

**В.А. Матюнин<sup>1</sup>, И.Л. Парахненко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская Федерация

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДА НА ПРОДОЛЬНЫЕ И БОКОВЫЕ СИЛЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ**

**Аннотация.** Протяженность кривых участков железных дорог РФ составляет 33% от общей длины путей, из них 13% составляют кривые малых радиусов от 400 до 700 м. При пропуске подвижного состава по кривым малого радиуса в контакте «колесо–рельс» возникают продольные и боковые силы, которые в свою очередь приводят к нарушению геометрии пути, а также увеличивается износ колесных пар и рельсов.

Подвижной состав осуществляет движение в трех режимах: тяга, выбег и торможение, в зависимости от продольного профиля. В статье приведены результаты исследования продольных и боковых сил в контакте «колесо-рельс», возникающие в кривых участках, полученные путем моделирования в программных комплексах «ИСКРА – ПТР» и «Универсальный механизм» [1]. Эти программные комплексы позволяют задавать различные параметры такие как: скорость движения, кривые и прямые вставки для участка моделирования (макрогеометрию) и рассчитывать режимы ведения поезда.

Объектом испытания является грузовой подвижной состав длиной 968 м и массой 6494 т с вариантами скоростей движения по железнодорожному пути с различными параметрами.

На основании полученных данных установлено, что при уменьшении радиуса кривой увеличивается силовое воздействие между колесом и рельсом. Максимальные значения сил составили 38,5 кН при торможении в кривой радиусом 380 м, а для кривой максимального радиуса 990 м при тех же условиях значения сил составили 18,5 кН. Также при увеличении скорости силовые нагрузки изменялись в большую сторону.

**Ключевые слова:** режим движения, продольная сила, боковая сила, кривые

**V. A. Matyunin<sup>1</sup>, I. L. Parakhnenko<sup>1</sup>**

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

## **INFLUENCE OF TRAIN DRIVING MODES ON LONGITUDINAL AND LATERAL FORCES OCCURRING IN CURVED SECTION**

**Abstract:** The length of the curves of the railway sections of the Russian Federation is 33% of the total length of the tracks, of which 13% are curves of small radii from 400 to 700 m. When rolling stock passes along curves of a small radius in the "wheel-rail" contact, longitudinal and lateral forces arise, which in turn lead to a violation of the geometry of the track, and also increases the wear of wheel pairs and rails.

The rolling stock moves in three modes: traction, run-out and braking, depending on the longitudinal profile. The article presents the results of the study of the longitudinal and lateral forces in the wheel-rail contact that occur in the curved sections, obtained by modeling in the program complexes "ISKRA-PTR" and "Universal Mechanism" [1]. These software packages allow you to set various parameters, such as the speed of movement, curves and straight inserts for the modeling section (macrogeometry) and calculate the driving modes of the train.

The object of the test is a freight rolling stock with a length of 968 m and a weight of 6494 tons with speed variations on the railway track and with different parameters.

Based on the obtained data, it was found that as the radius of the curve decreases, the force effect between the wheel and the rail increases. The maximum values of the forces were 38.5 kN when moving in a curve with a radius of 380 m, and for a curve with a maximum radius of 990 m under the same conditions, the values of the forces were 18.5 kN. Also, as the speed increased, the power loads changed in a larger direction.

**Key words:** driving mode, longitudinal force, lateral force, curves.

### **Введение**

Целью исследования является определение влияния режима ведения состава путем проектирования продольного профиля пути, в виде – подъема и спуска. Для этого взят участок железнодорожного пути с параметрами, представленными в таблице 1. Для определения режима движения поезда и проведения тяговых расчётов использовалась программа «ИСКРА – ПТР» [2]. В качестве модели создан подвижной состав длиной 968 м и массой 6494 т. Расчет

проведен для трёх скоростных режимов: 40, 60 и 80 км/ч. Результаты тяговых расчётов приведены на рисунках 1 и 2.

