с рельсом и накопления повреждений в элементах пути, начатое М. Ф. Вериго, А. Я. Коганом, Н. Н. Кудрявцевым и продолженное современными исследователями [1, 2]. Второе направление – статистическое моделирование деградации ВСП на основе накопленного массива данных эксплуатации, реализованное в Единой корпоративной автоматизированной системе мониторинга деградации инфраструктуры (ЕК АСУИ СДМИ) и составившее научную основу деградационной модели ОАО «РЖД» 2025–2026 гг. [3, 4].

Физическое моделирование обеспечивает корректное описание механизма повреждения от единичного прохода дефектной колесной пары, включая эффект суперпозиции при множественных дефектах, влияние скорости движения, состояния балластного слоя и типа конструкции пути. Однако переход от единичного прохода к интегральному годовому ресурсу затруднен ввиду сложности учета всей совокупности проходящих по конкретному участку поездов. Статистическое моделирование, напротив, обеспечивает корректное описание интегрального ресурса на уровне перегона на горизонте до 15 лет, но требует наличия достаточного объема накопленных данных диагностики и теряет применимость при изменении условий эксплуата-

ции (введении новых типов подвижного состава, новых конструкций ВСП, новых режимов движения). В 2025 г. на сети ОАО «РЖД» началось регулярное обращение грузовых поездов массой 14 200 т на ряде участков Восточного полигона (Юрты – Иркутск, Слюдянка – Новоильинский, Петровский Завод – Хилок, Чита – Могоча, Уруша – Архара, Карымская – Хабаровск – Смоляниново). Для усиления конструкции ВСП на указанных направлениях применяются новые технические решения, в том числе рельсы Р71/Р75 с увеличенной на 10 % площадью поперечного сечения, шпалы III-ДБ с увеличенным на 40 % сопротивлением сдвигу, скрепления ЖБР-ПШТ и ЖБР-ШПР, подрельсовое полимерное покрытие ПШП. Для указанных условий эксплуатации отсутствует накопленный массив данных о деградации, что делает прямое применение статистической деградационной модели методически некорректным.

Таким образом, для решения задачи прогнозирования ресурса ВСП в новых условиях эксплуатации требуется развитие методической базы, обеспечивающей совместное использование физического и статистического подходов. Настоящая работа направлена на разработку такой методики двусторонней интеграции.

Материалы и методы исследования

Физическая нагрузочная модель оценки воздействия грузового подвижного состава на ВСП [5, 6] основана на разделении вагонопотока на бездефектную и дефектную составляющие и физически обоснованных коэффициентах эквивалентности для элементов ВСП. Ключевым

параметром модели является коэффициент эквивалентности $\eta_\varepsilon(h, V)$ повреждаемости ε -го элемента верхнего строения пути от прохода колесной пары с дефектом поверхности катания, который определяет аналогичное число проходов бездефектной колесной пары, создающее ту же повреждаемость данного элемента:

$$\eta_\varepsilon(h, V) = \left(\frac{Q_{\text{деф}}(h, V)}{Q_{\text{нор}}} \right)^{m_\varepsilon}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{деф}}(h, V)$ – пиковая сила удара колеса с дефектом глубины h при скорости V ; $Q_{\text{нор}}$ – статическая сила бездефектного колеса; m_ε – показатель нелинейности отклика ε -го элемента ВСП (из независимых физических теорий разрушения [7]: $m_p = 3$ для рельса, $m_{\text{ш}} = 2$ для шпал, $m_b = 2$ для подбалластного основания, $m_{\text{скр}} = 2,5$ для креплений).

