

УДК 625.03

## Результаты оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений

**А. В. Романов, А. А. Киселев, А. А. Мирошник, М. В. Бушуев**

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

**Для цитирования:** Романов А. В., Киселев А. А., Мирошник А. А., Бушуев М. В. Результаты оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 409–420. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-409-420

### Аннотация

**Цель:** оценка силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений: Шлюмпфа, матриц влияния и методом двух сечений (ПГУПС). **Методы:** измерения оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь производились методами Шлюмпфа, матриц влияния и методом двух сечений (ПГУПС). **Результаты:** установлено, что измерения вертикальных динамических сил тремя методами хорошо коррелируются между собой, а метод Шлюмпфа дает завышенные результаты при измерении горизонтальной поперечной силы. **Практическая значимость:** метод двух сечений (ПГУПС) можно рекомендовать для измерения силового воздействия как нового и модернизированного подвижного состава на железнодорожный путь, так и для эксплуатируемого подвижного состава с целью выявления дефектов и отступлений на поверхности катания колес.

**Ключевые слова:** контакт колеса с рельсом, взаимодействие подвижного состава с верхним строением пути, длинносоставные поезда, повышенные осевые нагрузки, кривые участки малого радиуса, тяжеловесное движение.

### Введение

Для выполнения целевых показателей Транспортной стратегии Российской Федерации [1] грузооборот на сети железных дорог ОАО «РЖД» за последние годы значительно увеличился. Так, на восточном полигоне за шесть лет грузооборот увеличился на 50 %, к портам Азово-Черноморского бассейна — на 49 %.

Для этого потребовалось увеличить осевую нагрузку до 25 т/ось и увеличить длину поезда до 71 условного вагона, а на не-

которых направлениях — до 100 условных вагонов. Это привело к обновлению нормативной базы [2–6] и к затратам на реконструкцию перегонной и станционной инфраструктуры.

Проведенные комплексные испытания на участке Качканар — Смычка в 2017–2018 годах показывают, что воздействие нового подвижного состава без дефектов и отступлений не приведет к значительному росту неисправностей и дефектов. В то же

время применение на сети дорог тяжело-весных и длинносоставных грузовых поездов привело к росту количества выхода из строя рельсов по причине износа и дефектов контактно-усталостного характера, которые наблюдаются в основном в кривых участках малых радиусов. На многих участках сети дорог ресурс работы рельсов, лежащих в кривых участках пути радиусом менее 650 м, не достигает 200 млн т брутто. Расчет и количество отступлений по геометрии рельсовой колеи.

По нашему мнению, измерение и контроль силового воздействия железнодорожного экипажа на путь является одним из направлений, которое должно быть организовано для оптимизации взаимодействия в системе «колесо — рельс» и для повышения ресурса рельсов и колес.

В работе рассматриваются основные методы измерения силового воздействия железнодорожного экипажа на путь на особо грузонапряженных участках Октябрьской железной дороги.

### Материалы и методы исследования

Для обследования был выбран двухпутный участок на полигоне Октябрьской железной дороги, представляющий собой кривую радиусом 600 м, электрифицированный, оборудованный автоблокировкой с грузонапряженностью 180 млн тонно-километров брутто на километр в год. Тоннаж, пропущенный по участку, — 1095,2 млн т брутто. В 2013 году проводилась реконструкция, а в 2021 году выполнен капитальный ремонт железнодорожного пути 3-го уровня, сопровождаемый работами в объеме подъемочного ремонта. На участке уложен бесстыковой путь с рельсами категории ДТ350, эпорой шпал 2000 шт./км, крепление — АРС-4,

