

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДЛЯ АНАЛИЗА СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА И РЕЛЬСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ТЕНЗОМЕТРИИ

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена обоснованию выбора конкретного участка железнодорожного пути для проведения тензометрических исследований силового взаимодействия в системе «колесо–рельс». С ростом скорости движения, осевых нагрузок и усложнением профиля пути возрастает необходимость точного мониторинга сил, воздействующих на рельсы. Взаимодействие в системе «колесо–рельс» оказывает ключевое влияние на износ рельсов, стабильность движения подвижного состава и безопасность эксплуатации в целом.

В статье рассматриваются особенности напряжений и сил, возникающих в криволинейных участках пути, особенно в зонах переходных кривых, где происходит перераспределение вертикальных и поперечных нагрузок. С помощью программного комплекса «Универсальный механизм» выполнено моделирование участка с радиусом кривой 540 м. Результаты показали, что вертикальные силы в переходных зонах достигают 132 кН, а поперечные — до 20 кН, что существенно превышает аналогичные значения на прямых участках.

Для повышения точности измерений предложено размещение тензодатчиков в трех точках криволинейного участка: на входе в кривую, в её середине и на выходе. Такой подход позволяет отследить динамику силовых изменений на всем протяжении кривой. Полученные данные являются основой для создания эффективных систем технического мониторинга, оценки остаточного ресурса пути и принятия решений по его обслуживанию. Результаты исследования особенно актуальны для участков с тяжеловесным и высокоскоростным движением поездов.

**Ключевые слова:** тензометрия, колесо-рельс, силовое взаимодействие, криволинейные участки, вертикальные и поперечные силы, динамика движения, железнодорожный путь, имитационное моделирование.

A.F. Gumarova<sup>1</sup>, I.L. Parakhnenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russian Federation

## JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF A RAILWAY TRACK SECTION FOR ANALYZING THE FORCES OF INTERACTION BETWEEN A WHEEL AND A RAIL USING STRAIN GAUGES

**Abstract.** This study focuses on substantiating the selection of a specific railway track section for strain gauge measurements of the wheel–rail interaction forces. With increasing axle loads, speeds, and the complexity of track geometry, it becomes essential to monitor the dynamic loads affecting the rail. The wheel–rail interface plays a critical role in determining rail wear, rolling stock stability, and overall operational safety.

The paper examines stress and force distributions occurring in curved sections of the track, particularly in transition curves where significant redistribution of vertical and lateral forces takes place. Simulation modeling was performed using the "Universal Mechanism" software on a curve with a 540 m radius. Results showed that vertical forces in transitions could reach 132 kN, while lateral forces rose to 20 kN—values considerably higher than those observed on straight sections.

To improve measurement accuracy, the installation of strain gauges is proposed at three key points: the entrance to the curve, the midpoint, and the exit. This strategic positioning enables comprehensive tracking of force dynamics across the entire curved segment. The data obtained provides a foundation for the development of advanced condition monitoring systems, assessment of infrastructure fatigue, and timely maintenance decision-making. The findings are particularly relevant for railways experiencing heavy and high-speed train traffic.

**Keywords:** strain gauge, wheel-rail, force interaction, curved sections, vertical and transverse forces, motion dynamics, railway track, simulation modeling.

Железнодорожный транспорт остаётся одним из ключевых видов сообщения, обеспечивая высокую грузо- и пассажироперевозочную способность. При этом вопросы безопасности, надёжности и ресурса элементов инфраструктуры, особенно железнодорожного пути, приобретают высокую значимость на фоне роста скоростей движения, увеличения осевых нагрузок и удорожания содержания пути.

Одной из ключевых задач в области технической диагностики пути является оценка взаимодействия колеса и рельса, поскольку в этой контактной зоне концентрируются основные механические воздействия, влияющие на:

- износ рельсов и гребней колёс;
- развитие дефектов пути;
- динамику движения и устойчивость подвижного состава;
- безопасность эксплуатации в целом [1].

