

УДК 629.4.017

## Оценка влияния неровностей и модели рельсового пути на динамические качества грузового вагона

**А. А. Богданович, А. В. Саидова**

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

**Для цитирования:** Богданович А. А., Саидова А. В. Оценка влияния неровностей и модели рельсового пути на динамические качества грузового вагона // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 2. С. 29–41. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-29-41

### Аннотация

**Цель:** сравнить требования документов РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020 в части задания неровностей рельсовых нитей при проведении компьютерного моделирования железнодорожных экипажей. Оценить влияние неровностей и модели рельсового пути на динамические качества грузового вагона при его движении по прямолинейному и криволинейным участкам.

**Методы:** обзор и анализ нормативных документов в области расчетных неровностей пути (РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020), а также существующих моделей рельсового пути позволили провести многовариантное моделирование движения железнодорожного экипажа с расчетной статической осевой нагрузкой 23,5 тс по прямолинейным и криволинейным участкам пути радиусами 350 и 650 м. Методами компьютерного имитационного моделирования проведено сравнение показателей качества хода грузового вагона в широко распространенной на территории РФ программе «Универсальный механизм».

**Результаты:** проведено сравнение действующих стандартов в области расчетных неровностей железнодорожного пути, применяемых в РФ. Получены и проанализированы осциллограммы рамных сил, ускорений, коэффициентов динамических добавок и устойчивости универсального полувагона на традиционных тележках 18-100. Исследовано влияние модели рельсового пути на результаты расчетов.

**Практическая значимость:** полученные результаты работы указывают на необходимость создания единого государственного стандарта, содержащего в себе описание подходов к заданию неровностей железнодорожного пути при моделировании динамики грузовых (и пассажирских) железнодорожных экипажей.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, полувагон, модель пути, неровности рельсовых нитей, моделирование движения вагона, динамические качества.

### Введение

Как известно, для расчета динамических сил, действующих на вагон (в том числе на отдельные его элементы), необходимо учитывать влияние различных факторов, относящихся непосредственно к вагону, а также к пути, по которому он движется. Одним из таких существенных факторов является рельсовый путь, а конкретнее неровности рельсовых нитей. Они используются при моделировании на этапе разработок новых типов (видов) подвижного состава и определяются аналитически или используются готовые таблично-заданные зависимости вертикальных и горизонтальных отклонений в геометрии рельсовой колеи от длины пути.

В настоящее время в РФ действуют два основных нормативных документа по неровностям рельсовых нитей при использовании расчетных методов: РД 32.68-96 [1] и ПНСТ 511-2020 [2].

Практическим путем установлено, что неровности рельсовых нитей, предложенные в [1] и [2], в различных научно-вычислительных центрах задаются по-разному (могут использоваться натурные неровности, а могут быть сгенерированы случайные отклонения нитей [3, 4]). Такой подход может обеспечивать существенно отличающиеся уровни показателей динамических качеств при одних и тех же условиях движения вагона.

Целью данного исследования является сравнение показателей динамических качеств грузового полувагона при движении по пути с неровностями, согласно требованиям документов [1] и [2]. Дополнительно в работе оценивается влияние модели рельсового пути на результаты расчетов показателей.

### Сравнительный анализ отклонений рельсовых нитей, применяемых при компьютерном моделировании движения грузового вагона

Согласно требованиям ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [5], неровности рельсового пути должны соответствовать указанным в табл. 1 отступлениям от номинального положения нитей.

ТАБЛИЦА 1. Величины отступлений рельсовых нитей согласно ГОСТ 33211-2014

Конструкционная скорость вагона, км/ч	Отступление не более, мм					
	По ширине колеи <sup>1</sup>	По уровню	По перекосу	По просадке	Разность смежных стрел <sup>2</sup>	
					До 20 м вкл.	Более 20 м, до 40 м вкл.
От 90 до 140 вкл.	6/14	16	12	15	15	25

<sup>1</sup> В числителе для сужения колеи, в знаменателе для уширения.  
<sup>2</sup> Измеренных от середины хорды длиной 20 м при длине неровности пути.

Для определения динамических качеств методами компьютерного моделирования [6] можно применять любые неровности пути, соответствующие допускаемым по ГОСТу [5] значениям.