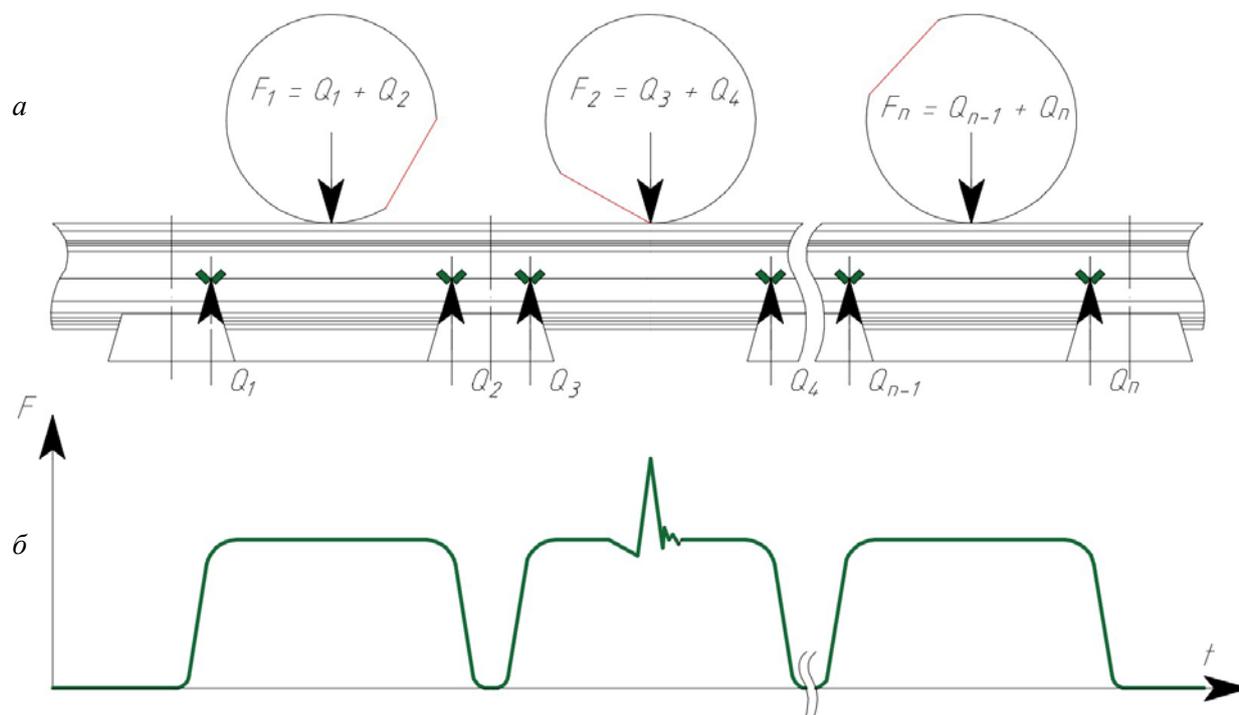
щебеночный балласт толщиной 50 см. На участке уложен разделительный слой из геокомпозита и подбалластный слой из щебеночно-песчаной смеси.

Для регистрации динамических сил в системе «колесо — рельс» были применены методы, включенные в межгосударственный стандарт ГОСТ 34759-2021 [7], в соответствии с которым используется метод Шлюмпфа [8, 9] и метод матриц влияния [10–12].

Преимуществом метода Шлюмпфа является его простота. Практика применения метода Шлюмпфа показала достаточную точность измерения вертикальной силы и недостаточную точность измерения горизонтальных поперечных сил. По исследованиям ВНИИЖТ, ВНИКТИ, ВНИЦТТ погрешность измерений горизонтальных поперечных сил может составлять до 100 % [12–14].

Метод матриц влияния основан на совместном измерении вертикальных и горизонтальных поперечных сил. Метод измерения требует большого количества тензорезисторов, использования многоканальной аппаратуры, проведения сложных испытаний по тарифовке и необходимости математической обработки сигналов, основанной на использовании матриц влияния. При этом установлено [14], что погрешность при применении метода матриц влияния от горизонтальных поперечных сил не превышает 10 %, вертикальных сил — не более 1,5 %.

Методы Шлюмпфа и матриц влияния не выявляют дефектов от воздействия колес на рельсы в связи с тем, что измерительная зона очень мала, при этом метод ПГУПС измеряет напряжения на протяжении участка длиной примерно 200 мм [13]. Этот способ может регистрировать дефекты на поверхности катания колес (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема регистрации сил методом ПГУПС:

*a* — участок с датчиками; *б* — регистрация сил от воздействия колесных пар;

$F_1$ – $F_4$  — вертикально направленные силы;  $Q_1$ – $Q_4$  — поперечная сила

Измерение вертикальной силы методом двух сечений (ПГУПС) выполняется включением восьми тензорезисторов, наклеенных в двух сечениях, в два параллельных моста. Измерение горизонтальной поперечной силы методом ПГУПС выполняется последовательным включением восьми тензорезисторов, наклеенных в двух сечениях, в один мост.

На экспериментальном участке датчиками оборудуются два поперечных сечения для измерения вертикальных и горизонтальных поперечных сил методом Шлюмпфа и матриц влияния и трех последовательных междушпальных промежутков для измерения сил методом ПГУПС. Измерительные сечения расположены в середине круговой кривой на внутренней и наружной нити.

Принципиальная схема оборудования участка для регистрации сил и напряжений на выбранном участке изображена на рис. 2.

### Результаты исследования

Измерения на экспериментальном участке проводились в два этапа. Первый этап выполнялся в сентябре (теплая сухая погода). Второй этап выполнялся в октябре (при высокой влажности). Анализ полученных результатов показывает, что разница в итогах измерений вертикальных и горизонтальных поперечных сил от воздействия длинносоставных поездов в первом и во втором циклах незначительна и лежит в пределах точности выполненных расчетов. Из этого следует, что изменение упругих характеристик подрельсового основания и влажности балласта и грунтов основной площадки земляного полотна не влияет на точность.

