

УДК 625.17

Выбор функции зависимости вероятности появления остаточных деформаций от нагрузок при определении оптимальных возвышений наружного рельса в кривом участке пути

В. П. Бельтюков, А. В. Андреев

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

Для цитирования: Бельтюков В. П., Андреев А. В. Выбор функции зависимости вероятности появления остаточных деформаций от нагрузок при определении оптимальных возвышений наружного рельса в кривом участке пути // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 83–91. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-83-91

Аннотация

Цель: определение возвышения наружного рельса в кривом участке железнодорожного пути по Руководству по определению возвышения наружного рельса 2021 года производится с учетом непогашенных ускорений, радиусов и скоростей (допускаемых и допустимых). Учет этих показателей позволяет определить наилучшие величины возвышений наружного рельса с точки зрения эксплуатационных характеристик. Но данные возвышения нельзя назвать оптимальными с точки зрения объемов работ, выполняемых при текущем содержании пути в кривых. Для определения оптимального возвышения наружного рельса следует рассмотреть затраты труда на протяжении жизненного цикла кривого участка. Так как на протяжении жизненного цикла на появление затрат влияют в основном остаточные деформации, то было принято решение рассмотреть вероятность появления остаточных деформаций на протяжении жизненного цикла. **Методы:** выбор функции зависимости вероятности появления остаточных деформаций от нагрузок производился на основе теории вероятности и регрессионного анализа. В качестве метода регрессионного анализа был взят метод наименьших квадратов. На его основе были выбраны функции с наибольшей сходимостью относительно функции, полученной при использовании теории вероятности. **Результаты:** выявлено, что динамическая нагрузка, появляющаяся при движении подвижного состава по железнодорожному пути, описывается функцией нормального распределения теории вероятности. Так как часть динамических нагрузок, появляющихся в процессе эксплуатации, сопряжена с появлением остаточных деформаций, то и вероятность появления остаточных деформаций тоже можно определить с помощью функции нормального распределения. Определена функция зависимости вероятности появления остаточных деформаций от нагрузок. **Практическая значимость:** результаты научного исследования можно использовать при определении оптимального возвышения наружного рельса, которое позволит минимизировать объемы затрат труда при эксплуатации железнодорожного пути.

Ключевые слова: возвышение наружного рельса, непогашенное ускорение, динамическая нагрузка, критическая сила, остаточные деформации

Введение

В связи с возможным нерациональным возвышением наружного рельса в кривых участках пути в период с 2016 по 2018 год ОАО «РЖД» были проведены исследования непогашенных ускорений и возвышений наружного рельса в кривых.

На первом этапе (силами ВНИКТИ, ИЦ ВЭИП и Хекса) были определены величины вертикальных и боковых сил в кривых с помощью нагрузочных комплексов. Исследования показали, что, как и предполагалось, минимальные нагрузки имеют место при непогашенном ускорении, равном 0 м/с^2 , но при этом затраты на содержание пути необязательно будут минимальными. Данные исследования не учитывали влияние объемов работ (затрат труда) при эксплуатации кривых участков пути на общие затраты при эксплуатации кривых.

Целью научной работы являлось определение зависимости объемов работ и затрат на содержание пути от возвышений наружного рельса в его кривых участках. Увеличение объемов работ и неисправностей происходит из-за увеличения непогашенных ускорений вследствие изменения возвышения наружного рельса. Поэтому необходимо было выявить влияние силовых воздействий (непогашенных ускорений) на интенсивность развития неисправностей (остаточных деформаций).

Расчет возвышения наружного рельса по существующей и предлагаемой методике

Расчетное возвышение в Руководстве по определению возвышения наружного рельса 2021 года [1, 2] определяется на основе трех расчетных возвышений, зависящих от предельных допускаемых непогашенных ускорений: ограничения непогашенного ускорения из условий комфортабельности езды пассажиров — $0,7 \text{ м/с}^2$ (или больше для подвижного состава с улучшенными динамическими характеристиками — до $1,1$), и условий непревышения непогашенного ускорения величины $\pm 0,3 \text{ м/с}^2$ для предотвращения повышенного воздействия грузовых поездов на путь и значительного увеличения затрат на его содержание.

