

УДК 625.033.34

О необходимости учета типа грузовых вагонов при выборе вида статистического распределения вертикальных сил воздействия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН

А. Ю. Антонов, Л. С. Блажко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Антонов А. Ю., Блажко Л. С. О необходимости учета типа грузовых вагонов при выборе вида статистического распределения вертикальных сил воздействия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 117–125. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-117-125

Аннотация

Цель: выбор вида статистического распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс при движении грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН. **Методы:** по результатам эксперимента были определены вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс, возникающие при движении грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН. В зависимости от условий эксплуатации результаты эксперимента распределены по группам (массивам данных). Для каждого из них была выполнена статистическая обработка. **Результаты:** по итогам статистической обработки определено, что на вид распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс существенное влияние оказывает тип грузового вагона (цистерна, хоппер-дозатор, полувагон). В ряде случаев фактическое распределение вертикальных сил не соответствует нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса), в соответствии с которым осуществляется определение показателей напряженно-деформированного состояния пути, что, в свою очередь, может приводить к ошибкам в расчете напряжений и, как следствие, принятию нерациональных решений при организации технического обслуживания железнодорожного пути. Поэтому в соответствии с распределением Вейбулла была выведена аналитическая зависимость максимальной динамической силы воздействия колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) от коэффициентов (параметров) функций распределения Вейбулла, позволяющая наиболее точно определять площадь графика плотности вероятности распределения вертикальных сил. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть применены при определении показателей напряженно-деформированного состояния пути в соответствии с методикой оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности.

Ключевые слова: вертикальные силы воздействия колеса на рельс, расчет пути на прочность, нормальное распределение случайной величины, распределение Вейбулла

Согласно методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности (далее – методика) [1–5], ключевое влияние на определение параметров напряженно-деформированного состояния пути оказывает величина макси-

мальной динамической силы воздействия колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН), которая определяется как сумма среднего значения вертикальной силы P_{cp} (кН) и среднеквадратического отклонения дополнительных динамических вертикальных сил инерционного характера S , кН,

умноженных на показатель вероятности не превышения максимальной силы λ_{Φ} , принимаемый, как правило, равным 2,5, что соответствует вероятности 0,6 %:

$$P_{\text{дин}}^{\text{max}} = P_{\text{ср}} + \lambda_{\Phi} \cdot S \quad (1)$$

Данная формула принята к учету из условия соответствия статистического распределения вертикальных динамических сил взаимодействия пути и подвижного состава нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса).

Методика является одним из инструментов для принятия тех или иных технических решений, таких как:

- планирование этапов усиления конструкции железнодорожного пути;
- оценка напряженно-деформированного состояния конструкции пути при заданных условиях эксплуатации;
- определение нагрузок и скоростей движения поездов, при которых напряжения и деформации железнодорожного пути не будут превосходить допустимых значений;
- определение предельно допустимого тоннажа, после пропуска которого необходимо назначать ремонты пути;
- анализ причин схода подвижного состава, а также причин нарушения прочности и устойчивости железнодорожного пути [6–9].

Следовательно, весомую роль играют не только значения напряжений, получаемые в результате решения всей последовательности расчета пути на прочность, но и промежуточные результаты расчета — значения средних сил и изгибающих моментов.

Поэтому с целью проверки соответствия распределения вертикальных сил, определенных в результате эксперимента, нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса) был выполнен статистический анализ результатов измерения силового воз-

действия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН.

Проверка гипотезы о применимости нормального закона распределения случайной величины при статистической обработке результатов экспериментального определения вертикальных сил воздействия колеса на рельс на участке обращения грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН

В период с июня 2022 года по октябрь 2023 года на участке с 128-го км ПК 9 + 38,00 по 129-й км ПК 3 + 49,00 (кривая радиусом 620 м с уклоном 6,8 ‰) перегона Веймарн — Котлы-2 направления Веймарн — Усть-Луга, расположенного в Кингисеппском районе Ленинградской области, сотрудниками кафедры «Железнодорожный путь» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» проводилась комплексная оценка влияния длинносоставных и тяжеловесных поездов, сформированных из вагонов с осевой нагрузкой 230,5 кН и 245,0 кН, на изменение показателей вертикальных сил воздействия колеса на рельс [10–11].