В физической модели корректно описаны механизмы повреждения для любых сочетаний параметров (h, V) , включая новые конструкции и режимы. Но есть и методические ограничения. Это высокая чувствительность к точности эмпирических параметров и отсутствие стохастической природы накопления повреждений на интегральном уровне перегона. Дegradационная модель ВГДП ИСУЖТ ДМ опирается на накопленный массив данных систем КАС АНТ, КАСАТ, АСУ ВОП-3 и ЕК АСУИ СДМИ за 2015–2025 гг. и обеспечивает прогноз количества предупреждений об ограничениях скорости движения $N_{\text{огр}}(T)$ на горизонте до 15 лет как функцию пропущенного тоннажа T . Ядро модели составляют переходные деградационные функции вида

$$N_{\text{огр}}(T) = N_0 \exp\left(\frac{W_m T}{T_0}\right), \quad (2)$$

где N_0 – начальное (после планового ремонта) количество предупреждений; W_m – переходный деградационный коэффициент m -го целевого деградационного параметра; T_0 – характеристический тоннаж нормирования.

Экспоненциальная форма (2) обоснована условием постоянства интенсивности отказов в стационарных условиях эксплуатации (закон Маркова для систем с постоянной интенсивностью переходов между состояниями) и подтверждена эмпирически на участках сети с накопленным за длительный период массивом данных диагностики. Коэффициенты W_m определяются для четырех семейств деградационных параметров: количество предупреждений по причинам отступлений от норм геометрии рельсовой колеи (ГРК), количество остродефектных

рельсов (ОДР), количество отступлений по нормам выхода верхнего строения пути из исправного состояния, изменение загрязненности балластного слоя. Для участков сети с накопленным массивом данных длительностью пять и более лет коэффициенты W_m имеют статистически устойчивые значения и обеспечивают прогноз с точностью $\pm 25\%$ для 75 % перегонов при горизонте прогноза 15 лет.

Однако методические ограничения деградационной модели ВГДП ИСУЖТ ДМ, такие как неприменимость для условий без накопленного массива данных диагностики, невозможность объяснить причину деградации через физические механизмы взаимодействия дефектованного парка грузового подвижного состава с верхним строением пути, чувствительность к структурным изменениям парка обращающихся вагонов, определяют необходимость интеграции деградационной модели с физической нагрузочной моделью.

Несмотря на то что обе модели описывают один и тот же физический процесс – деградацию элементов ВСП под воздействием обращающегося подвижного состава, между ними отсутствует методическая связь, а преобразование между этими пространствами не выполнено ни в одной из известных публикаций по теме. Принципиальная схема двух подходов и их предлагаемого объединения представлена на рис. 1. Микроуровневая физическая нагрузочная модель использует данные систем стационарной диагностики (ПАУК – пост акустического универсального контроля, ППСС – интегрированный пост диагностики подвижного состава) [8] для декомпозиции вагонопотока на бездефектную и дефектную составляющие, расчета коэффициента эквивалентности η_ε для четырех элементов ВСП и формирования прогноза ресурса в форме силового эквивалента тоннажа (СЭТ). Макроуровневая статистическая деградационная модель опирается на накопленные данные систем КАС АНТ, АСУ ВОП-3 и СДМИ за период 2015–2025 гг., формирует переходные деградационные функции $N_{\text{огр}}(T)$ и позволяет спрогнозировать количество предупреждений об ограничениях скорости. Гибридная схема, представленная в настоящей работе, обеспечивает методическое объединение двух уровней через явные аналитические преобразования $\eta_\varepsilon \rightarrow W_m$ (снизу вверх – для условий без накопленного