При расчете в соответствии с каждым из ограничений по непогашенным ускорениям выводятся три неравенства, ограничивающие величину возвышения (максимальные и минимальные допускаемые возвышения). На их основе определяется расчетное возвышение, удовлетворяющее всем трем неравенствам. В конце концов в качестве итогового расчетного возвышения принимается минимальное в заштрихованном диапазоне, изображенном на рис. 1. Это диапазон, в котором выполняются все ограничения на непогашенные ускорения.

В основе предлагаемой методики расчета возвышения наружного рельса лежит предположение, что внутри диапазонов, представленных на рис. 1, может находиться оптимальное возвышение наружного рельса, которое будет отличным от расчетного возвышения и учитывать не только одинаковую нагруженность обеих рельсовых нитей, но и стоимость жизненного цикла верхнего строения пути в кривой на протяжении межремонтного цикла.

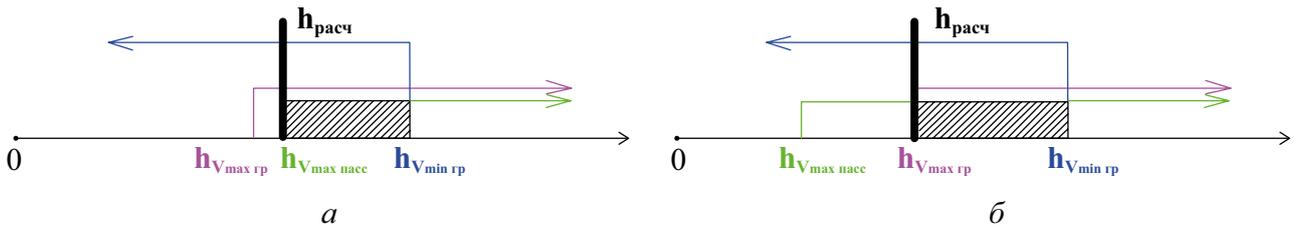


Рис. 1. Определение расчетного возвышения по действующей методике:
 а — определение расчетного возвышения в случае $h_{Vmax гр} < h_{Vmax пасс} < h_{Vmin гр}$;
 б — определение расчетного возвышения в случае $h_{Vmax пасс} < h_{Vmax гр} < h_{Vmin гр}$

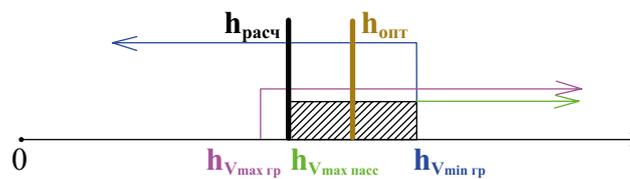


Рис. 2. Определение оптимального возвышения наружного рельса

Если оптимальное возвышение наружного рельса не будет находиться в диапазоне возвышений, представленном на рис. 2, то в качестве оптимального следует брать расчетное возвышение наружного рельса ($h_{расч}$) из условия непревышения непогашенными ускорениями допустимых величин [3].

Для определения оптимального возвышения наружного рельса было решено рассчитывать такую величину непогашенного ускорения, при котором стоимость жизненного цикла будет минимальной. То есть частная производная стоимости жизненного цикла, взятая за единицу времени и отнесенная к такому непогашенному ускорению, должна быть равна нулю [4, 5].

$$\frac{\partial(S_{сжц} / t)}{\partial(a_{нп})} = \frac{\partial(f(x))}{\partial(x)} = 0, \tag{1}$$

где $S_{сжц}$ — стоимость жизненного цикла;

$a_{нп}$ — средневзвешенное непогашенное ускорение, действующее от подвижного состава в кривой;

$f(x)$ — функция зависимости стоимости жизненного цикла от непогашенного ускорения. В нашем случае переменная $x = a_{нп}$.