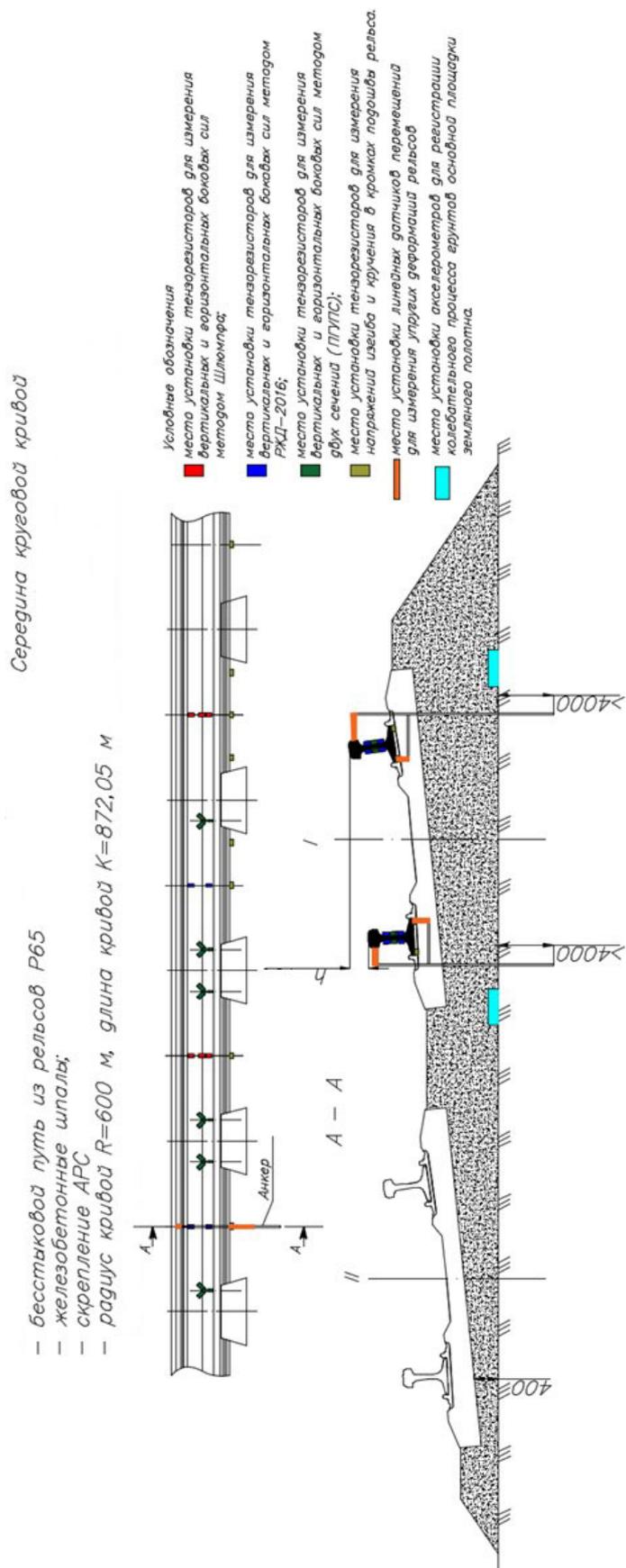
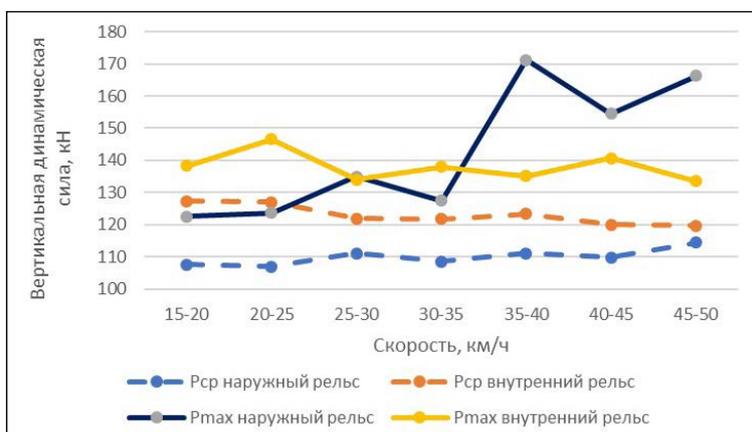