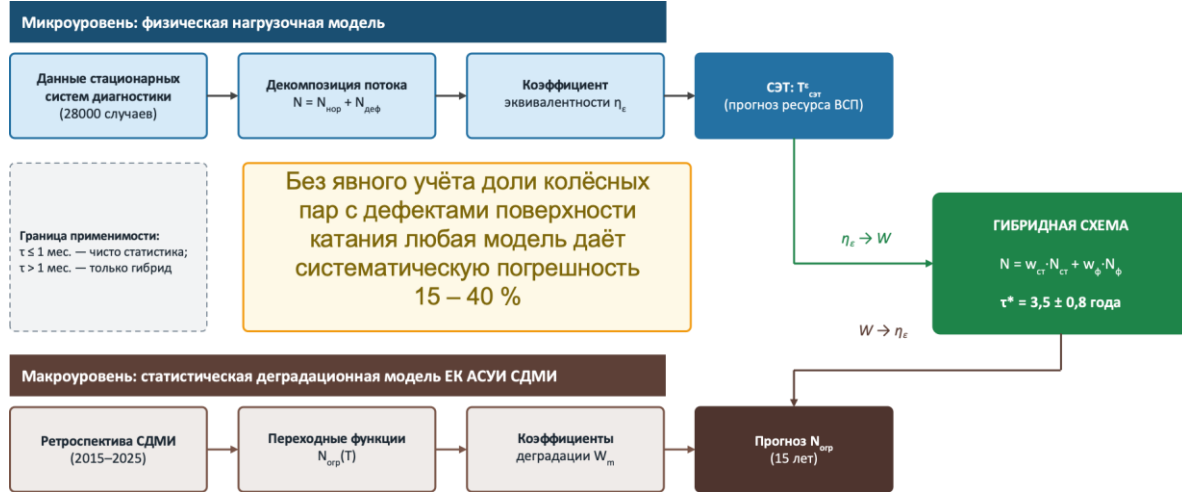


Рис. 1. Схема двусторонней интеграции физической нагрузочной модели и статистической деградационной модели

массива данных диагностики) и $W_m \rightarrow \eta_\epsilon$ (сверху вниз – для уточнения физических параметров по эталонным участкам).

Рассмотрим участок пути, через который за период t проходит $N(t)$ колесных пар, из них $N_{\text{деф}}(t)$ – дефектных, $N_{\text{нор}}(t)$ – бездефектных. Согласно правилу линейного накопления повреждений Пальмгрена – Майнера [9, 10], суммарная повреждаемость ϵ -го элемента ВСП от прохода N колесных пар выражается как сумма вкладов отдельных проходов:

$$D_\epsilon(t) = N_{\text{нор}}(t)d_{\text{нор}} + N_{\text{деф}}(t)d_{\text{деф}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{нор}}$, $d_{\text{деф}}$ – повреждаемость ϵ -го элемента ВСП от одного прохода бездефектного и дефектного колеса соответственно.

По определению коэффициента эквивалентности [см. формулу (1)]

$$d_{\text{деф}} = \eta_\epsilon d_{\text{нор}}. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (3) с учетом $\gamma = N_{\text{деф}}/N$ дает

$$D_\epsilon(t) = N(t)d_{\text{нор}}[(1 - \gamma) + \gamma \eta_\epsilon] = N(t)d_{\text{нор}}[1 + \gamma(\eta_\epsilon - 1)]. \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что эквивалентная интенсивность накопления повреждений в дефектном потоке отличается от интенсивности в бездефектном потоке множителем $[1 + \gamma(\eta_\epsilon - 1)]$. В физическом смысле этот множитель есть отношение фактической интенсивности деградации к интенсивности при бездефектном потоке.

Коэффициент W_m переходной деградационной функции (2) в физическом смысле прямо пропорционален интенсивности накопления повреждений в фактических условиях

эксплуатации. Поэтому соотношение (5) можно записать в виде

$$W_m^\epsilon(\gamma) = W_m^{\epsilon, \text{баз}}[1 + \gamma(\eta_\epsilon - 1)], \quad (6)$$

где $W_m^{\epsilon, \text{баз}}$ – базовое значение коэффициента деградации в условиях бездефектного потока (предел $\gamma \rightarrow 0$).

Формула (6) позволяет рассчитать коэффициент деградационной функции W_m для условий, в которых нет накопленных данных диагностики, исходя из физических параметров η_ϵ и наблюдаемой доли γ колесных пар с дефектами поверхности катания в обрабатываемом парке. Линейность формулы (6) по γ означает, что повышение доли дефектованного парка на 1 % приводит к увеличению скорости деградации на $(\eta_\epsilon - 1)/100$ раз.