Для определения функции зависимости $f(x)$ было решено изучить подробнее процесс появления деформаций в зависимости от величины динамической нагрузки, так как это влияет на увеличение объемов работ.

Выбор функции зависимости вероятности появления остаточных деформаций

В ходе исследования было сделано предположение, что спектр нагрузок подчиняется закону нормального распределения [6]. Плотность нормального распределения определяется по формуле:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение;

x — переменная величина;

a — математическое ожидание (среднее значение).

При изменении возвышения наружного рельса увеличивается динамическое воздействие на внутреннюю рельсовую нить или динамическое воздействие на наружную нить [7, 8]. Путевые работы назначаются в том случае, когда упругие деформации переходят в остаточные деформации и затем при накоплении остаточных деформаций появляются неисправности. В таком случае будут иметь место две случайные величины: динамическая нагрузка на рельсовую нить ($P_{\text{дин.}}$) и критическая сила ($P_{\text{крит.}}$), при достижении которой упругие деформации будут переходить в остаточные. Если заменить случайное распределение критической силы его средней величиной, то она будет показывать вероятность перехода упругих деформаций в остаточные деформации (рис. 3).



Рис. 3. Математическое ожидание деформаций пути

На рис. 3 площадь заштрихованной фигуры (F) показывает вероятность распределения случайной величины (γ), которая характеризует количество участков, находящихся в зоне остаточных деформаций [9].

При увеличении непогашенного ускорения увеличиваются доли участков, где возникают остаточные деформации (рис. 4).

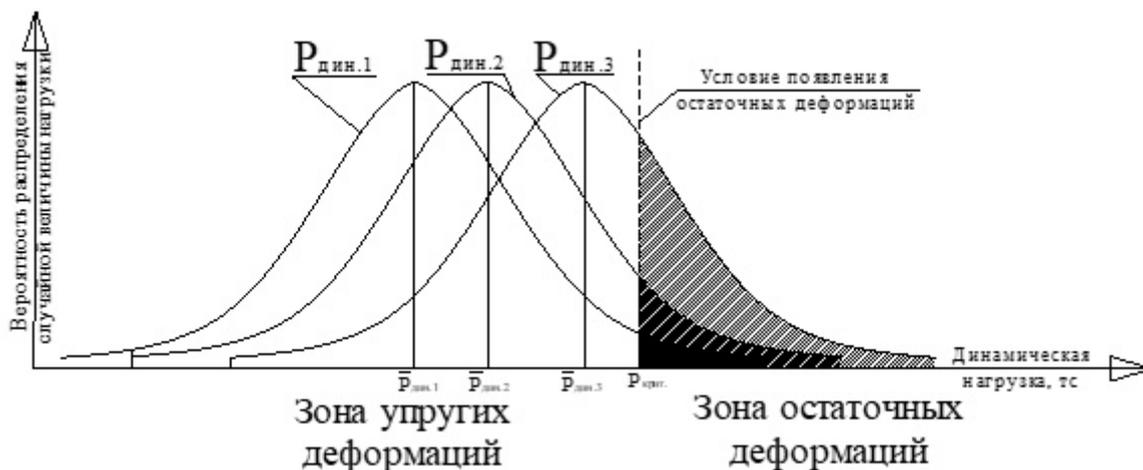


Рис. 4. Вероятность появления остаточной деформации

Как правило, протяжение неисправного пути не превышает 30–40%. По достижении этой величины путь переходит в предельное состояние, при котором дальнейшая эксплуатация его становится небезопасной или экономически нецелесообразной, и назначается какой-либо вид ремонта пути. Поэтому в дальнейших расчетах принимается только интервал протяжения неисправного пути до 30–40%.