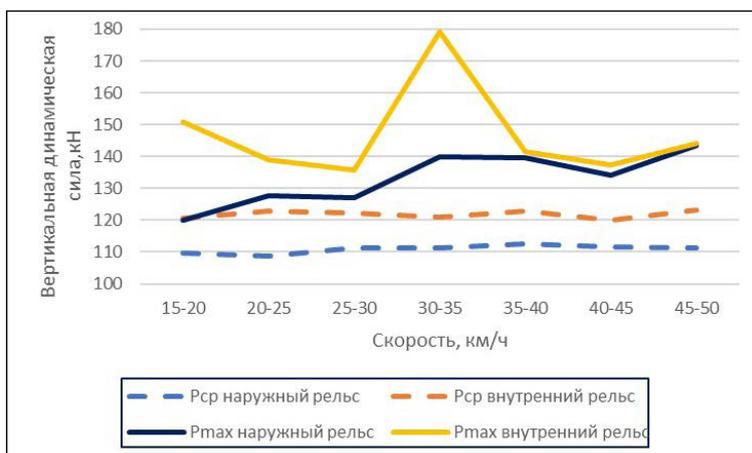
Рис. 2. Расположение датчиков для регистрации сил и напряжений

*Вертикальные силы*

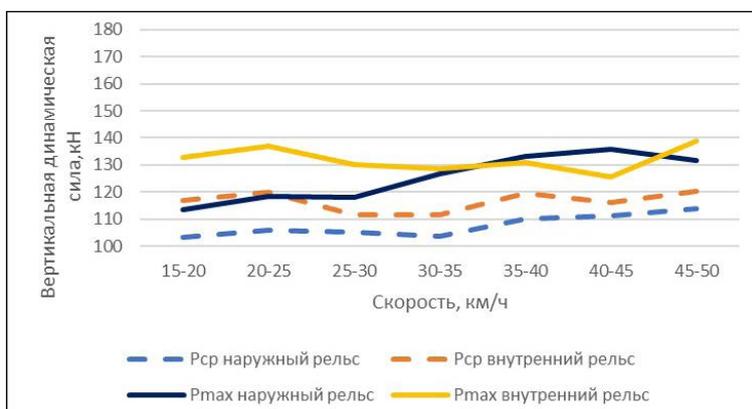
На рис. 3, 4 представлены зарегистрированные значения вертикальных сил.



*а*



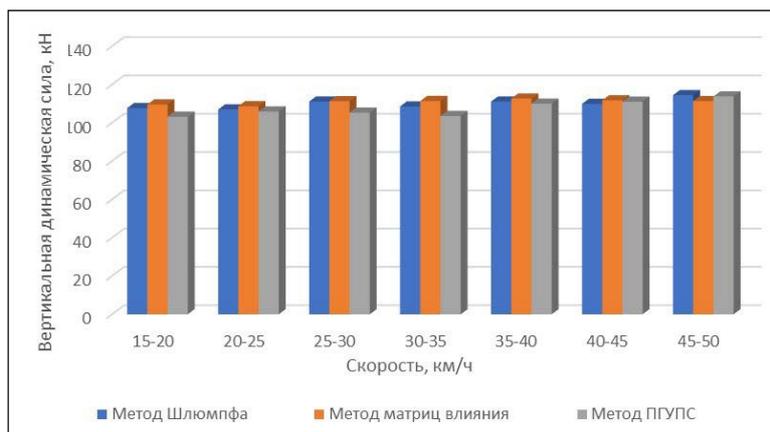
*б*



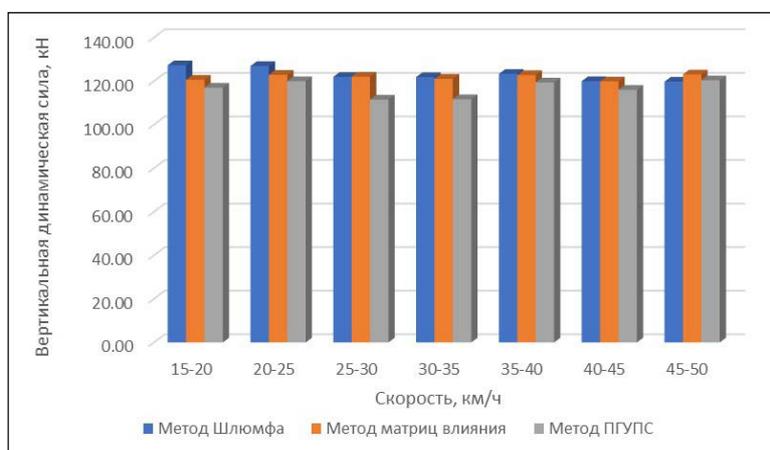
*в*

**Рис. 3.** Зарегистрированные значения вертикальных сил от колес вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось и 25 т/ось:

*а* — метод Шлюмфа; *б* — метод матриц влияния; *в* — метод двух сечений (ПГУПС)



а



б

**Рис. 4.** Сравнение результатов измерения вертикальных динамических сил, полученных различными методами: *а* — наружный рельс; *б* — внутренний рельс