На рис. 1 и рис. 2 на координатной плоскости изображены горизонтальные неровности в соответствии с указанными выше стандартами для левого и правого рельсов. Стоит отметить, что в РД 32.68-96 неровности рельсовых нитей задаются аналитически или в табличном виде на длине пути 600 м. А в стандарте ПНСТ 511-2020 в табличном виде они представлены на длине пути 1000 м. Кроме того, ПНСТ 511-2020 предусматривает масштабирующие коэффициенты (табл. 2), зависящие от скорости движения вагона, поэтому на рис. 1 и рис. 2 к сравнению представлены неровности с минимальным и максимальным масштабными коэффициентами.

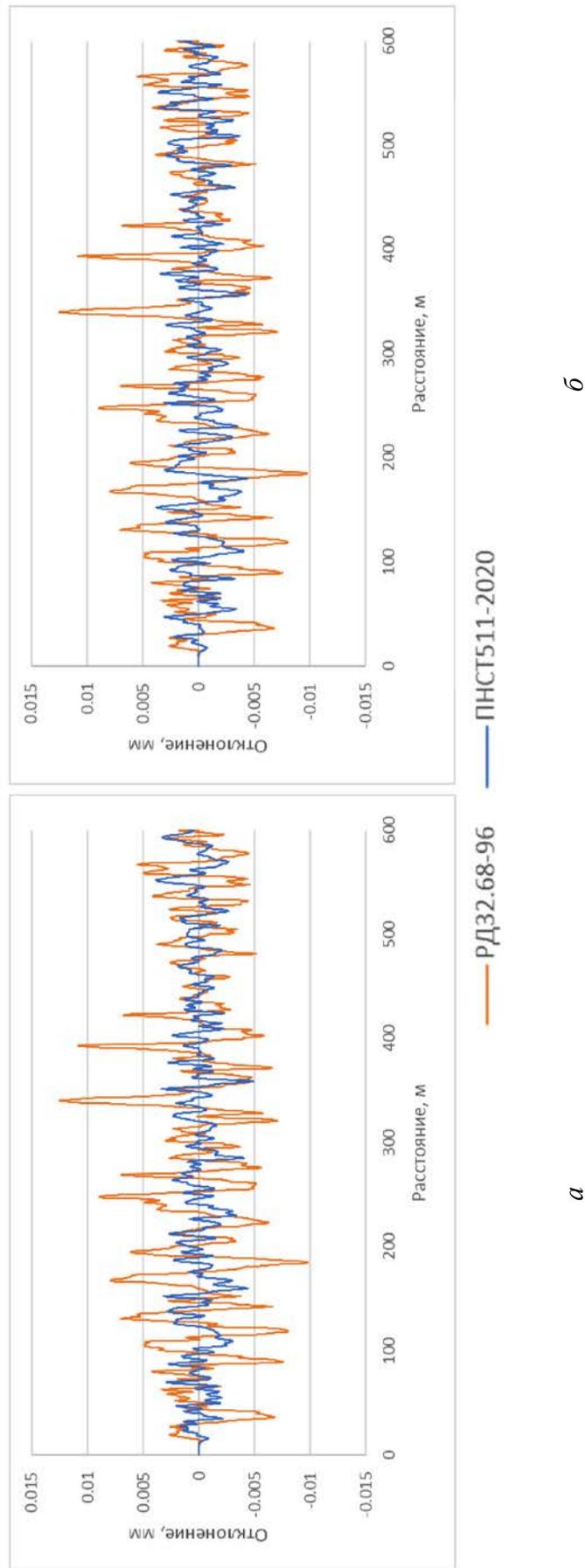


Рис. 1. Сравнение горизонтальных неровностей рельсовых нитей по РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020 с минимальным масштабным коэффициентом: *a* — для левого рельса; *b* — для правого рельса