Базовое значение $W_m^{\epsilon, \text{баз}}$ определяется из накопленного массива данных диагностики по эталонному направлению – участку с известной долей γ_0 колесных пар с дефектами поверхности катания и максимально полным объемом накопленных данных:

$$W_m^{\epsilon, \text{баз}} = \frac{W_m^{\epsilon, \text{факт}}(\text{эталон})}{1 + \gamma_0(\eta_\epsilon - 1)}. \quad (7)$$

В качестве эталонного направления для базовой калибровки в настоящей работе используется участок ПЧ-12 Кингисепп Октябрьской железной дороги, на котором доступен накопленный массив данных диагностики за период 2019–2025 гг. с фактическим значением $\gamma_0 = 1,9$ %. При наличии достаточного объема накопленного массива данных диагностики значения $W_m^{\epsilon, \text{факт}}$ по эталонному

участку являются более точной мерой фактической интенсивности деградации, чем расчетные значения по физической модели. Обращением соотношения (6) получаем выражение для уточненного значения η_ε :

$$\eta_{\varepsilon, \text{уточ}} = 1 + \left(\frac{w_m^{\varepsilon, \text{факт}}}{w_m^{\varepsilon, \text{баз}}} - 1 \right) / \gamma. \quad (8)$$

Уточненное значение $\eta_{\varepsilon, \text{уточ}}$ может затем применяться к новым условиям, для которых сохраняется физическая природа взаимодействия, но изменяются конкретные параметры эксплуатации. Это направление интеграции обеспечивает обратную связь физической модели с накопленным опытом эксплуатации.

Для произвольного перегона сети при наличии двух независимых оценок $\hat{N}_{\text{огр}}(T)$ (статистической) и $N_{\text{огр}}^\phi(T)$ (физической) гибридный прогноз вычисляется в виде линейной комбинации:

$$\hat{N}_{\text{огр}}(T) = w_{\text{ст}} N_{\text{огр}}^{\text{ст}}(T) + w_{\phi} N_{\text{огр}}^\phi(T), \quad (9)$$

где $w_{\text{ст}} + w_{\phi} = 1$; $w_{\text{ст}}, w_{\phi} \geq 0$.

Согласно теории оценивания оптимальное взвешивание двух несмещенных независимых оценок осуществляется по принципу обратной дисперсии [11, 12]:

$$w_{\text{ст}} = \frac{1}{\sigma_{\text{ст}}^2} / \left(\frac{1}{\sigma_{\text{ст}}^2} + \frac{1}{\sigma_{\phi}^2} \right), \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{ст}}^2$ – дисперсия статистической оценки; σ_{ϕ}^2 – дисперсия физической оценки.

После алгебраических преобразований

$$w_{\text{ст}} = \sigma_{\phi}^2 / (\sigma_{\text{ст}}^2 + \sigma_{\phi}^2). \quad (11)$$

Дисперсия физической модели σ_{ϕ}^2 определяется погрешностью оценки параметров (m_ε , η_ε , $k_{\text{суп}}$, γ) и не зависит от длительности наблюдений. Из анализа источников погрешностей [5, 6]:

$$\sigma_{\phi}^2 = \sigma_m^2 + \sigma_\eta^2 + \sigma_k^2 + \sigma_\gamma^2. \quad (12)$$

Предполагается, что указанные составляющие погрешности статистически независимы, поэтому суммарная дисперсия физической модели представляется в виде суммы частных дисперсий.

По центральной предельной теореме [13] при усреднении временного ряда наблюдений из τ лет дисперсия среднего убывает обратно пропорционально объему выборки:

$$\sigma_{\text{ст}}^2(\tau) = \frac{\sigma_0^2}{\tau}, \quad (13)$$

где σ_0^2 – дисперсия годовых наблюдений (характеристика «шума» в годовых рядах деградации); по эмпирическим данным ЕК АСУИ СДМИ за период 2015–2025 гг. для четырех семейств деградационных параметров (ГРК,

ОДР, ВСП, балласт) среднее значение $\sigma_0^2 = 0,087 \pm 0,019$.