Параметр	Длина, м
Прямая вставка, м	76.71
Круговая кривая (левая): R=380 м, $l_1=70$ м, $l=147.89$ м, $l_2=110$ м $h=70$ см	327.89
Прямая вставка, м	404.6
Круговая кривая (левая): R=540 м, $l_{1,2}=100$ м, $l=78.76$ м, $h=100$ см	278.76
Прямая вставка, м	93.66
Круговая кривая (правая): R=630 м, $l_{1,2}=80$ м, $l=284.32$ м, $h=85$ см	444.32
Прямая вставка, м	371.67
Круговая кривая (правая): R=990 м, $l_1=100$ м, $l=285.31$ м, $l_2=110$ м $h=75$ см	495.31
Прямая вставка, м	1090.87
Общая длина	3600

Таблица 1 – Макрогеометрия рассматриваемого участка

Действительный километраж, км	Расстояние от начала участка, км	Длина элемента [шага], м	Фактический уклон, %	Фактическая отметка, м	Режим движения	Скорость, км/ч
0.0+0	0	100	2.4	0 XX		40
0.1+0	0.1	100	-0.4	0.22 XX		39.41
0.2+0	0.2	100	-0.4	0.18 XX		38.71
0.3+0	0.3	100	-0.4	0.14 17-П		38.08
0.4+0	0.4	100	2.4	0.38 17-П		38.59
0.5+0	0.5	100	2.4	0.62 17-П		38.93
0.6+0	0.6	100	3.7	0.99 17-П		39.15
0.7+0	0.7	100	3.7	1.36 17-П		39.29
0.8+0	0.8	100	2.6	1.62 17-П		39.25
0.9+0	0.9	100	2.6	1.88 17-П		39.12
1.0+0	1	100	4	2.28 17-П		38.93
1.1+0	1.1	100	4	2.68 17-П		38.77
1.2+0	1.2	100	4	3.08 17-П		38.68
1.3+0	1.3	100	4	3.48 17-П		38.58
1.4+0	1.4	100	4	3.88 17-П		38.44
1.5+0	1.5	100	2.2	4.1 17-П		38.28
1.6+0	1.6	100	2.2	4.32 17-П		38.13
1.7+0	1.7	100	4.1	4.73 17-П		38.23
1.8+0	1.8	100	4.1	5.14 17-П		39.27
1.9+0	1.9	100	4.1	5.55 17-П		39.97
2.0+0	2	100	4.1	5.96 17-П		39.67
2.1+0	2.1	100	4.1	6.37 17-П		39.35
2.2+0	2.2	100	4.1	6.78 17-П		39.02
2.3+0	2.3	100	4.1	7.19 17-П		38.73
2.4+0	2.4	100	3.6	7.55 17-П		38.5
2.5+0	2.5	100	3.6	7.91 17-П		38.33
2.6+0	2.6	100	3.6	8.27 17-П		38.19
2.7+0	2.7	100	3.2	8.6 17-П		38.13
2.8+0	2.8	100	3.2	8.92 17-П		38.09
2.9+0	2.9	100	3.2	9.24 17-П		38.06
3.0+0	3	100	2.8	9.52 17-П		38.05
3.1+0	3.1	100	2.8	9.8 17-П		38.08
3.2+0	3.2	100	3.6	10.15 17-П		38.13
3.3+0	3.3	100	3.6	10.51 17-П		38.28
3.4+0	3.4	100	2.7	10.81 17-П		38.48
3.5+0	3.5	100	2.7	11.08 17-П		38.79
3.6+0	3.6	0	2.7	11.35 17-П		39.15