Если представить, что на протяжении срока службы вероятность возникновения неисправностей будет лежать между 0 (отсутствие неисправностей) и 1 (неисправно все протяжение пути), то плотность нормального распределения можно определить через интегральную функцию:

$$\Phi_{0,1}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \tag{3}$$

Если в качестве функции, описывающей появление неисправностей (остаточных деформаций), взять интегральную зависимость (формула 3) и вместо предельных значений взять не 0 и 1, а 0% и 100%, то график функции будет выглядеть так, как это показано на рис. 5.

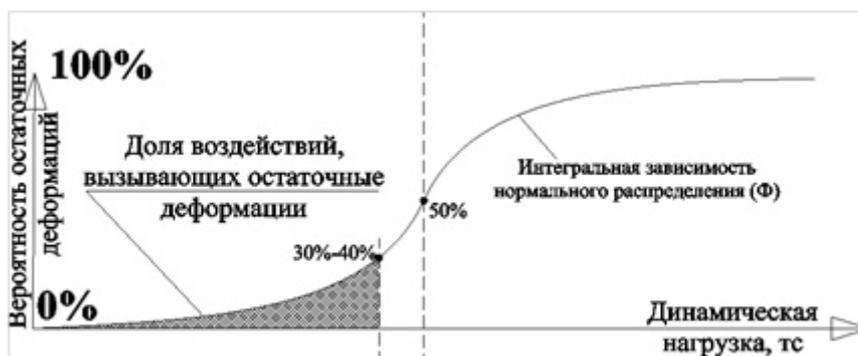


Рис. 5. Интегральная зависимость плотности нормального распределения

Выбор функции зависимости вероятности появления неисправностей пути от начала эксплуатации до ремонта

Так как производить аппроксимационные расчеты с помощью интегральной функции (Φ) достаточно сложно, было принято решение подобрать функцию, наиболее правильно описывающую существующую зависимость между вероятностью остаточной деформации и динамической нагрузкой. Были рассмотрены линейная функция ($f(x) = ax$), экспоненциальная функция ($f(x) = ae^{bx}$), квадратичная функция ($f(x) = ax^2$) и кубическая функция ($f(x) = ax^3$).

Для подбора наиболее подходящей по своим свойствам функции был произведен регрессионный анализ. Анализ проводился при помощи метода наименьших квадратов по формуле [10]:

$$D^2 = \sum (\Phi(x) - f(x))^2 = \min, \quad (4)$$

где $\Phi(x)$ — интегральная функция;

$f(x)$ — подбираемая функция.

Функция с наилучшей сходимостью определяется по наименьшей величине D^2 .

После расчетов величины D^2 оказались следующими:

- для линейной функции — $D^2 = 0,049$;
- для экспоненциальной функции — $D^2 = 0,001$;
- для квадратичной функции — $D^2 = 0,013$;
- для кубической функции — $D^2 = 0,001$.

На основе регрессионного анализа по всем рассматриваемым функциям были построены графики зависимостей, показанные на рис. 6.