Характеристическая длительность накопленных наблюдений τ^* определяется условием равенства дисперсий физической и статистической моделей:

$$\sigma_{\text{ст}}^2(\tau^*) = \sigma_{\phi}^2. \quad (14)$$

Из (13) и (14) непосредственно следует

$$\tau^* = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\phi}^2}. \quad (15)$$

Численная подстановка при $\sigma_0^2 = 0,087$ и $\sigma_{\phi}^2 = 0,025$ дает $\tau^* = 3,48$ лет. С учетом разброса оценок σ_0^2 и σ_{ϕ}^2 получаем

$$\tau^* = (3,5 \pm 0,8).$$

При длительности накопленных данных $\tau < \tau^*$ физическая модель точнее статистической и веса физического прогноза доминируют. При длительности накопленных данных $\tau > \tau^*$ статистическая модель точнее физической и веса статистического прогноза доминируют. Граница перехода – приблизительно 3,5 года накопленного массива данных диагностики. Графически условие равенства дисперсий (14) представлено на рис. 2.

Подстановка (13) в (11) с использованием $\tau^* = \sigma_0^2 / \sigma_{\phi}^2$ дает компактное окончательное выражение для весов гибридного прогноза:

$$w_{\text{ст}} = \frac{\tau}{\tau + \tau^*}, \quad w_{\phi} = \frac{\tau^*}{\tau + \tau^*}. \quad (16)$$

При $\tau < 1$ года вес статистической модели менее 22 % и прогноз преимущественно физический. При $\tau > 7$ лет вес статистической модели более 67 % и прогноз преимущественно статистический.

Это дает практический инструмент для изменения стратегии прогнозирования в зависимости от объема доступного накопленного массива данных диагностики (табл. 1).

Апробация методики выполнена для четырех участков Восточного полигона ОАО «РЖД», на которых с 2025 г. реализуется обращение грузовых поездов массой 14 200 т на новых типах конструкции ВСП. Характеристики участков представлены в табл. 2.

На примере участка Юрты – Иркутск гибридная схема, согласно (16), дает вес статистической модели $w_{\text{ст}} = 7 / (7 + 3,5) = 0,67$. Расчетный прогноз среднегодового количества предупреждений на интервале прогноза 5 лет составляет (142 ± 18) шт./(перегон·год), что эквивалентно суммарно (710 ± 90) предупреждений за пятилетний интервал. Фактическое