Участок проведения эксперимента имел следующие характеристики: рельсы Р65, промежуточные скрепления АРС-4, железобетонные шпалы (эпюра — 2000 шт./км), расстояние между осями шпал — 51 см, балластный слой — щебеночный с толщиной 50 см под шпалой. Грузонапряженность — 139,9 млн т брутто на км в год, пропущенный тоннаж — 785,2 млн т брутто. По данным прохода вагона-путеизмерителя, на момент проведения эксперимента фактический радиус кривой составлял 632 м.

В ходе эксперимента записывались вертикальные динамические силы, которые возникают от действия колес подвижного состава, не имеющих неровности на поверхности катания

и приводящих к ударно-динамическому взаимодействию колеса и рельса. Следовательно, величина вертикальной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) формировалась только за счет дополнительных сил инерции неподрессоренных масс, возникающих при прохождении колесом изолированной неровности на пути $P_{\text{ни}}$ (кН), а также из-за наличия непрерывных неровностей на поверхности катания колес $P_{\text{ник}}$ (кН) и раскатанных неровностей на поверхности катания колес $P_{\text{инк}}$ (кН), что соответствует условиям методики.

На участке проведения эксперимента обрабатывались четырехосные грузовые поезда с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН, состоящие из цистерн, хоппер-дозаторов и полувагонов. Средние скорости движения были равны 61,3 км/ч для цистерн, 54 км/ч для хоппер-дозаторов и 48,2 км/ч для полувагонов. Расчетный модуль упругости подрельсового основания U составлял 110 МПа для внутреннего рельса кривой и 130 МПа для наружного, а расчетный коэффициент относительной жесткости подрельсового основания и рельса k — 1,3248 и 1,4354 соответственно.

По результатам предварительного анализа распределения вертикальных динамических сил было принято решение о выделении из общего массива данных шести групп результатов в зависимости от типа грузовых вагонов и рельсовой нити (внутренней или наружной) в кривой радиусом $R = 632$ м. В соответствии с методами статистической обработки экспериментальных данных [12–14] были определены статистические показатели: математическое ожидание M_x (кН), дисперсия S^2 , среднеквадратическое отклонение S и коэффициент вариации v (табл. 1).

Для каждой группы были получены гистограммы распределения вертикальных сил (рис. 1–3).

Анализ полученных гистограмм показал, что площади графиков плотности вероятности распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс при обращении грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН могут быть описаны другими функциями статистических распределений с большей точностью, чем законом нормального распределения случайной величины (закон Гаусса).

ТАБЛИЦА 1. Результаты статистической обработки гистограмм распределения в соответствии с нормальным законом распределения случайной величины и оценка по χ^2 -критерию Пирсона

Группа	1	2	3	4	5	6
Тип грузовых вагонов	Цистерны		Хоппер-дозатор		Полувагоны	
Нить кривой	внутр.	наруж.	внутр.	наруж.	внутр.	наруж.
Число случаев, шт.	867	826	253	242	1436	1368
Математическое ожидание M_x	123,23	100,77	143,64	104,82	133,66	96,57
Ср. кв. отклонение S	23,7	13,2	13,3	11,0	13,9	10,0
Дисперсия S^2	560,3	174,4	177,1	121,2	192,2	99,0
Коэффициент вариации v , %	19,2	13,1	9,3	10,6	10,4	10,3
χ^2 -критерий Пирсона	204,8	45,8	296,7	63,0	1855,4	59,1
Вероятность α	менее 0,01					



Рис. 1. Гистограмма частот ω распределения вертикальных сил на внутреннюю рельсовую нить кривого участка пути и кривая нормального распределения (цистерны)

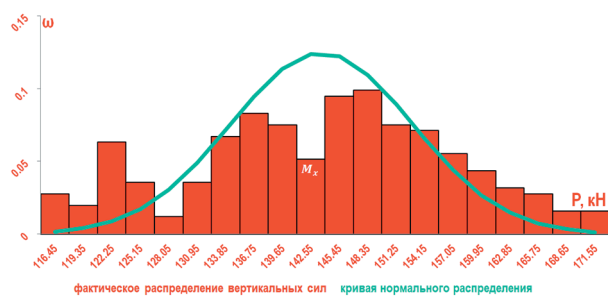


Рис. 2. Гистограмма частот ω распределения вертикальных сил на внутреннюю рельсовую нить кривого участка и кривая нормального распределения (хоппер-дозаторы)