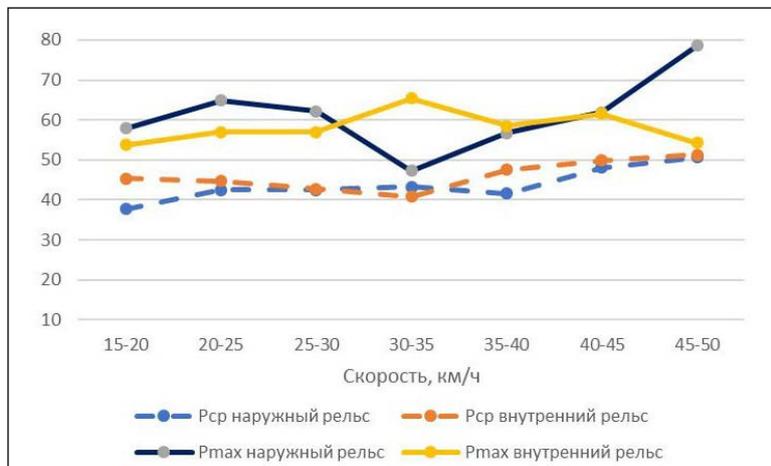
Анализ показывает, что результаты измерений вертикальных сил различными методами достаточно хорошо коррелируются между собой (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Сравнение вертикальных сил, измеренных различными методами

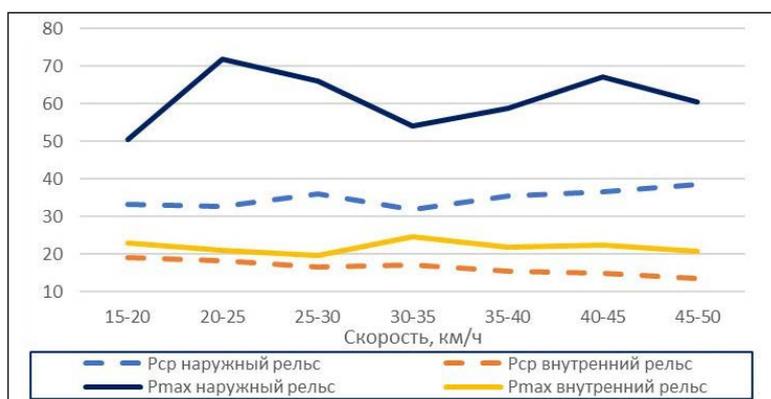
Метод измерения	Разница в результатах, % при скорости движения, км/ч						
	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40	40–45	45–50
<b>Наружный рельс</b>							
Метод Шлюмфа / метод матриц влияния	1,73	1,54	0,19	2,57	1,38	1,63	2,77
ПГУПС / метод Шлюмфа	4,80	0,99	5,20	4,57	1,00	1,01	0,57
ПГУПС / метод матриц влияния	5,84	2,51	5,38	7,02	2,36	0,64	2,18
<b>Внутренний рельс</b>							
Метод Шлюмфа / метод матриц влияния	5,52	3,32	0,09	0,62	0,48	0,08	2,68
ПГУПС / метод Шлюмфа	8,08	5,51	8,55	8,30	3,19	3,29	0,52
ПГУПС / метод матриц влияния	3,00	2,37	8,63	7,73	2,73	3,22	2,18

*Горизонтальные поперечные силы*

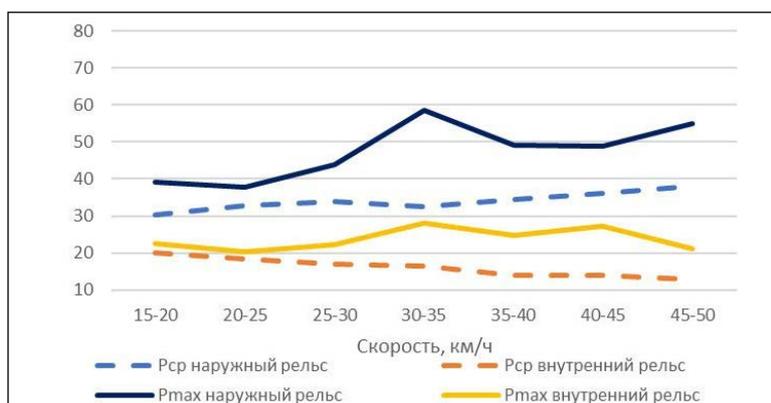
На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений горизонтальных поперечных сил на экспериментальном участке.