Рис. 1 Результаты тяговых расчетов для подъема

Действительный километраж, км	Расстояние от начала участка, км	Длина элемента [шага], м	Фактический уклон, %	Фактическая отметка, м	Режим движения	Скорость, км/ч
0.0+0	0	100	-2.4	0 XX		40
0.1+0	0.1	100	0.4	-0.22 XX		39.79
0.2+0	0.2	100	0.4	-0.18 17-П		39.97
0.3+0	0.3	100	0.4	-0.14 17-П		39.95
0.4+0	0.4	100	-2.4	-0.38 17-П		39.52
0.5+0	0.5	100	-2.4	-0.62 17-П		39.89
0.6+0	0.6	100	-3.7	-0.99 17-П		39.67
0.7+0	0.7	100	-3.7	-1.36 17-П		39.84
0.8+0	0.8	100	-2.6	-1.62 17-П		39.81
0.9+0	0.9	100	-2.6	-1.88 17-П		39.78
1.0+0	1	100	-4	-2.28 17-П		39.76
1.1+0	1.1	100	-4	-2.68 17-П		39.75
1.2+0	1.2	100	-4	-3.08 17-П		39.74
1.3+0	1.3	100	-4	-3.48 17-П		39.74
1.4+0	1.4	100	-4	-3.88 17-П		39.73
1.5+0	1.5	100	-2.2	-4.1 17-П		39.72
1.6+0	1.6	100	-2.2	-4.32 17-П		39.71
1.7+0	1.7	100	-4.1	-4.73 17-П		39.69
1.8+0	1.8	100	-4.1	-5.14 17-П		39.68
1.9+0	1.9	100	-4.1	-5.55 17-П		39.67
2.0+0	2	100	-4.1	-5.96 17-П		39.66
2.1+0	2.1	100	-4.1	-6.37 17-П		39.66
2.2+0	2.2	100	-4.1	-6.78 17-П		39.7
2.3+0	2.3	100	-4.1	-7.19 17-П		39.72
2.4+0	2.4	100	-3.6	-7.55 17-П		39.73
2.5+0	2.5	100	-3.6	-7.91 17-П		39.75
2.6+0	2.6	100	-3.6	-8.27 17-П		39.76
2.7+0	2.7	100	-3.2	-8.6 17-П		39.77
2.8+0	2.8	100	-3.2	-8.92 17-П		39.78
2.9+0	2.9	100	-3.2	-9.24 17-П		39.79
3.0+0	3	100	-2.8	-9.52 17-П		39.8
3.1+0	3.1	100	-2.8	-9.8 17-П		39.84
3.2+0	3.2	100	-3.6	-10.15 17-П		39.87
3.3+0	3.3	100	-3.6	-10.51 17-П		39.9
3.4+0	3.4	100	-2.7	-10.81 17-П		39.93
3.5+0	3.5	100	-2.7	-11.08 17-П		39.97
3.6+0	3.6	0	-2.7	-11.35 17-П		40

Рис. 2 Результаты тяговых расчетов для спуска

В работе рассмотрены основные силы, возникающие в контакте «колесо–рельс» такие как: продольные и боковые.

Продольные силы возрастают при переходных режимах движения поезда, во время манёвров и роспуска с горок, а также при колебаниях подергивания движущего вагона в поезде. Вызывают угон пути, влияют на продольно-поперечный изгиб рельса, а также увеличивают интенсивность виляния [3].

Боковые силы [4] действуют на удержание элементов креплений и подрельсовое осевое в поперечном направлении. Влияют на ширину колеи.

Для анализа сил взаимодействия пути и подвижного состава при полученных вариантах было принято решение воспользоваться программным комплексом ПК «Универсальный механизм» и интегрировать полученные результаты из «ИСКРА – ПТР» [2].

Программа «Универсальный механизм» [1] в данном служит для моделирования движения состава в кривых участках при разных скоростях движения и получения данных для дальнейшего анализа.

Для проведения исследований использована математическая модель 3D вагона, которая позволяет исследовать динамику движения на прямых и кривых участках пути. С ее помощью возможно собирать данные по ходу движения состава, а после полученный массив данных обрабатывать по методу статистической обработки исследований с помощью регрессионного анализа.

### Результаты моделирования продольных и боковых сил

С целью извлечения единого числового результата рассчитывалось среднее арифметическое значение силы в кН для каждого колеса. Был использован состав, состоящий из двух локомотивов ВЛ80С и 67 полувагонов с нагрузкой на ось 23,5 т. Для сбора данных были использованы три 3D вагона расставленных друг за другом в начале состава. Благодаря такому расположению они воспринимают на себя наибольшие нагрузки при прохождении кривых участков, что позволит получить максимально допустимые значения при заданных скоростях движения [5]. Расположение 3D вагонов представлено на рисунке 3.



Рис. 3 Расположение 3D вагонов в составе

Сначала производилась обработка данных, полученных при моделировании для каждого колеса колесной пары, далее анализировались значения от всех экипажей для рассматриваемой колесной пары. При соблюдении условия разброса полученных значений сил в разных местах подвижного состава не более 10% рассчитывалось среднее значение сил от внутреннего и наружного колеса. Производился расчет среднеквадратического отклонения. В случае если установленное условие (разница не более 10%) не выполнялось, моделирование проводилось заново. Результаты моделирования продольных и боковых сил приведены в таблице 2.