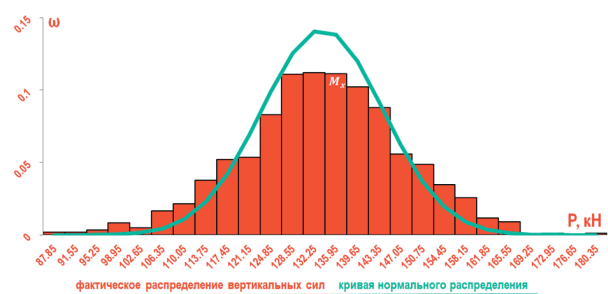


Рис. 3. Гистограмма частот ω распределения вертикальных сил на внутреннюю рельсовую нить кривого участка пути и кривая нормального распределения (полувагоны)

Необходимость поиска альтернативного закона распределения случайных величин объясняется тем, что применение нормального

закона распределения может приводить к неточностям расчета показателей напряженно-деформированного состояния пути:

1. На гистограммах распределения вертикальных сил воздействия колеса на внутренний рельс кривой радиусом 632 м измеренных при обращении грузовых поездов, составленных из цистерн и хоппер-дозаторов (рис. 1–2), наблюдается наличие двух и более вершин (мод). Применение в таком случае величины математического ожидания M_x (кН) вместо моды M_0 (кН) может приводить к неточностям расчета напряжений, так как величина математического ожидания $M_x = P_{\text{ср}}$ (кН) является составляющей формул максимальных эквивалентных сил, учитывающих нагрузку от соседних осей тележки:

$$P_{\text{эkv}}^I = P_{\text{дин}}^{\text{max}} \sum \mu_i P_{\text{ср},i}, \quad (2)$$

$$P_{\text{эkv}}^I = P_{\text{дин}}^{\text{max}} \sum \eta_i P_{\text{ср},i}, \quad (3)$$

где μ_i и η_i — ординаты линии влияния изгибающих моментов рельса и ординаты линии влияния прогибов рельса в сечениях пути, расположенных под колесными нагрузками от осей экипажа, смежных с расчетной осью.

2. На гистограммах распределения вертикальных сил воздействия колеса на внутренний рельс кривой радиусом 632 м измеренных при обращении грузовых поездов, составленных из хоппер-дозаторов и полувагонов (рис. 2–3), заметно, что площади крайних частей графика плотности вероятности существенно превышают площадь графика плотности вероятности нормального распределения. В таком случае вероятность превышения максимальной динамической силы от колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) будет больше 0,6%, что не соответствует заложенным в методику допущениям.

С целью установления соответствия полученных гистограмм распределения вертикаль-

ных сил нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса) была произведена проверка нулевой гипотезы H_0 по χ^2 -критерию Пирсона. Для всех рассматриваемых массивов данных вероятность по χ^2 -критерию Пирсона составила менее 0,01, следовательно, нулевая гипотеза H_0 о нормальном законе распределения случайной величины не подтверждается (табл. 1).

Учитывая, что цистерны, хоппер-дозаторы и полувагоны составляют 100 %-ную долю в потоке грузовых поездов, обрабатываемых на экспериментальном участке, появляется необходимость поиска вида статистического распределения, позволяющего с большей точностью производить описание графика плотности вероятности распределения вертикальных сил, чем закон Гаусса.

Описание площади графика плотности вероятности распределения вертикальных сил воздействия подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН в соответствии с распределением Вейбулла

Распределение Вейбулла получило широкое распространение в теории надежности, изучающей закономерности распределения отказов технических устройств и конструкций, причины и модели их возникновения.

Плотность вероятности распределения при $x > 0$ равна:

$$f(x) = \frac{k}{x} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^k \right), \quad (4)$$

где e — число Эйлера (2,71828...),

λ — коэффициент масштаба,

k — коэффициент формы,

x — определяемый параметр.

Функция распределения при $x > 0$ равна:

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^k \right). \quad (5)$$

В соответствии с результатами статистической обработки гистограмм распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс (рис. 1–3) и РД 26.260.004-91 «Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации» [15] были определены значения величин коэффициентов масштаба λ и формы k .

Далее по χ^2 -критерию Пирсона была произведена проверка нулевой гипотезы H_0 о соответствии распределения вертикальных динамических сил взаимодействия колеса и рельса, возникающих при проходе подвижного состава с осевой нагрузкой 235–250 кН, согласно распределению Вейбулла, и выполнен подбор значений коэффициентов масштаба λ и формы k соответствующим наименьшим значениям по χ^2 -критерию Пирсона.