*а*

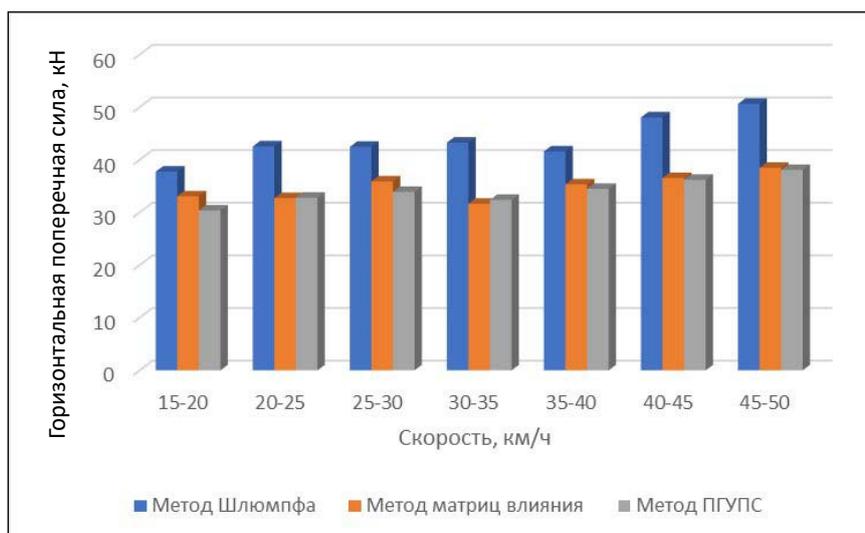


*б*

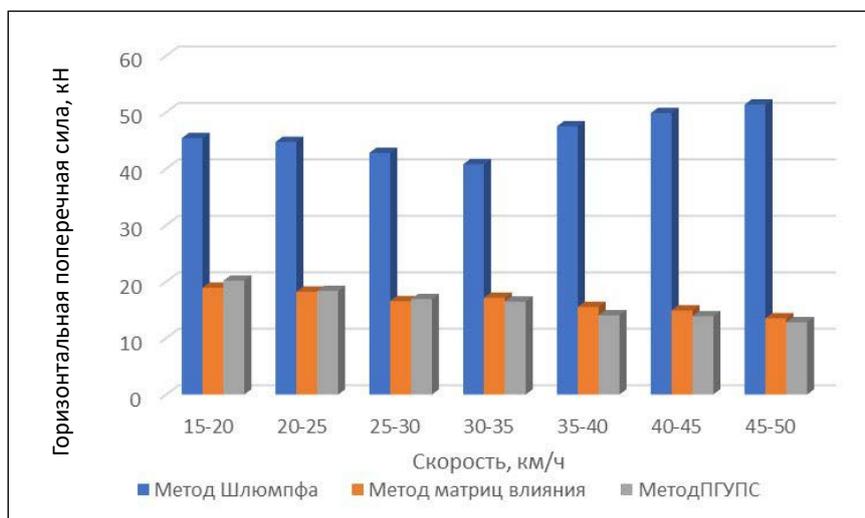


*в*

**Рис. 5.** Зарегистрированные значения горизонтальных поперечных сил от колес вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось и 25 т/ось:  
*а* — метод Шлюмфа; *б* — метод матрицы влияния; *в* — метод двух сечений (ПГУПС)



а



б

**Рис. 6.** Сравнение результатов измерений горизонтальных поперечных сил, полученных различными методами: *а* — наружный рельс; *б* — внутренний рельс

Анализ результатов показывает, что метод Шлюмпфа при измерении горизонтальных сил дает завышенные результаты. Разница в измеренных средних значениях горизонтальных сил методом Шлюмпфа с методом матриц влияния достигает 73,7 %, при сравнении метода Шлюмпфа

с методом двух сечений (ПГУПС) достигает 75 %. При этом метод двух сечений (ПГУПС) и метод матриц влияния хорошо коррелируются, разница в измеренных средних значениях горизонтальных сил не превышает 9,5 %. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение горизонтальных сил, измеренных различными методами от колес подвижного состава

Метод измерения	Разница в результатах, % при скорости движения, км/ч						
	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40	40–45	45–50
<b>Наружный рельс</b>							
Метод Шлюмпфа / метод матриц влияния	12,42	23,07	15,44	26,82	15,05	23,94	23,99
ПГУПС / метод Шлюмпфа	19,54	22,93	20,13	25,16	17,09	24,66	24,80
ПГУПС / метод матриц влияния	8,13	0,18	5,54	2,27	2,41	0,93	1,07
<b>Внутренний рельс</b>							
Метод Шлюмпфа / метод матриц влияния	58,35	59,28	61,36	57,98	67,34	70,10	73,70
ПГУПС / метод Шлюмпфа	55,60	58,96	60,49	59,60	70,45	72,16	75,04
ПГУПС / метод матриц влияния	6,20	0,76	2,18	3,85	9,54	6,91	5,11

### Заключение

В межгосударственный стандарт ГОСТ 34759–2021 (введенный взамен ГОСТ Р 55050–2012 [15]) был включен метод матриц влияния. При этом для выявления дефектов на поверхности катания колес действующий ГОСТ не распространяется.