Максимальные напряжения и силы возникают на криволинейных участках пути, особенно в условиях малого радиуса кривизны, продольного уклона, переходных кривых и смешанных режимов движения.

Применение тензометрических методов даёт возможность получать данные высокой точности непосредственно с рельса, без разрушения конструкции и с возможностью длительного мониторинга. Это делает их крайне востребованными как в научных исследованиях, так и в практической эксплуатации.

Выбор участка пути, на котором будут проводиться такие измерения, критически важен для достоверности, информативности и применимости результатов. Поэтому обоснование выбора участка с учётом эксплуатационных и технических факторов является необходимым этапом в системе контроля и оценки взаимодействия «колесо-рельс».

Система «колесо-рельс» является основным элементом передачи нагрузок от подвижного состава к железнодорожному пути. От характера взаимодействия между колесом и рельсом напрямую зависят безопасность движения, износ элементов пути и устойчивость подвижного состава. Взаимодействие характеризуется:

- вертикальными силами, обусловленными массой подвижного состава;
- горизонтальными (направляющими) силами, возникающими при прохождении кривых;
- продольными силами, возникающими при торможении, ускорении, буксовании, трогании с места.

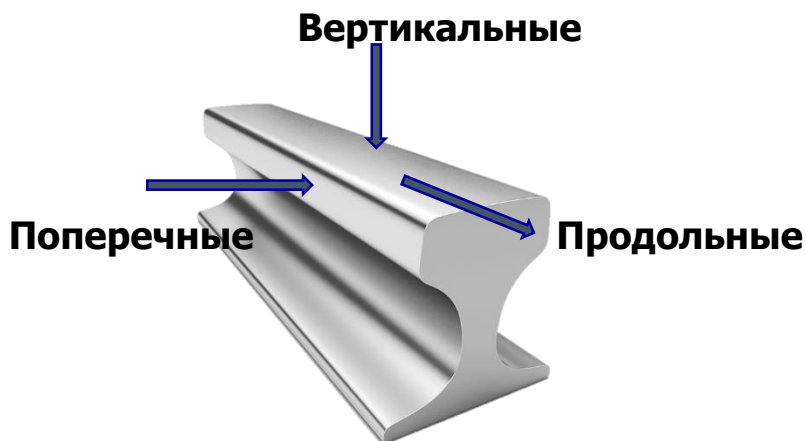


Рис.1 – Силы, действующие на рельс

Адекватным инструментом анализа силового взаимодействия является программный комплекс «Универсальный механизм», который позволяет интегрировать результаты тяговых расчетов, полученных в «ИСКРА – ПТР».

Для имитационного моделирования использована математическая модель 3D вагона, которая позволяет проанализировать динамику отдельного экипажа в составе поезда и силовое взаимодействие в системе «колесо-рельс». Исходными данными выступают: поперечные профили колес и характеристик подсистем вагона, взаимная ориентация колес и рельсов. Левое и правое колесо вагона рассматривают отдельно со своими системами координат [2].

В программном комплексе «Универсальный механизм» есть возможность задавать параметры кривых участков (направления, радиус, возвышение, длины переходных кривых, коэффициент трения). Для определения силового взаимодействия в системе «колесо-рельс» было проведено моделирование участка кривой радиусом 540 м.

Для данного исследования были проанализированы следующие компоненты сил взаимодействия «колесо-рельс»:

- Суммарная сила в поперечном направлении;
- Суммарная сила в вертикальном направлении.

Результат моделирования представлены на рис. 2,3.