В результате исследования было определено, что применение закона распределения Вейбулла позволяет более точно производить описание площади графика плотности вероятности распределения вертикальных сил. Так, например, при $k = 8,9$ и $\lambda = 0,958$ величина соответствия фактического распределения вертикальных сил при движении грузовых поездов, составленных из полувагонов, по внутренней нити кривой по χ^2 -критерию Пирсона составила 141,12 (для кривой нормального распределения она была равна 1855,40 (рис. 4).

Следовательно, можно говорить о том, что выражение функции двухпараметрического распределения Вейбулла допустимо использовать для статистического описания распределения вертикальных динамических сил взаимодействия колеса и рельса.

С целью вывода практической формулы, предназначенной для определения максимально вероятной динамической силы воздействия колеса на рельс, сформулируем задачу

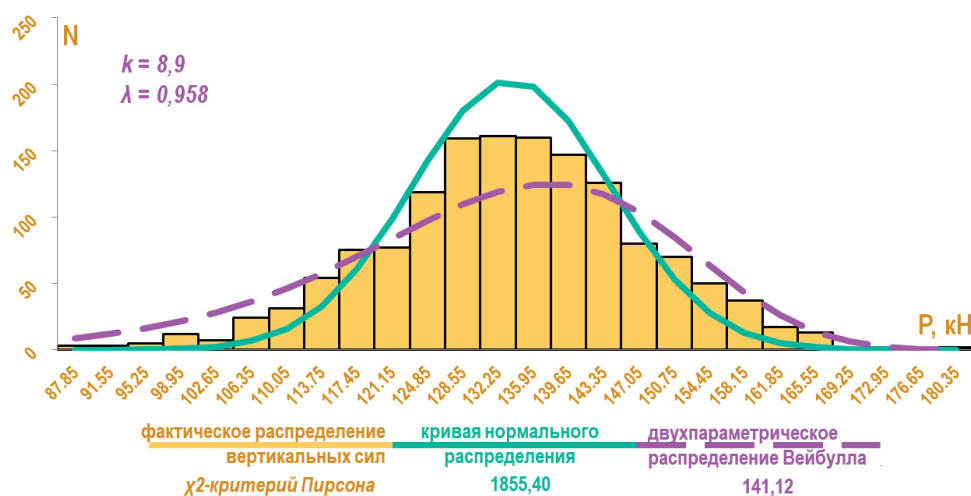


Рис. 4. Гистограмма частот N распределения вертикальных (полувагоны, внутренняя нить), кривые нормального распределения и распределения Вейбулла

определить величину $x = P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН), которая с вероятностью α будет соответствовать фактической максимальной динамической силе P_{α} .

$$P(P_{\text{дин}}^{\text{max}} \geq P_{1-\alpha}). \quad (6)$$

Искомая вероятность может быть найдена с использованием функции распределения:

$$F(P_{\text{дин}}^{\text{max}} \geq P_{\alpha=0,006}) = 1 - F(P_{\text{дин}}^{\text{max}} < P_{\alpha=0,994}) =$$

$$= 1 - \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{P_{\text{дин}}^{\text{max}}}{\frac{P_{Mx}}{\lambda}} \right)^k \right) \right) = \exp \left(- \left(\frac{P_{\text{дин}}^{\text{max}}}{\frac{P_{Mx}}{\lambda}} \right)^k \right) = \alpha. \quad (7)$$

Таким образом, формула максимально вероятной динамической силы воздействия колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) примет вид:

$$P_{\text{дин}}^{\text{max}} = \frac{P_{Mx}}{\lambda} \cdot \sqrt[k]{\ln \frac{1}{\alpha}}, \quad (8)$$

где P_{Mx} — математическое ожидание распределения Вейбулла.

Отметим, что при $\lambda=1$ теоретическая кривая распределения Вейбулла сместится и математическое ожидание распределения Вейбулла P_{Mx} будет соответствовать среднему значению вертикальной динамической силы воздействия колеса на рельс P_{cp} (кН). Следовательно, для приближенного вычисления величины $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) может быть рекомендована формула

$$P_{\text{дин}}^{\text{max}} = P_{\text{cp}} \cdot 5,116^{\frac{1}{k}}, \quad (9)$$

где k — коэффициент формы распределения Вейбулла.