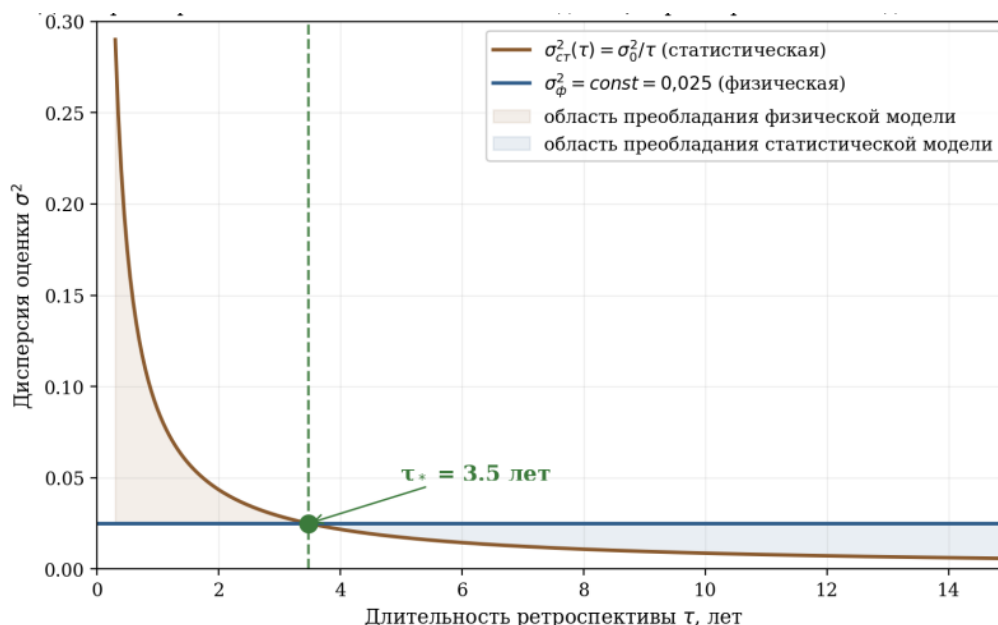


Рис. 2. Зависимость дисперсий статистической $\sigma_{\text{ст}}^2(\tau) = \sigma_0^2/\tau$ и физической $\sigma_{\text{ф}}^2 = \text{const}$ оценок от длительности накопленных наблюдений τ (точка пересечения определяет характеристическую длительность $\tau^* = 3,5$ года)

Таблица 1

Веса гибридного прогноза в зависимости от длительности накопленных наблюдений

τ , лет	$\sigma_{\text{ст}}^2(\tau)$	$w_{\text{ст}}$	$w_{\text{ф}}$	Стратегия
0 (новая конструкция)	∞	0	1,00	Только физика
1	0,087	0,22	0,78	Преим. физика
3,5	0,025	0,50	0,50	Равноценно
7	0,012	0,67	0,33	Преим. статистика
15 (макс.)	0,006	0,81	0,19	Только статистика

Таблица 2

Характеристики расчетных участков Восточного полигона

Участок	Дорога	Длина, км	Конструкция ВСП	Доля 14 200 т, %	γ парка, %
Юрты – Иркутск	ВСИБ	298	P65/КБ-65	8	2,1
Слюдянка – Новоильинский	ВСИБ	167	P65/ЖБР-65Ш	8	2,1
Чита – Могоча	ЗАБ	712	P71/Ш-ДБ	12	2,4
Уруша – Архара	ЗАБ	564	P71/ЖБР-ПШГ	12	2,7

значение в 2025 г. – 138 шт./ (перегон-год), расхождение 2,9 %. Сводное сопоставление гибридного прогноза с фактическими данными за 2019–2025 гг. по семи перегонам Восточного полигона (Юрты – Иркутск, Слюдянка – Новоильинский, Зима – Алзатай, Тулун – Тайшет, Шилка – Чернышевск, Сковородино – Магдагачи, Архара – Облучье) с подтвержденными накопленными данными диагностики дает среднее расхождение прогноза и факта в пределах 8–12 %, что лучше точности отдельных моделей (15–25 % – у статистической, 12–18 % – у физической при отсутствии калибровки). Примене-

ние чисто статистического подхода к прогнозированию деградации пути методологически некорректно для долгосрочных горизонтов, поскольку в текущей реализации ЕК АСУИ СДМИ статистическая модель не содержит γ в числе явных параметров и при изменении структуры дефектованного парка относительно эталонного участка дает систематическое смещение оценки коэффициента деградации W_m .

Принципиальная разница между тоннажным критерием (действующая нормативная база) и нагрузочным критерием на основе СЭТ показана на рис. 3. Тоннажный критерий оценивает ресурс

	Тоннажный критерий	Нагрузочный критерий (СЭТ)
Формула:	$D = T(t) / T_{\text{норм}}$	$D = N \cdot \int f(Q) \cdot W(Q) dQ$
Учёт колёс с ДПК:	Нет	Прямой через спектр Q_{max}
Зависимость от Q:	Линейная	Степенная: Q^3 (рельсы), Q^2 (балласт)
Учёт сезонности:	Нет	$K_{\text{зим}} = 1,7$ (зимний коэф.)
Учёт скорости:	Косвенный (через тоннаж)	Прямой через $Q(V)$
Источники:	Распоряжения 2499р, 2243р	Коган 1986, Краснов 2022