Скорость, км/ч	R=380 м			R=540 м			R=630 м			R=990 м		
	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
Продольные силы, кН												
Тяга	11.5	11.7	12.0	11.0	11.4	11.7	10.3	10.8	11.2	10.1	10.5	10.9
Торможение	12.3	12.8	13.1	11.5	12.0	12.3	10.8	11.3	11.7	10.6	10.9	11.3
Боковые силы, кН												
Тяга	31.4	34.4	36.1	25.1	26.3	28.5	22.5	24.1	24.3	14.5	15.2	17.1
Торможение	33.6	37.0	38.5	26.2	27.8	29.9	24.0	25.8	26.0	15.7	16.8	18.5

Таблица 2. Результаты моделирования продольных и боковых сил

Анализ полученных результатов выявил, что максимальное влияние на силы оказывает режим ведения в кривой радиусом 380 м (при V=80 км/ч) и составляет 13,1 кН. Продольные силы в этом случае увеличиваются на 8,7% относительно тягового режима (средний процент

увеличения сил для всех скоростных режимов составляет 7,7%) В кривой R=990м, продольные силы составляют 10,6 кН на минимальной скорости при движении на спуске и увеличиваются на 4,7% по сравнению с режимом тяги. Зависимость продольных сил от скорости движения и радиуса кривых приведена на рисунке 4.

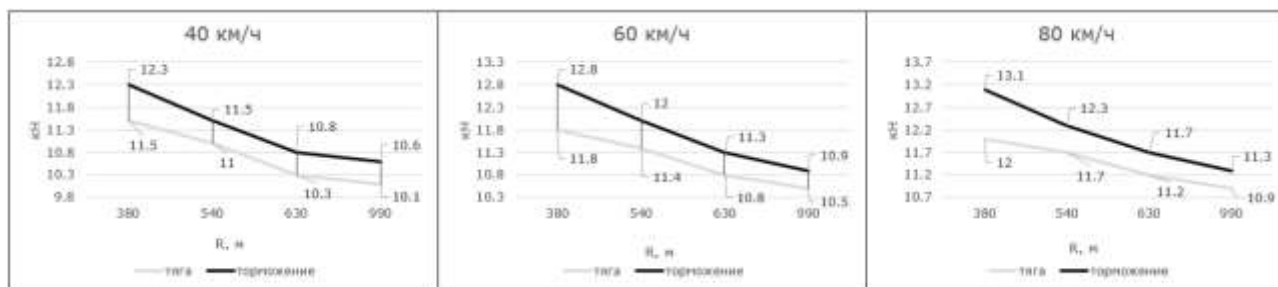


Рис. 4 Зависимость продольных сил от скорости

В кривой радиусом 380 м максимальные боковые силы для режима ведения торможения составили 38,5 кН (при V=80 км/ч). В процентном отношении боковые силы в режиме торможения больше сил тяги на 8,8%. Среднее значение боковых сил составляет 37,4 кН, при скорости движения V=80 км/ч. При увеличении радиуса кривой от 380 м до 990 м боковые силы уменьшились до среднего значения в 17 кН, это вдвое меньше максимальных значений при той же скорости. Для минимальной скорости (V=40 км/ч) кривой радиуса 990 м боковые силы на спуске равны 15,7 кН. Зависимость продольных сил от скорости движения и радиуса кривых приведена на рисунке 5.