В соответствии с результатами эксперимента заданная вероятность непревышения величины максимально вероятной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) (0,6 %) обеспечивается для внутреннего и наружного рельсов, соответственно при k , равном 4,4 и 4,7 для цистерн, 8,8 и 5,2 для хоппер-дозаторов и 5,3 и 5,3 для полувагонов.

Это говорит о том, что предложенная функциональная зависимость может быть применена для определения величины максимальной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) при расчете пути на прочность.

Заключение

По итогам статистической обработки результатов измерения силового воздействия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН было определено, что при прочих равных условиях (одно и то же поперечное сечение пути, одинаковые значения скоростей движения и осевых нагрузок) на вид статистического распределения вертикальных сил оказывает влияние тип грузового вагона, предназначенного для перевозки того или иного вида груза (цистерна, хоппер-дозатор, полувагон), способного перемещаться в пределах вагона (жидкий, газообразный, сыпучий груз) в процессе движения подвижного состава.

В ряде случаев распределение вертикальных сил воздействия колеса на рельс не соответствует нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса), что может приводить к ошибкам в определении величин напряжений в элементах верхнего строения пути. Поэтому был рассмотрен вопрос о необходимости поиска статистического закона, позволяющего учитывать тип вагона грузового поезда при определении показателей напряженно-деформированного состояния пути.

Для более точного определения площади графика плотности вероятности распределения вертикальных сил воздействия подвижного состава на путь и величину максимальной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) в соответствии с распределением Вейбулла была получена функциональная зависимость, которая может быть использована при определении показателей напряженно-деформированного состояния пути, а также определены значения коэффициентов формы k и масштаба λ для грузовых поездов, имеющих в составе различные типы вагонов: цистерны, хоппер-дозаторы и полувагоны.

Список источников

1. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706р.
2. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. МПС РФ от 16.06.2000 № ЦПТ–52/14. М., 2000. 40 с.
3. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 1. С. 26–30.
4. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 2. С. 38–40.
5. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 3. С. 34–37.
6. Клинов С.И. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. М.: МИИТ, 1984. 115 с.
7. Шахунянц Г.М. Устройство железнодорожного пути: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Трансжелдориздат, 1944. 481 с.
8. Вериги М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
9. Амелин С.В., Яковлева Т.Г., Шульга В.Я. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1990. 367 с.
10. Отчет о научно-исследовательской работе «Выполнение второго этапа испытаний для формирования данных по сравнению динамического воздействия (в том числе сил, напряжений в элементах верхнего строения пути и земляного полотна, параметров вибрации) на участках пути с различным грузооборотом для вагонов с осевой нагрузкой 25 тс на участках Октябрьской железной дороги». СПб.: ПГУПС, 2023. 219 с.
11. Отчет по работе «Оптимизация взаимодействия в системе «колесо — рельс», разработка и актуализация

нормативных документов ОАО «РЖД» в рамках повышения несущей способности и эксплуатационного ресурса верхнего строения пути». СПб.: ПГУПС, 2023. 303 с.

12. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.

13. Кокс Д., Льюис П. Статистический анализ последовательности событий / пер. с англ. И. А. Маховой и В. В. Рыкова, под ред. Н. П. Бусленко. М.: Мир, 1969. 312 с.

14. Шорохова И. С., Кисляк Н. В., Мариев О. С. Статистические методы анализа: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 300 с.

15. РД 26.260.004-91, методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.

Дата поступления: 26.01.2026

Решение о публикации: 28.02.2026

Контактная информация:

АНТОНОВ Антон Юрьевич — ст. преподаватель кафедры «Железнодорожный путь»;
antonov@pgups.ru

БЛАЖКО Людмила Сергеевна — профессор кафедры «Железнодорожный путь»;
blazhko@pgups.ru

Accounting for the type of freight wagons in determining the statistical distribution of vertical track forces generated by rolling stock with axial loads of 230.5–245.0 kN

A. Yu. Antonov, L. S. Blazhko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Antonov A. Yu., Blazhko L. S. Accounting for the Type of Freight Wagons in Determining the Statistical Distribution of Vertical Track Forces Generated by Rolling Stock with Axial Loads of 230.5–245.0 kN // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 117–125. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-117-125. (In Russian)