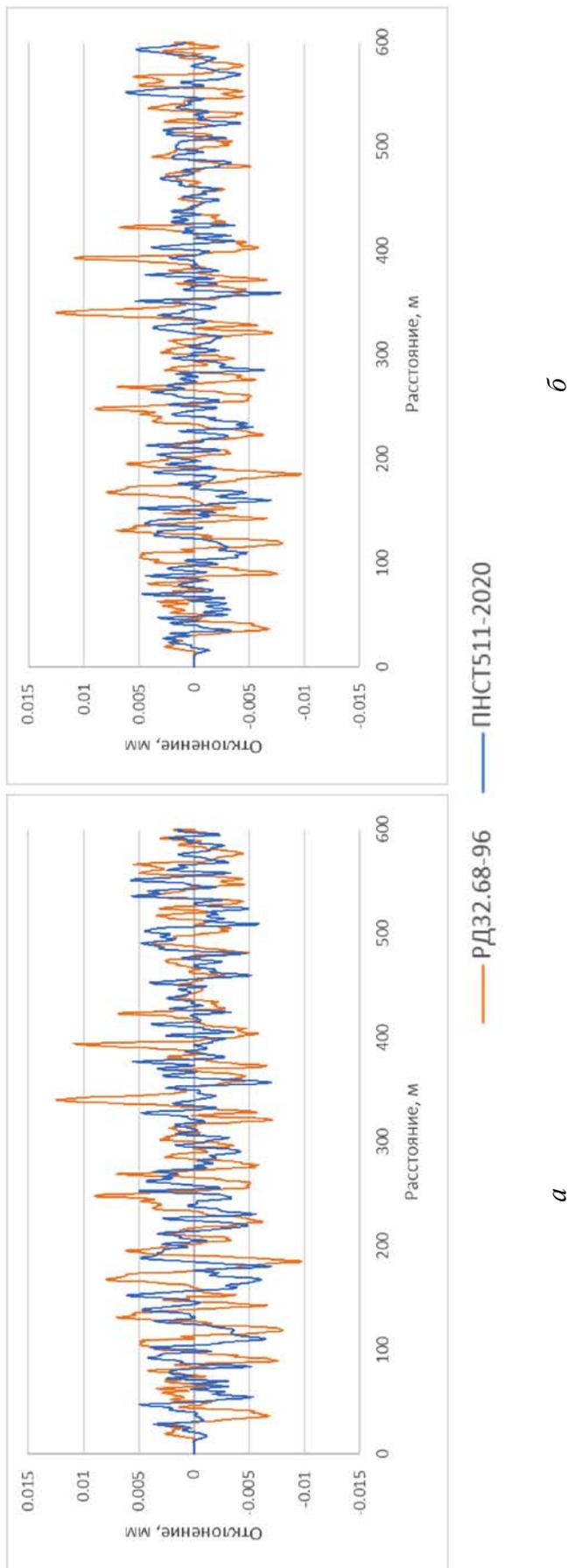


Рис. 2. Сравнение горизонтальных неровностей рельсовых нитей по РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020 с максимальным масштабным коэффициентом: *a* — для левого рельса; *b* — для правого рельса

Для уточненного анализа в табл. 2 приведено сравнение перечисленных расчетных неровностей по некоторым числовым вероятностным характеристикам.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение характеристик расчетных неровностей рельсовых нитей, согласно РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020

Направление и сторона рельсовой нити	Отклонение рельсовой нити*		
	Максимальное значение, мм	Минимальное значение, мм	Среднее квадратическое отклонение, мм
У левый	12,53/5,43/8,69	9,70/4,90/7,85	3,54/1,70/2,72
У правый	9,70/5,77/9,23	12,53/4,89/7,82	3,55/1,46/2,34
* Через косую черту приведены значения для стандартов РД 32.68-96/ПНСТ 511-2020 (масштабный коэффициент 1,0)/ПНСТ 511-2020 (масштабный коэффициент 1,6).			

Как показывает табл. 2, максимальные отклонения рельсовых нитей от номинального положения в поперечном направлении в соответствии с рассмотренными стандартами могут отличаться в 2,5 раза. Это отличие может значительно влиять на горизонтальную динамику рельсовых экипажей, включая рамные силы, боковое ускорение и коэффициент запаса устойчивости.

### Исследование влияния неровностей пути на динамические качества грузового вагона

Для оценки динамических качеств грузового вагона используется система показателей, перечень и максимально допустимые значения которых представлены в ГОСТе [5]. Согласно ГОСТу [5], динамические качества грузового вагона оценивают по следующим основным показателям:

- 1) максимальное соотношение рамной силы к статической осевой нагрузке (характеризует горизонтальную динамику);
- 2) максимальный коэффициент динамической добавки обрессоренных частей (характеризует вертикальную динамику);
- 3) максимальный коэффициент динамической добавки необрессоренных частей (характеризует вертикальную динамику);
- 4) минимальный коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса (характеризует устойчивость экипажа).