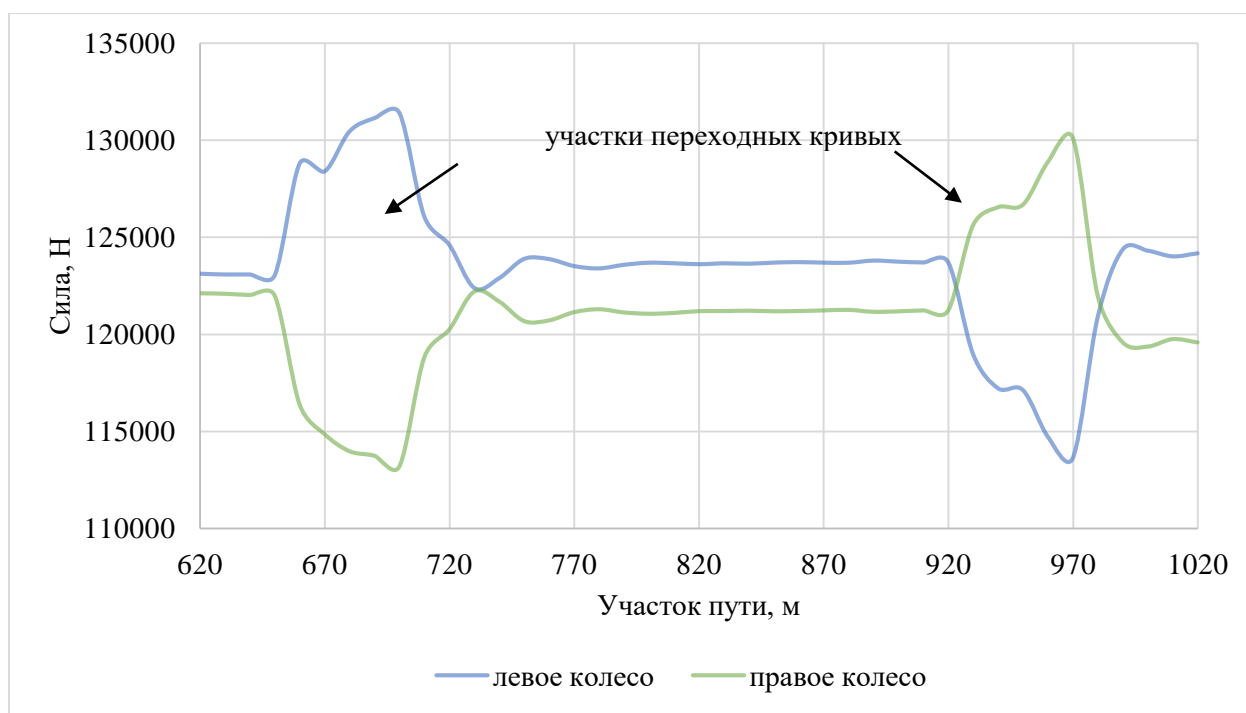


Рис.2 – Суммарная сила в вертикальном направлении в кривой R=540 м (правая)

Вертикальные силы в переходных кривых, как правило, оказываются выше, чем на прямых или в кривых постоянного радиуса, что объясняется рядом факторов, связанных с динамикой движения и геометрией пути.

В первую очередь, в переходной кривой происходит постепенное изменение возвышение наружной нити, которое необходимо для уравнивания центробежных сил. Однако инерционный отклик тележек вызывает перераспределение массы подвижного состава: нагрузка смещается на внешние колёса, что приводит к локальному росту вертикальных сил. Это создает перекося в системе, часть которого компенсируется за счёт увеличения вертикального давления на наружный рельс. Всё это приводит к тому, что вертикальные силы на рельс в переходных кривых оказываются существенно выше, чем в других элементах макрогеометрии пути, особенно при тяжеловесном и скоростном движении [3].