Abstract

Objective: when determining the statistical distribution of vertical forces acting on the track for heavy-haul rolling stock (230.5–245.0 kN axial load), it is essential to account for the specific type of freight wagons. **Methods:** vertical dynamic wheel-rail forces generated by freight trains with axial loads of 230.5–245.0 kN were measured experimentally. Subsets of the observed data were separated based on wagon type and operational conditions. Separate statistical analysis was performed on each subset. **Results:** statistical analysis indicated that wagon type (tank, hopper dispenser, or gondola) significantly affects the statistical form of vertical wheel-rail forces. In a number of cases, the actual distribution of vertical forces does not follow the normal probability distribution law (Gaussian distribution), which is traditionally assumed when estimating track stress-strain indicators. Thus, this mismatch may induce errors in stress calculations and, consequently, lead to inefficient decision-making in railway track maintenance planning. To address this, an analytical relation was derived – based on Weibull distribution – linking the maximum dynamic wheel-rail force P_{max} (kN) to the parameters of the Weibull distribution functions. This dependence enables a more accurate determination of the area under the probability density curve of vertical forces. **Practical significance:** the findings of the study can be applied to improve the precision of stress assessments and to inform indicators of the stress-strain state of the track in accordance with the Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track to ensure its reliability.

Keywords: vertical forces of the wheel on the rail, calculation of the strength path, normal random variable distribution, Weibull distribution

References

1. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 22.12.2017 No. 2706r. (In Russian)

2. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. MPS RF ot 16.06.2000 No. TsPT-52/14. M., 2000. 40 s. (In Russian)

3. Obshchie polozheniya metodiki otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po kriteriyam prochnosti i nadezhnosti / V. O. Pevzner [i dr.] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2019. No. 1. S. 26–30. (In Russian)

4. Obshchie polozheniya metodiki otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po kriteriyam prochnosti i nadezhnosti / V. O. Pevzner [i dr.] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2019. No. 2. S. 38–40. (In Russian)

5. Obshchie polozheniya metodiki otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po kriteriyam prochnosti i nadezhnosti / V. O. Pevzner [i dr.] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2019. No. 3. S. 34–37. (In Russian)

6. Klinov S. I. Raschety verkhnego stroeniya puti na prochnost' i ustojchivost': uchebnoe posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. M.: MIIT, 1984. 115 s. (In Russian)

7. Shakhunyants G. M. Ustrojstvo zheleznodorozhnogo puti: uchebnyy dlya vuzov zh.-d. transporta. M.: Transzheldorizdat, 1944. 481 s. (In Russian)

8. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava. M.: Transport, 1986. 559 s. (In Russian)

9. Amelin S. V., Yakovleva T. G., Shul'ga V. Ya. Osnovy ustrojstva i raschetov zheleznodorozhnogo puti. M.: Transport, 1990. 367 s. (In Russian)

10. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote "Vypolnenie vtorogo etapa ispytaniy dlya formirovaniya

dannykh po sravneniyu dinamicheskogo vozdeystviya (v tom chisle sil, napryazhenij v elementakh verkhnego stroeniya puti i zemlyanogo polotna, parametrov vibratsii) na uchastkakh puti s razlichnym gruzooborotom dlya vagonov s osevoj nagruzkoj 25 ts na uchastkakh Oktyabr'skoj zheleznoj dorogi". SPb.: PGUPS, 2023. 219 s. (In Russian)

11. Otchet po rabote "Optimizatsiya vzaimodeystviya v sisteme "koleso — rel's", razrabotka i aktualizatsiya normativnykh dokumentov OAO "RZhD" v ramkakh povysheniya nesushchej sposobnosti i ekspluatatsionnogo resursa verkhnego stroeniya puti". SPb.: PGUPS, 2023. 303 s. (In Russian)

12. Kremer N. Sh. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: uchebnyy dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po ekonomicheskim spetsial'nostyam. 3-e izd., pererab. i dop. M.: YUNITI-DANA, 2010. 551 s. (In Russian)

13. Koks D., L'yuis P. Statisticheskij analiz posledovatel'nosti sobytij / per. s angl. I. A. Makhovoj i V. V. Rykova, pod red. N. P. Buslenko. M.: Mir, 1969. 312 s. (In Russian)

14. Shorokhova I. S., Kislyak N. V., Mariev O. S. Statisticheskie metody analiza: uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015. 300 s. (In Russian)

15. RD 26.260.004-91, metodicheskie ukazaniya. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii. (In Russian)

Received: 26.01.2026

Accepted: 28.02.2026

Author's information:

Anton Yu. ANTONOV — Senior Lecturer of the Department of "Railway Track"; antonov@pgups.ru

Lyudmila S. BLAZHKO — Professor of the Department of "Railway Track"; blazhko@pgups.ru