Для проведения серии расчетов выбран традиционный универсальный полувагон на тележках 18-100. Имитационная модель экипажа создана в программе «Универсальный механизм» [7–9] (рис. 3).

При создании модели грузового вагона в соответствии с [7] учтены следующие моменты:

- вагон разбит на 11 твердых недеформируемых тел, имеющих связь между собой и с отсчетной системой координат;

- используются локальные и главная системы координат с совпадающим направлением осей;
- тела модели имеют возможность поступательного и вращательного движений по трем осям.

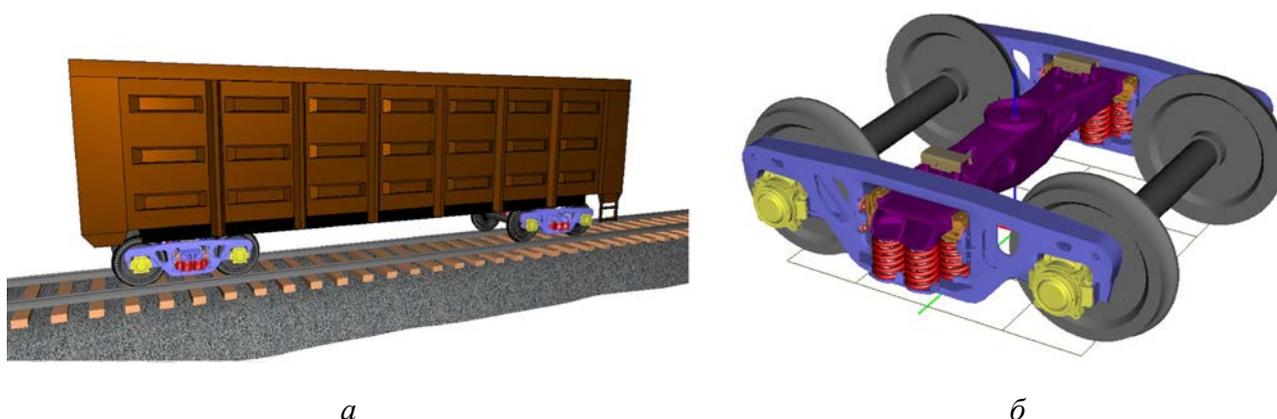


Рис. 3. Компьютерная модель экипажа (а) и его ходовых частей (б), разработанная в «Универсальном механизме»

При моделировании полувагон совершал движение по прямолинейному пути и в кривых среднего радиуса со скоростями от 40 км/ч до конструкционной 120 км/ч (в кривой радиусом 350 м максимальная скорость принята из условия неперевышения допустимого непогашенного ускорения  $0,7 \text{ м/с}^2$ ).

Неровности заданы в виде зависимости координат рельсов по осям Y и Z от времени в соответствии с РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020 (левая и правая стороны).

Полученные значения показателей приведены в табл. 3 (вагон с минимальной расчетной массой) и на рис. 4 (вагон с максимальной расчетной массой).

Анализ полученных результатов позволил установить следующее:

- как в порожнем, так и в груженом режимах движения наблюдается существенная разница значений показателей: в порожнем режиме отношение рамной силы к статической осевой нагрузке при движении по неровностям, согласно ПНСТ 511-2020, меньше на 38% по сравнению с РД 32.68-96, а в груженом — ниже на 26%;
- при движении по неровностям, согласно ПНСТ 511-2020, коэффициент запаса устойчивости не опускается ниже допустимого значения 1,3, в то время как при движении по неровностям по РД 32.68-96 (особенно на высоких скоростях) ниже допустимого и может достигать 0,7;
- коэффициенты динамической добавки обрессоренных/необрессоренных частей для случаев движения по неровностям, согласно РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020, соответствуют уровню оценки качества хода «допустимый», однако могут различаться вплоть до 75% в зависимости от скорости движения.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета показателей динамических качеств порожнего полувагона