Рис. 3. Принципиальная разница между тоннажным критерием оценки ресурса верхнего строения пути (без учета колес с ДПК) и нагрузочным (с явным учетом)

пропорционально пропущенному брутто-тоннажу и не учитывает фактическое техническое состояние колесных пар обращающегося парка. Нагрузочный критерий через спектр Q_{max} и коэффициенты эквивалентности $\eta_{\text{е}}$ для четырех элементов ВСП обеспечивают учет колес с дефектами поверхности катания и сезонных режимов балластного слоя. Указанный принципиальный недостаток тоннажного критерия не устраняется ни увеличением статистической базы, ни усложнением структуры статистической модели, поскольку имеет физическую природу.

Выводы

Достоверность любой модели прогнозирования ресурса верхнего строения железнодорожного пути критически зависит от учета технического состояния колесных пар обращающегося грузового подвижного состава. Модели, не учитывающие данный фактор, в том числе чисто статистические деградационные модели, основанные исключительно на накопленных данных пропущенного тоннажа, допускают систематическую погрешность прогноза в диапазоне

15–40 % в зависимости от длительности накопленных данных и фактической доли дефектованного парка. Указанная погрешность не устраняется ни увеличением статистической базы, ни усложнением структуры модели, поскольку имеет физическую природу. Для долгосрочного прогнозирования ресурса ВСП (горизонт свыше года) статистическая составляющая может применяться только в составе гибридной схемы с учетом данных от воздействия дефектных колес через коэффициент эквивалентности $\eta_{\text{е}}$. Самостоятельное применение чисто статистической модели методологически оправдано лишь в задачах краткосрочного оперативного мониторинга геометрии рельсовой колеи. Гибридная схема прогнозирования обеспечивает корректное использование всей доступной информации: как накопленных данных диагностики (где они имеются), так и физико-механистической (для новых условий). Указанный подход существенно расширяет применимость прогнозирования ресурса ВСП в реальных условиях перевозочного процесса на сети ОАО «РЖД» [14, 15].

Список источников

1. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. Москва : Транспорт, 1997. 326 с.
2. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. Москва : Транспорт, 1986. 559 с.
3. Программная реализация расчетных алгоритмов методики прогноза деградации пути : материалы научно-технического совета. Москва : ВНИИЖТ, 2026. 28 с.
4. Долгий А. И., Виноградов С. А. Концептуальная модель интегрированной платформы стратегического планирования и управления инфраструктурой ОАО «РЖД». Москва : НИИАС, 2026. 84 с.
5. Романов А. В., Киселев А. А. К вопросу о законе распределения динамической силы воздействия колеса на рельс // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, № 4. С. 926–937.
6. Результаты моделирования воздействия колеса грузового вагона с двумя ползунами небраковочного размера на железнодорожный путь / А. С. Адауров, П. И. Цомаев, И. М. Подгребенный, А. Н. Иванов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2026. Т. 23, вып. 2. С. 40–48.
7. Краснов О. Г. Прогнозирование износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов для условий интенсификации грузового движения : специальность 2.9.2 «Железнодорожный путь, изыскание, проектирование

железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Краснов Олег Геннадьевич ; Российский университет транспорта. Москва : РУТ (МИИТ), 2022. 312 с.

8. Ададунов А. С., Суслов О. А. Экспериментальные исследования цифровых акселерометров и систем обнаружения дефектов поверхности катания колес подвижного состава на их основе // *Техника железных дорог*. 2019. № 3 (47). С. 40–45.

9. Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов / А. С. Ададунов, В. И. Федорова, А. В. Нерезков, О. А. Суслов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2021. № 1 (69). С. 192–199.

10. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue // *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. P. A159–A164.