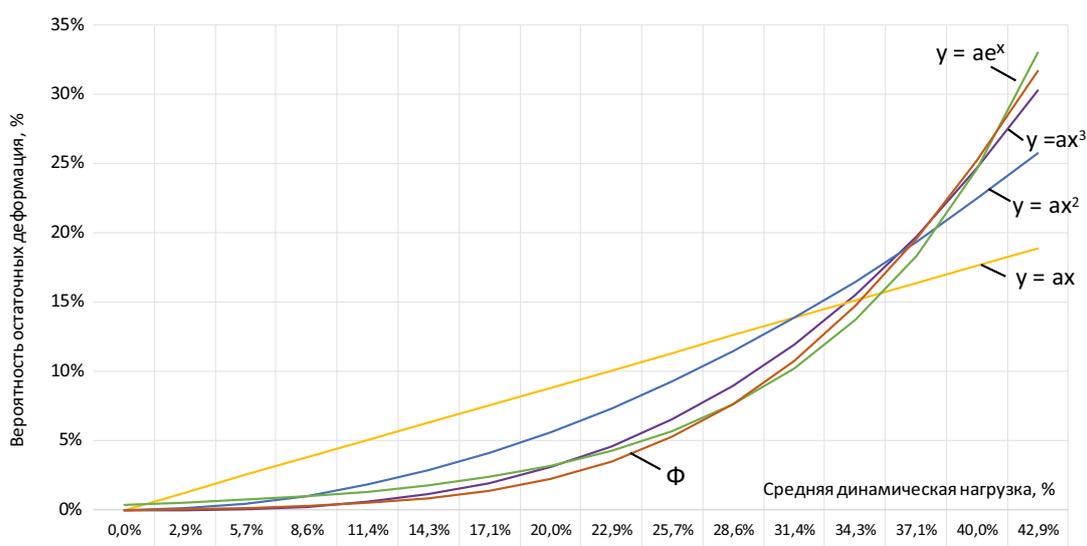


Рис. 6. Функции зависимости вероятности появления деформаций и продолжительности жизненного цикла

С точки зрения сходимости интегральной функции нормального распределения и остальных функций наилучшим образом себя показали кубическая и экспоненциальная функции.

Заключение

Количество остаточных деформаций, возникающих в пути, зависит от величины динамической нагрузки, действующих на рельсовые нити от колес подвижного состава. Объем остаточных деформаций влияет на увеличение объемов работ. Интенсивность возникновения остаточных деформаций и неисправностей пути можно описать экспоненциальной функцией или параболической функцией третьей степени, так как они показывают наилучшую сходимость при сравнении с интегральной функцией.

Описанные таким образом объемы неисправностей (остаточных деформаций) можно использовать при прогнозировании объемов работ при изменении нагрузок на рельсовые нити, в том числе при изменении возвышения наружного рельса.

В последующих исследованиях на основе эксплуатационных наблюдений были сделаны окончательные выводы о зависимостях, связывающих объемы работ и непогашенные ускорения. На основе полученных зависимостей были определены оптимальные непогашенные ускорения и возвышения наружного рельса.

Библиографический список

1. Руководство по определению возвышения наружного рельса в кривых на основе двухуровневой системы скоростей (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 20.12.2021 № 2897/р).
2. Певзнер В. О., Ваганова О. Н., Сидорова Е. А. Новые нормативы по устройству и содержанию кривых участков пути // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 3. С. 2–5.
3. Beltiukov V., Andreev A. Considering various conditions during determination of railway curve superelevation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 2020 International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020). 2021. Vol. 1151. P. 012019.
4. Бельтюков В. П., Андреев А. В. Модель стоимости жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути // Путь XXI века: сборник трудов Национальной научно-практической конференции, 2019. С. 201–204.
5. О стоимости жизненного цикла кривых участков пути / Ермаков В. М. [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 6. С. 4–9.
6. Фришман М. А. Как работает путь под поездами: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1975. 176 с.
7. Лысюк В. С. Оценка влияния возвышения наружного рельса в кривых на вертикальное воздействие колес // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 4. С. 4–8.

8. Морозова О. С., Шкурников С. В., Модель износа рельсов ВСМ в кривой // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2018. С. 61–64.

9. Чернова Н. И. Теория вероятностей: учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2007. 160 с.

10. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд. М., 1962.