Название показателя (допускаемое значение)	Значения показателя* для случая движения в							
	прямой			кривой R = 650 м			кривой R = 350 м	
	со скоростью, км/ч							
	40	90	120	40	90	120	40	85
Минимальный коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса (1,3)	1,84/2,09	<b>1,13/1,83</b>	<b>0,93/1,78</b>	1,41/1,90	<b>0,81/1,65</b>	<b>0,72/1,46</b>	<b>1,27/1,79</b>	<b>0,75/1,60</b>
Максимальное соотношение рамной силы к статической осевой нагрузке (0,40)	0,21/0,12	0,30/0,17	0,38/0,21	0,21/0,17	0,33/0,20	<b>0,66/0,25</b>	0,22/0,16	<b>0,41/0,24</b>
Максимальный коэффициент динамической добавки обрессоренных частей (0,75)	0,28/0,21	0,57/0,42	<b>0,78/0,43</b>	0,35/0,28	<b>0,84/0,51</b>	<b>0,78/0,54</b>	0,37/0,30	<b>0,79/0,59</b>
Максимальный коэффициент динамической добавки необрессоренных частей (0,98)	0,35/0,27	0,86/0,47	0,89/0,48	0,55/0,31	0,85/0,49	0,88/0,50	0,40/0,31	0,81/0,51

\* В числителе при движении вагона по неровностям согласно РД 32.68-96, в знаменателе — ПНСТ 511-2020.

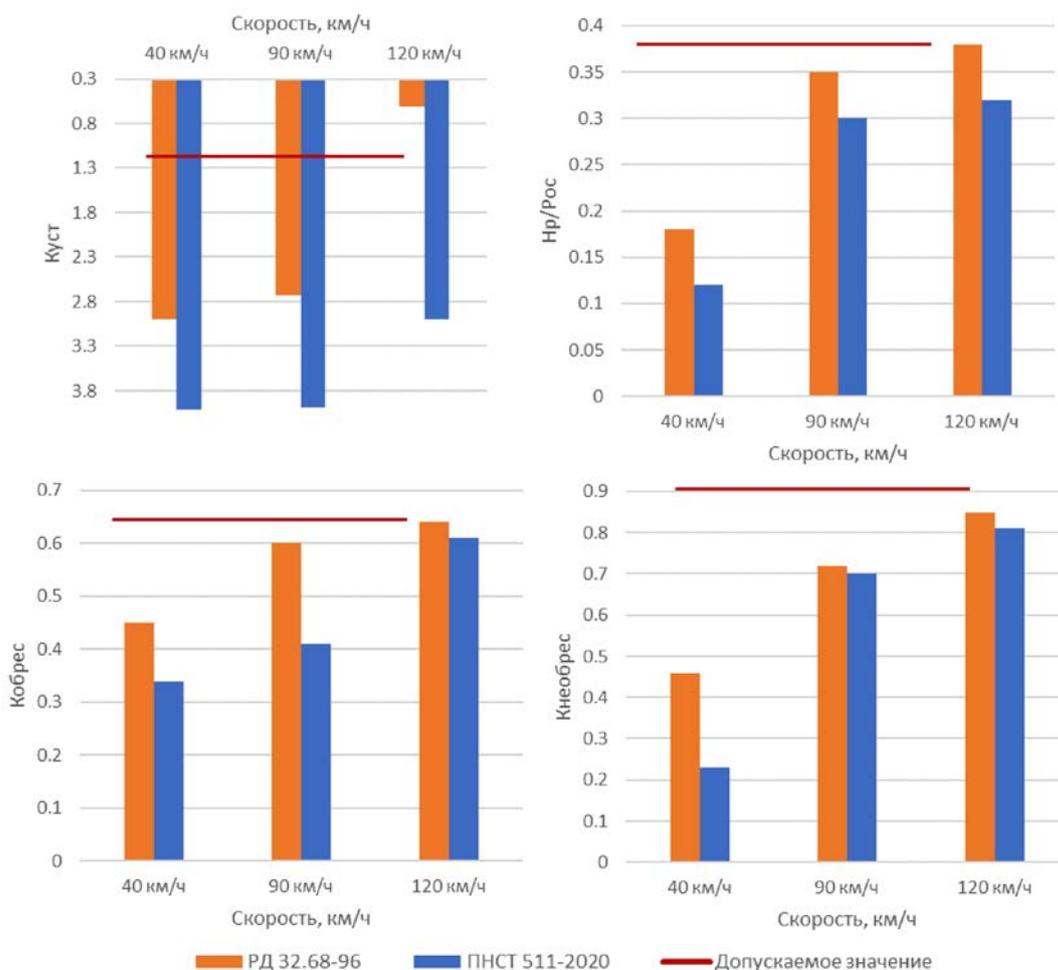


Рис. 4. Результаты расчета динамических качеств груженого полувагона в прямом участке пути

## Исследование влияния модели пути на динамические качества грузового вагона

В программном комплексе «Универсальный механизм» реализованы три модели пути, представляющие собой последовательное усложнение и детализацию путевой структуры: безмассовый (безмассовый рельс), твердотельный (инерционный рельс), упругий [10].