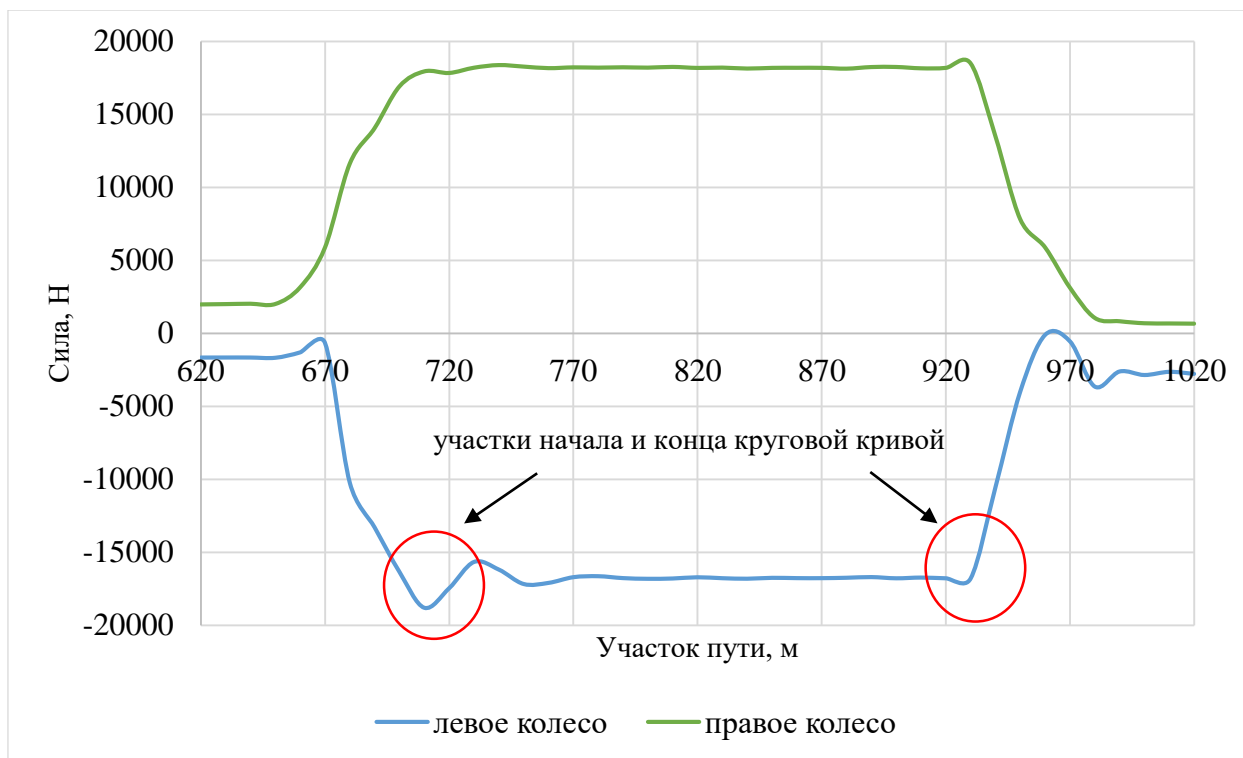


Рис.3 – Суммарная сила в поперечном направлении в кривой R=540 м (правая)

Поперечные силы в криволинейных участках пути играют ключевую роль в системе взаимодействия «колесо-рельс» и существенно отличаются по своему характеру и величине от аналогичных сил на прямых участках. При прохождении кривой на подвижной состав действует центробежная сила, направленная наружу от центра кривой. Эта сила уравнивается реакцией рельса, которая проявляется как поперечная сила, действующая со стороны рельса на колесо — в сторону центра кривизны. При этом сила возникает не только за счёт геометрии пути, но и в зависимости от скорости движения, массы состава, радиуса кривой и величины возвышения наружного рельса.

В целом, поперечные силы в кривых являются доминирующим фактором, определяющим боковой износ рельса, гребней колёс, а также долговечность и надёжность элементов верхнего строения пути. Именно в кривых происходит наибольший объём работ по обслуживанию железнодорожной инфраструктуры, что напрямую связано с действием поперечных усилий [4].

Проведенное исследование показало, что в кривых среднего радиуса (500 – 800 м), вертикальные силы возрастают на участках переходных кривых до 132 кН, что превышает данное значение в прямом участке на 10 кН, однако в круговой кривой силы уменьшаются до уровня прямого участка. Поперечные же силы возрастают до 20 кН и остаются в таком значении на всем протяжении кривой.