По результатам работы установлено, что для измерения вертикальной силы возможно использовать методы, включенные в ГОСТ 34759-2021, а также метод двух сечений. Для измерения горизонтальной поперечной силы рекомендуется использовать метод матриц влияния и метод двух сечений (ПГУПС).

Метод двух сечений (ПГУПС) разработан с целью выявления повышенного динамического воздействия, вызванного изолированными и непрерывными неровностями на поверхности катания колес, неравномерной загрузкой вагона, а также при преодолении неровности на пути, длина которой меньше длины окружности по поверхности катания колеса. Интенсивность развития дефектов в рельсах, остаточных деформаций основной

площадки земляного полотна и, как следствие, отступлений по геометрии рельсовой колеи напрямую зависит от силового воздействия подвижного состава на путь. По нашему мнению, для оптимизации взаимодействия в системе «колесо — рельс» необходимо контролировать уровень силового воздействия колес. Данный метод может стать основой системы мониторинга подвижного состава на ходу на подходах к крупным сортировочным станциям, для измерения силового воздействия подвижного состава на путь на подходах к стрелочным переводам, искусственным сооружениям.

### Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р.
2. СТО «РЖД» 1.07.002–2010 «Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования».

3. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД», утвержденная Распоряжением ОАО «РЖД» от 28.08.2012 № 1704 р.

4. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / Пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2012. 568 с.

5. Беседин И. С., Мугинштейн Л. А., Захаров С. М. Развитие тяжеловесного движения на железных дорогах мира // Железные дороги мира. 2006. № 9. С. 39–48.

6. Проблемы содержания пути при высоких осевых нагрузках // Железные дороги мира. 2005. № 2. С. 66–70.

7. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний (с поправкой) // Официальное издание. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

8. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmessstreifen bei den SBB // Technische Rundschau. Bern, 1955. No. 26. S. 35–41.

9. Weber H. H. Zurdirekten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene // Elektrischen Bahnen. Bern, 1961. No. 5. S. 93–110.

10. Методика экспериментально-расчетного определения фактических значений силовых факторов, действующих на головку рельса от колес железнодорожного подвижного состава, с использованием измерения силового воздействия на путь методом «РЖД-2016» (первая редакция): утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 28.09.2016 № 1971р.

11. Методика экспериментально-расчетного определения фактических значений силовых факторов, действующих на головку рельса от колес железнодорожного подвижного состава, с использованием силового воздействия на путь методом «РЖД-2016» (аттестована ФГУП

«ВНИИМС»), свидетельство от 27 декабря 2019 г. № 103-205/RA.RU.311787-2016/2019 и зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений регистрационный номер № ФР.1.28.2019.36020).

12. Коссов В. С., Лунин А. А. Определение показателей воздействия подвижного состава на железнодорожный путь методом «РЖД-2016» // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». СПб.: ПГУПС, 2017. С. 123–126.

13. Рахимов Р. В. Нагруженность ходовых частей вагонов и пути и обоснование возможности увеличения осевых нагрузок на железных дорогах Республики Узбекистан: дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2020. 366 с.

14. Шевченко Д. В., Савушкин Р. А., Кузьминский Я. О. и др. Разработка новых методов определения силовых факторов воздействия подвижного состава на путь // Техника железных дорог. 2018. № 1 (41). С. 38–51.

15. ГОСТ Р 55050-2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 01.07.2013. Изм. 01.05.2020. М.: Стандартинформ, 2019.

Дата поступления: 05.05.2024

Решение о публикации: 28.05.2024

#### **Контактная информация:**

РОМАНОВ Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, доцент; andrey.romanov@mail.ru

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доцент, zhdp10@gmail.com

МИРОШНИК Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; alexmiroschnik@mail.ru

БУШУЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, доцент; 8921918@mail.ru

## The results of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods

A. V. Romanov, A. A. Kiselyov, A. A. Miroshnik, M. V. Bushuev

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

**For citation:** Romanov A. V., Kiselyov A. A., Miroshnik A. A., Bushuev M. V. The results of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 409–420. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-409-420

### Abstract

**Objective:** to assess the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods: Schlumpf, influence matrices and the two-section method (PGUPS). **Methods:** measurements of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track were carried out using the Schlumpf methods, influence matrices and the two-section method (PGUPS). **Results:** it was found that measurements of vertical dynamic forces by three methods are well correlated with each other, and the Schlumpf method gives overestimated results when measuring horizontal transverse force. **Practical importance:** the two-section method can be recommended for measuring the force effect of both new and upgraded rolling stock on the railway track, as well as for operated rolling stock in order to identify defects and deviations on the rolling surface of the wheels.