Безмассовый путь (рис. 5) связан с неподвижной отсчетной системой координат через жесткость и демпфирование в поперечном и вертикальном направлениях. В этой модели пути рельс рассматривается как безмассовый силовой элемент, для которого не вводятся собственные обобщенные координаты, а смещения определяются в результате решения уравнений равновесия. Допускается одно- или двухточечный контакт профилей колеса и рельса.

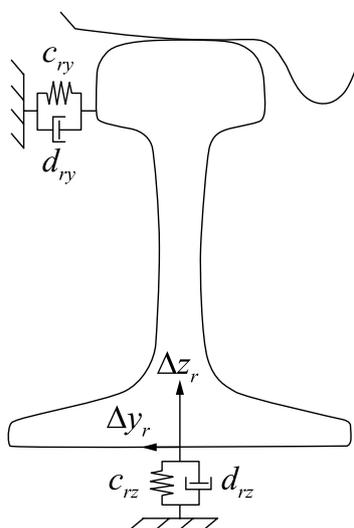


Рис. 5. Модель пути «Безмассовый рельс»

Показанная на рис. 5 модель используется для оценки динамики экипажа (в ней не учитывается динамика пути).

В твердотельном пути (или иначе «инерционный рельс») рельсы моделируются как твердые тела под каждым колесом колесной пары, что характеризуется неограниченным числом точек контакта колеса с рельсом, а также жестким взаимопроникновением профилей колеса и рельса (рис. 6). Подрельсовое основание моделируется элементом под названием «сайлент-блок».

Твердотельный путь рекомендуется использовать при изучении вопросов износа в системе «колесо — рельс».

Модель «Упругий путь» наиболее полноценно описывает реальное состояние пути (рис. 7). Эту модель рекомендуется использовать для решения задач динамики пути и подрельсового основания.

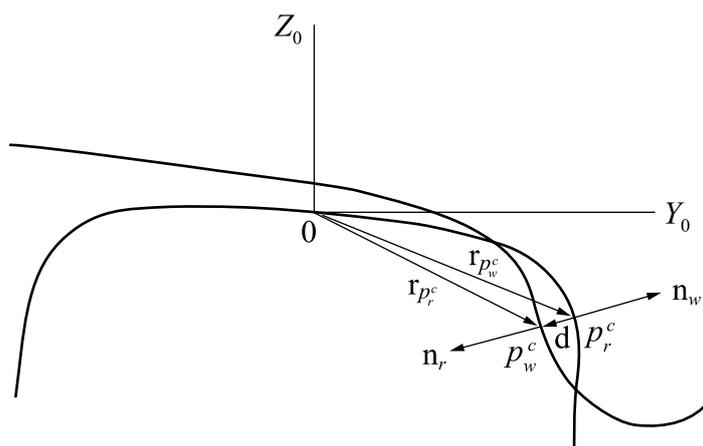


Рис. 6. Модель пути «Инерционный рельс»

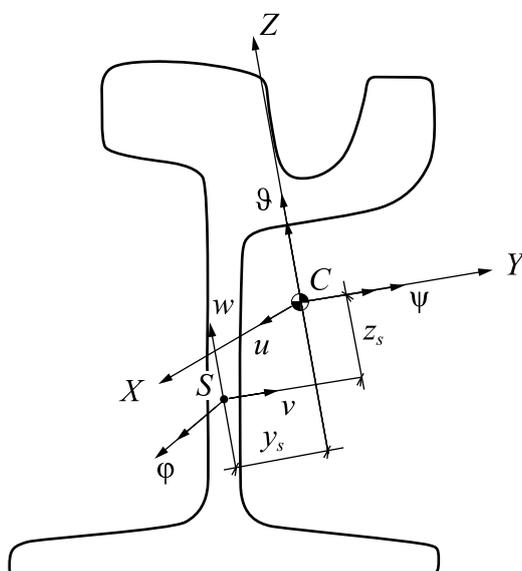


Рис. 7. Геометрия поперечного сечения рельса в модели пути «Упругий рельс»

В табл. 4 приведено сравнение показателей динамических качеств при движении порожнего полувагона в прямом участке пути разных моделей.