Дата поступления: 05.07.2024

Решение о публикации: 25.08.2024

Контактная информация:

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович — докт. техн. наук, профессор; beltukov@pgups.ru@pgups.ru

АНДРЕЕВ Андрей Викторович — ст. преподаватель; aandreev@pgups.ru

Selection of the function of dependence of the probability of occurrence of residual deformations on loads when determining the optimal elevations of the outer rail in a curved section of the track

V. P. Beltiukov, A. V. Andreev

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

For citation: *Beltiukov V. P., Andreev A. V.* Selection of the function of dependence of the probability of occurrence of residual deformations on loads when determining the optimal elevations of the outer rail in a curved section of the track // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 3. P. 83–91. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-83-91

Abstract

Purpose: the outer rail elevation in a curved section of railroad track according to the 2021 Guide for Determining the Elevation of the Outer Rail is determined by taking into account unmitigated accelerations, radii (permissible and admissible). Taking these indicators into account allows to determine the best values of outer rail elevations in terms of operational characteristics. But these elevations cannot be called optimal in terms of the amount of work performed during the current maintenance of the track in curves. To determine the optimal elevation, labor costs should be considered throughout the life cycle of the curved section. Since the occurrence of costs is mainly influenced by residual deformations during the life cycle, it was decided to consider the probability of residual deformations during the life cycle. **Methods:** the choice of the function of dependence of the probability of occurrence of residual deformations on loads was made on the basis of probability theory and regression analysis. The least squares method was used as a method of regression analysis. On its basis, functions with the greatest convergence relative to the function obtained using probability theory were selected. **Results:** the study found that dynamic loads generated during rolling stock movement on railway tracks follow a normal distribution function according to probability theory. Since certain

dynamic loads during operation lead to residual deformations, the probability of such deformations can also be described using a normal distribution function. The resulting function for predicting the probability of residual deformations based on load factors was identified. **Practical significance:** the research findings can be used to determine the optimal elevation of the outer rail that minimizes labor costs during railway track operation.

Keywords: outer rail elevation, unmitigated acceleration, dynamic load, critical force, residual deformations

References

1. Rukovodstvo po opredeleniyu vozvysheniya naruzhnogo rel'sa v krivyh na osnove dvuhurovnevoj sistemy skorostej (utv.rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 20.12.2021 № 2897/г). (In Russian)
2. Pevzner V. O., Vaganova O. N., Sidorova E. A. Novye normativy po ustrojstvu i sodержaniyu krivyh uchastkov puti // Put' i putevoe hozyajstvo. 2022. № 3. S. 2–5. (In Russian)
3. Beltiukov V., Andreev A. Considering various conditions during determination of railway curve superelevation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 2020 International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020). 2021. Vol. 1151. P. 012019. (In Russian)
4. Bel'tyukov V. P., Andreev A. V. Model' stoimosti zhiznennogo cikla verhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti // Put' XXI veka: sbornik trudov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, 2019. S. 201–204. (In Russian)
5. O stoimosti zhiznennogo cikla krivyh uchastkov puti / Ermakov V. M. [i dr.] // Put' i putevoe hozyajstvo. 2019. № 6. S. 4–9. (In Russian)
6. Frishman M. A. Kak rabotaet put' pod poezdami: uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1975. 176 s. (In Russian)
7. Lysyuk V. S. Ocenka vliyaniya vozvysheniya naruzhnogo rel'sa v krivyh na vertikal'noe vozdejstvie koles // Vestnik VNIIZHT. 2008. № 4. S. 4–8. (In Russian)
8. Morozova O. S., Shkurnikov S. V. Model' iznosa rel'sov VSM v krivoj // Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXVIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. SPb.: PGUPS, 2018. S. 61–64. (In Russian)
9. Chernova N. I. Teoriya veroyatnostej: uchebnoye posobie. Novosibirsk: Novosibirskij gos. un-t, 2007. 160 s. (In Russian)
10. Linnik Yu. V. Metod naimen'shih kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudenij. 2-e izd. M., 1962. (In Russian)

Received: 05.07.2024

Accepted: 25.08.2024

Author's information:

Vladimir P. BELTIUKOV — D. Sci. in Engineering, Professor; beltukov@pgups.ru@pgups.ru

Andrey V. ANDREEV — Senior Lecturer; aandreev@pgups.ru