11. Hartung J., Knapp G., Sinha B. K. *Statistical Meta-Analysis with Applications*. Hoboken, NJ : Wiley, 2008. 264 p.

12. Bernardo J. M., Smith A. F. M. *Bayesian Theory*. Chichester : Wiley, 2000. 586 p.

13. Cramér H. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 1946. 575 p.

14. Итоги производственно-хозяйственной деятельности путевого хозяйства за 12 месяцев 2025 года. Основные задачи на 2026 год : доклад Управления пути и сооружений ЦДИ ОАО «РЖД». Москва, 2026. 12 с.

15. Распоряжение ОАО «РЖД» от 18.08.2023 № 766/р. Стратегия развития Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД». Москва : РЖД, 2023. 53 с.

References

1. Kogan A. Ya. Track dynamics and its interaction with rolling stock. Moscow: Transport; 1997. 326 p. (In Russ.).
2. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Interaction of track and rolling stock. Moscow: Transport; 1986. 559 p. (In Russ.).
3. Software implementation of the calculation algorithms for the track degradation forecasting method. *Proceedings of the Scientific and Technical Council*. Moscow: VNIIZhT; 2026. 28 p. (In Russ.).
4. Dolgy A. I., Vinogradov S. A. Conceptual model of the integrated platform for strategic planning and infrastructure management of Russian Railways. Moscow: NIAS; 2026. 84 p. (In Russ.).
5. Romanov A. V., Kiselev A. A. On the distribution law of the dynamic wheel-rail contact force. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2025;22(4):926–937. (In Russ.).
6. Adadurov A. S., Tsomayev P. I., Podgrebenny I. M., Ivanov A. N. Results of modelling the impact of a freight car wheel with two sub-rejection wheel flats on the railway track. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2026;23(2):40–48. (In Russ.).
7. Krasnov O. G. Prediction of rail wear and contact-fatigue damage under intensified freight traffic conditions. Specialty 2.9.2 ‘Railway Track, Railway Surveying and Design’: dissertation for the degree of Doctor of Engineering; Russian University of Transport. Moscow: RUT (MIIT); 2022. (In Russ.).
8. Adadurov A. S., Suslov O. A. Experimental study of digital accelerometers and systems for detecting wheel tread defects of rolling stock. *Railway Engineering*. 2019;(47):40–45. (In Russ.).
9. Adadurov A. S., Fedorova V. I., Nerezkov A. V., Suslov O. A. Implementation results of the accelerometric universal monitoring post and further prospects for detecting wheel tread defects of railway cars. *Modern Technologies. System Analysis. Modelling*. 2021;(69):192–199. (In Russ.).
10. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*. 1945;12:A159–A164.
11. Hartung J., Knapp G., Sinha B. K. *Statistical Meta-Analysis with Applications*. Hoboken, NJ: Wiley; 2008. 264 p. (Ch. 3 “Weighted estimators and inverse-variance weighting”).
12. Bernardo J. M., Smith A. F. M. *Bayesian Theory*. Chichester: Wiley; 2000. 586 p.
13. Cramér H. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton, NJ: Princeton University Press; 1946. 575 p. (Central limit theorem, Ch. 17).
14. Results of track maintenance operations for 12 Months of 2025. Key objectives for 2026: Report of the Track and Structures Department, Central Infrastructure Directorate of Russian Railways. Moscow; 2026. 12 p. (In Russ.).
15. Order No. 766/r of Russian Railways, dated 18.08.2023. Development strategy of the Central Infrastructure Directorate of Russian Railways. Moscow: Russian Railways; 2023. 53 p. (In Russ.).

Информация об авторе

А. С. Ададунов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, заместитель директора НИАЦ АО «ВНИИЖТ».

Information about the author

A. S. Adadurov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Carriages and Carriage Maintenance Department of the St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Deputy Director of the NIAZ of JSC ‘VNIIZhT’.

Статья поступила в редакцию 25.05.2026; одобрена после рецензирования 24.06.2026; принята к публикации 25.06.2026.

The article was submitted 25.05.2026; approved after reviewing 24.06.2026; accepted for publication 25.06.2026.