Именно по этой причине тензометрические измерения целесообразно проводить на криволинейных участках пути, где поперечные и вертикальные силы достигают наибольших значений. В кривых:

- наблюдаются максимальные поперечные силы из-за центробежного эффекта и контакта гребня колеса с боковой гранью рельса;
- усиливаются вертикальные динамические нагрузки из-за перераспределения веса между колесами и тележками.

Ожидается, что тензометрические измерения на данном участке позволят:

- оценить распределение и интенсивность горизонтальных и вертикальных сил;
- выявить влияние осевой нагрузки на характер силового взаимодействия.

Тензодатчики целесообразно устанавливать в начале, в конце и в середине круговой кривой, поскольку именно в этих точках наблюдаются различные особенности и изменения нагрузок на рельсовый путь, связанные с динамикой движения и геометрией пути.

В начале кривой происходит переход с прямого участка на радиусный, что сопровождается резким изменением направления сил и высокими динамическими нагрузками. Датчики здесь фиксируют начальные пиковые значения и реакцию пути.

В середине кривой при устоявшемся движении нагрузки стабилизируются, но сохраняются значительные вертикальные и поперечные силы. Измерения в этой точке помогают понять режимы устоявшегося движения.

В конце кривой происходит выход на прямой участок, сопровождаемый изменениями нагрузок и возможными пиковыми скачками из-за инерционных эффектов. Здесь датчики фиксируют динамику выходных нагрузок.

Таким образом, размещение тензодатчиков в этих трёх ключевых точках кривой обеспечивает комплексный и всесторонний анализ распределения и динамики силовых воздействий на путь, что важно для точной оценки состояния и долговечности верхнего строения железнодорожного пути.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Воробьев А.А. Контактное взаимодействие колеса и рельса // Вестник ИрГТУ. 2009. №3 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontaktное-vzaimodeystvie-kolesa-i-relsa>
2. Матюнин В.А., Парахненко И.Л. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДА НА ПРОДОЛЬНЫЕ И БОКОВЫЕ СИЛЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ. Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 160-164.
3. Романова О.В., Боботкова В.Н. Взаимодействие пути и подвижного состава // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум».
4. Ромен Ю.С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо - рельс при движении поезда в кривых. Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). 2015;(1):17-26.

### **REFERENCES**

1. Vorobyov A.A. Contact interaction of wheel and rail // Bulletin of IrSTU. 2009. No. 3 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontaktное-vzaimodeystvie-kolesa-i-relsa>
2. Matyunin V.A., Parakhnenko I.L. INFLUENCE OF TRAIN DRIVING MODES ON LONGITUDINAL AND LATERAL FORCES ARISING IN CURVED SECTIONS. The young science of Siberia. 2021. No. 1 (11). pp. 160-164.
3. Romanova O.V., Bobotkova V.N. Interaction of track and rolling stock // Materials of the X International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum".
4. Roman Yu.S. Factors determining the processes of interaction in the coal-rail system when a train is moving in curves. Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport (BULLETIN of VNIIZHT). 2015;(1):17-26.

### **Информация об авторах**

*Гумарова Азалия Фларидовна* - аспирант кафедры «Путь и железнодорожное строительство», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: [azaliya.gumarova@mail.ru](mailto:azaliya.gumarova@mail.ru)

*Парахненко Инна Леонидовна* – к.т.н., доцент кафедры «Путь и железнодорожное строительство», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: [Iparahnenko@usurt.ru](mailto:Iparahnenko@usurt.ru)

### **Information about the authors**

*Gumarova Azaliya Flaridovna* - Postgraduate student of the Department of Track and Railway Construction, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, e-mail: azaliya.gumarova@mail.ru

*Parakhnenko Inna Leonidovna* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Track and Railway Construction, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, e-mail: Iparahnenko@usurt.ru