**Keywords:** wheel-rail contact, interaction of rolling stock with the upper structure of the track, long-component trains, increased axial loads, curved sections of small radius, heavy traffic.

### References

1. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda, utverzhennaya Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27 noyabrya 2021 goda № 3363-r. (In Russian)
2. STO "RZhD" 1.07.002–2010 "Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta na uchastkax obrashheniya gruzovy'x poezdov povy'shennogo vesa i dliny". *Texnicheskie trebovaniya*". (In Russian)
3. Instrukciya po organizacii obrashheniya gruzovy'x poezdov povy'shennoj massy' i dliny' na zheleznodorozhny'x putyax obshhego pol'zovaniya OAO "RZhD", utverzhennaya Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 28.08.2012 № 1704 r. (In Russian)
4. Obobshhenie mirovogo opy'ta tyazhelovesnogo dvizheniya. Konstrukciya i sodержanie zheleznodorozhnoj infrastruktury' / per.s angl. pod red. S. M. Zaxarova. M.: Intekst, 2012. 568 s. (In Russian)
5. Besedin I. S., Muginshtejn L. A., Zaxarov S. M. Razvitie tyazhelovesnogo dvizheniya na zhelezny'x dorogax mira // *Zhelezny'e dorogi mira*. 2006. № 9. S. 39–48. (In Russian)
6. Problemy' sodержaniya puti pri vy'sokix osevy'x nagruzkax // *Zhelezny'e dorogi mira*. 2005. № 2. S. 66–70. (In Russian)
7. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhny'j podvizhnoj sostav. Normy' dopustimogo vozdejstviya na zheleznodorozhny'j put' i metody' ispy'tanij (s popravkoj) // Oficial'noe izdanie. M.: FGBU "RST", 2021.7. GOST 34759-2021. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods (as amended) // Official publication. M.: Federal State Budgetary Institution "PCT", 2021. (In Russian)
8. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmesstreifen bei den SBB // *Technische Rundschau*. Bern, 1955. No. 26. S. 35–41.

9. Weber H. H. Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene // Elektrischen Bahnen. Vegp, 1961. No. 5. S. 93–110.

10. Metodika eksperimental'no-raschetnogo opredeleniya fakticheskix znachenij silovy'x faktorov, dejstvuyushhix na golovku rel'sa ot koles zhelezнодорожного подвижного состава, s ispol'zovaniem izmereniya silovogo vozdejstviya na put' metodom "RZhD-2016" (pervaya redakciya): utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 28.09.2016 № 1971r. (In Russian)

11. Metodika eksperimental'no-raschetnogo opredeleniya fakticheskix znachenij silovy'x faktorov, dejstvuyushhix na golovku rel'sa ot koles zhelezнодорожного подвижного состава s ispol'zovaniem silovogo vozdejstviya na put' metodom "RZhD-2016" (attestovana FGUP "VNIIMS", svidetel'stvo ot 27 dekabrya 2019 g. № 103-205/RA.RU.311787-2016/2019 i zaregistrovana v Federal'nom informacionnom fonde po obespecheniyu edinstva izmerenij registracionny'j nomer № FR.1.28.2019.36020). (In Russian)

12. Kossov V. S., Lunin A. A. Opredelenie pokazatelej vozdejstviya podvizhnogo sostava na zhelezнодорожny'j put' metodom "RZhD-2016" // Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii "Podvizhnoj sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty". SPb.: PGUPS, 2017. S. 123–126. (In Russian)

13. Raximov R. V. Nagruzhenost' xodovy'x chastej vagonov i puti i obosnovanie vozmozhnosti uvelicheniya osevy'x nagruzok na zhelezny'x dorogax Respubliki Uzbekistan: dis. ... dokt. texn. nauk. S-Pb., 2020. 366 s. (In Russian)

14. Shevchenko D. V., Savushkin R. A., Kuz'minskij Ya. O. i dr. Razrabotka novy'x metodov opredeleniya silovy'x faktorov vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' // Texnika zhelezny'x dorog. 2018. № 1 (41). S. 38–51. (In Russian)

15. GOST R 55050-2012. Zhelezнодорожny'j podvizhnoj sostav. Normy' dopustimogo vozdejstviya na zhelezнодорожny'j put' i metody' ispy'tanij. Vved. 01.07.2013. Izm. 01.05.2020. M.: Standartinform, 2019. (In Russian)

Received: 05.05.2024

Accepted: 28.05.2024

**Author's information:**

Andrey V. ROMANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; andrey.romanov@mail.ru

Artyom A. KISELYOV — PhD in Engineering, Associate Professor; zhdp10@gmail.com

Alexander A. MIROSHNIK — PhD in Engineering, Associate Professor; alexmiroschnik@mail.ru

Mikhail V. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; 8921918@mail.ru