Сравнение полученных результатов показывает, что различные модели пути могут оказывать существенное влияние на показатели качества хода. По мере усложнения модели пути это влияние увеличивается. Так, например, минимальный коэффициент запаса устойчивости при движении по безмассовому, твердотельному и упругому пути со скоростью 120 км/ч ниже допусаемого на 28, 57 и 71 % соответственно.

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета (вагон с минимальной расчетной массой)

Название показателя (допускаемое значение)	Значения показателя* для случая движения по пути								
	безмассовый			твердотельный			упругий		
	со скоростью, км/ч								
	40	90	120	40	90	120	40	90	120
Минимальный коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса (1,3)	1,84/2,09	<b>1,13</b> /1,83	<b>0,93</b> /1,78	1,95/2,29	<b>1,18</b> /1,60	<b>0,56</b> /1,09	1,65/1,87	<b>0,79</b> /1,44	<b>0,38</b> /0,92
Максимальное соотношение рамной силы к статической осевой нагрузке (0,40)	0,21/0,12	0,30/0,17	0,38/0,21	0,22/0,14	0,34/0,20	<b>0,46</b> /0,31	0,26/0,19	<b>0,44</b> /0,26	<b>0,52</b> /0,38
Максимальный коэффициент динамической добавки обрессоренных частей (0,75)	0,28/0,21	0,57/0,42	<b>0,78</b> /0,43	0,46/0,32	0,64/0,45	<b>0,92</b> /0,71	0,49/0,38	0,73/0,62	<b>0,86</b> /0,75
Максимальный коэффициент динамической добавки необрессоренных частей (0,98)	0,35/0,27	0,86/0,47	0,89/0,48	0,46/0,33	0,88/0,66	0,89/0,78	0,58/0,43	0,98/0,66	<b>1,2</b> /0,89
* В числителе при движении вагона по неровностям согласно РД 32.68-96, в знаменателе — ПНСТ 511-2020.									

## Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что существующие аналитические подходы и наборы табличных значений неровностей железнодорожного пути, согласно требованиям стандартов РД 32.68-96 и ПНСТ 511-2020, не унифицированы и могут обеспечивать отличающиеся показатели качества хода вагонов.

Для унификации требований к расчетным отклонениям рельсовых нитей от номинального положения требуется комплексный подход, включающий в себя анализ натуральных неровностей железных дорог РФ с последующей апробацией предлагаемых в моделировании движения грузовых вагонов неровностей в различных научно-исследовательских центрах. Результатом такого подхода должен стать ГОСТ на расчетные неровности железнодорожного пути.

Особое внимание стоит уделять модели железнодорожного пути. Безмассовый, твердотельный и упругий пути могут обеспечивать различие в значениях показателей динамических качеств до нескольких раз.

## Библиографический список

1. РД 32.68-96 «Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов». М.: МПС, 1996.
2. ПНСТ 511-2020 «Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами». М.: Стандартинформ, 2021.

3. Савоськин А. Н., Лавлинская Н. С. Генерирование геометрических неровностей как случайных возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 24–39.
4. Федорова В. И., Суслов О. А. Разработка деградиционных моделей пути и подвижного состава // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 4–5 (101–102). С. 50–57.
5. ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам». М.: Стандартинформ, 2014.
6. Мартыненко Л. В. Моделирование динамических характеристик вагона в программном комплексе «Универсальный механизм УМ» // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 3 (75). С. 139–148.
7. Универсальный механизм. Программы, руководство пользователя, презентации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3>.
8. Современные методы моделирования динамики подвижного состава: [электронное учеб. пособие] / А. В. Саидова, Ю. Б. Житков. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. 52 с.
9. Современные методы моделирования динамики подвижного состава: [электронное учеб. пособие] / А. В. Саидова, А. М. Орлова СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. 84 с.
10. Михеев Г. В., Погорелов Д. Ю., Родиков А. Н. Методы моделирования динамики железнодорожных колесных пар с учетом упругости // Вестник БГТУ. 2019. № 4. С. 40–51.

Дата поступления: 04.05.2024

Решение о публикации: 28.05.2024

**Контактная информация:**

САИДОВА Алина Викторовна — канд. техн. наук; [av-saidova@yandex.ru](mailto:av-saidova@yandex.ru)

БОГДАНОВИЧ Алеся Алексеевна — студентка 5-го курса ПГУПС Императора Александра I; [bogdanovichalesyaps909@ya.ru](mailto:bogdanovichalesyaps909@ya.ru)

## Assessment of the influence of irregularities and the model of the rail track on the dynamic qualities of a freight car

**A. A. Bogdanovich, A. V. Saidova**

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

**For citation:** *Bogdanovich A. A., Saidova A. V.* Assessment of the influence of irregularities and the model of the rail track on the dynamic qualities of a freight cars // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 2. P. 29–41. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-29-41

### Abstract

**Objective:** compare the requirements of documents RD 32.68-96 and PNST 511-2020 regarding the assignment of unevenness of rail threads during computer modeling of railway crews. To evaluate the influence of irregularities and the model of the rail track on the dynamic qualities of a freight car when moving along straight and curved sections. **Methods:** a review and analysis of various standards for calculated track irregularities (RD 32.68-96 and PNST 511-2020), as well as an assessment of the influence of the rail track model on dynamic qualities of a freight car, allowed to form the most representative calculation cases for modeling the movement of a railway carriage along a track of various designs (straight, curved sections) and conduct a study of the dynamics of a freight car in a specialized environment the Universal Mechanism software package. **Results:** a comparison of different regulatory documents used in the Russian Federation and the current standards for calculated track irregularities has been carried out. Computer modeling methods have been used to obtain histograms of various indicators for a universal gondola car mounted on bogies of model 18-100 when moving along a path of various designs. **Practical importance:** the obtained results of the work can later be used to develop the theoretical foundations of the national standard on railway track irregularities for modeling the movement of rolling stock.

**Keywords:** freight car, gondola car, track model, irregularities of rail threads, simulation of carriage movement, dynamic qualities.

### References

1. RD 32.68-96 “Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ispol'zovaniya pri issledovaniyah i proektirovanii passazhirskih i gruzovyh vagonov”. M.: MPS, 1996. (In Russian)
2. PNST 511-2020 “Vagony gruzovye. Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ocenki pokazatelej dinamicheskikh kachestv gruzovyh vagonov raschetnymi metodami”. M.: Standartinform, 2021. (In Russian)
3. Savos'kin A.N., Lavlinskaya N.S. Generirovanie geometricheskikh nerovnostej kak sluchajnyh vozmushchenij, vyzyvayushchih kolebaniya rel'sovyh ekipazhej // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZHT). 2024. T. 83, № 1. S. 24–39. (In Russian)
4. Fedorova V.I., Suslov O.A. Razrabotka degradacionnyh modelej puti i podvizhnogo sostava // Transport Rossijskoj Federacii. 2022. № 4–5 (101–102). S. 50–57. (In Russian)
5. GOST 33211-2014 “Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam”. M.: Standartinform, 2014. (In Russian)

6. Martynenko L.V. Modelirovanie dinamicheskikh harakteristik vagona v programmnom komplekse “Universal'nyj mekhanizm UM” // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2022. № 3 (75). S. 139–148. (In Russian)

7. Universal'nyj mekhanizm. Programmy, rukovodstvo pol'zovatelya, prezentacii [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3> (In Russian)

8. *Sovremennye metody modelirovaniya dinamiki podvizhnogo sostava: [elektronnoe ucheb. posobie]* / A. V. Saidova, Yu. B. Zhitkov. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2022. 52 s. (In Russian)

9. *Sovremennye metody modelirovaniya dinamiki podvizhnogo sostava: [elektronnoe ucheb. posobie]* / A. V. Saidova, A. M. Orlova. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2023. 84 s. (In Russian)

10. Miheev G.V., Pogorelov D.Yu., Rodikov A.N. *Metody modelirovaniya dinamiki zheleznodorozhnyh kolesnyh par s uchetom uprugosti* // *Vestnik BGTU*. 2019. № 4. S. 40–51. (In Russian)

Received: 04.05.2024

Accepted: 28.05.2024

**Author's information:**

Alina V. SAIDOVA — PhD in Engineering; [av-saidova@yandex.ru](mailto:av-saidova@yandex.ru)

Alesya A. BOGDANOVICH — Student of Emperor Alexander I PGUPS;  
[bogdanovichalesyaps909@ya.ru](mailto:bogdanovichalesyaps909@ya.ru)