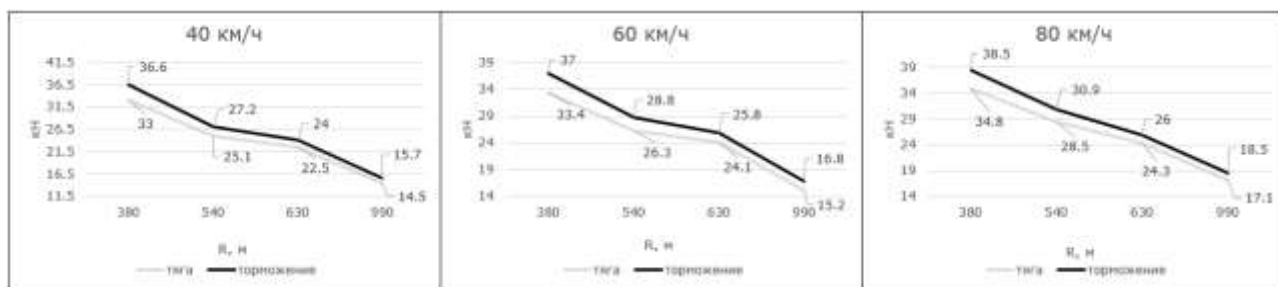


Рис. 5 Зависимость боковых сил от скорости

### Заключение

Проведенный анализ с помощью компьютерного моделирования показывает, что при режиме торможения значения сил больше чем при режиме тяги. Наибольшие значения силы на спуске составили 38,5 кН в кривой радиусом 380 м (при V=80 км/ч). При той же скорости 80 км/ч в кривой радиусом 990 м силы равны 18,5 кН, что в два раза меньше чем в кривой 380 м. Это говорит о том, что при прохождении составом кривых малого радиуса воздействие боковых сил на экипаж значительно выше чем в кривых большого радиуса.

Разница между продольными силами во всех кривых не превысила 10%, что позволяет говорить о минимальном влиянии режима ведения поезда, на силы в контакте «колесо–рельс».

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. УМ. - Электрон. Журн. - Лаборатория вычислительной механики, 2019 – Режим доступа: <http://www.umlub.ru/pages/index.php?id=1>
2. Программно-технологический комплекс ИСКРА-ПТР - Режим доступа: <https://www.sites.google.com/site/isystemgdt/iskratitle/iskraprtruch>
3. Певзнер В.О. Оценка работы пути, находящегося под воздействием продольных сил

при реализации максимальных тяговых режимов при использовании электровозов с асинхронным тяговым приводом - Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 4. С. 209–216.

4. Ковенькин Д.А. Исследование воздействия суммарных боковых сил на элементы верхнего строения пути при вписывании экипажа в кривые участки пути / Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации российских железных дорог / Материалы всероссийской научно-практической конференции - 10-11 октября 2007, Т 1. С. 23–26 с.

5. Парахненко И.Л. Анализ сил взаимодействия в контакте «колесо-рельс» при различных трибологических вариантах. Транспорт Урала. Екатеринбург : УрГУПС. 2019. №2 (61). С.54-57.

## REFERENCES

1. UM. - Electron. Journal-Laboratory of Computational Mechanics, 2019-Access mode: <http://www.umlub.ru/pages/index.php?id=1>

2. Software and technology complex ISKRA-PTR-Access mode: <https://www.sites.google.com/site/isystemgdt/iskratitle/iskraptruch>

3. Pevsner V. O. Evaluation of the work of the track under the influence of longitudinal forces when implementing maximum traction modes when using electric locomotives with asynchronous traction drive-Vestnik VNIIZHT. 2020. Vol. 79. No. 4. pp. 209-216.

4. Kovenkin D. A. Investigation of the impact of total lateral forces on the elements of the upper structure of the track when entering the crew into the curves of the track sections / Problems and prospects of research, design, construction and operation of Russian railways / Materials of the All-Russian scientific and practical conference-October 10-11, 2007, Vol. 1. pp. 23-26.

5. Parakhnenko I. L. Analysis of interaction forces in the "wheel-rail" contact under various tribological variants. Transport of the Urals. Yekaterinburg : USUPS. 2019. No. 2 (61). pp. 54-57.

## Информация об авторах

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

*Матюнин Владислав Александрович* – студент гр. СЖДт-526 кафедры «Путь и железнодорожное строительство», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: [vlad742011@mail.ru](mailto:vlad742011@mail.ru)

## Authors

*Inna Leonidovna Parakhnenko-lecturer of the department "Road and railway construction", Ural state University of railway transport, Yekaterinburg, e-mail: [iparahnenko@usurt.ru](mailto:iparahnenko@usurt.ru)*

*Matyunin Vladislav Aleksandrovich-student of gr. SZHDT-526 of the department "Road and Railway Construction", Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, e-mail: [vlad742011@mail.ru](mailto:vlad742011@mail.ru)*

## Для цитирования

Матюнин В.А. Влияние режимов ведения поезда на продольные и боковые силы, возникающие в кривых участках [Электронный ресурс] / И.Л. Парахненко, В.А. Матюнин // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. — №1(11). – Режим доступа: <https://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>, свободный. – Загл. с экрана. — Яз. рус., англ.

## For citation

Matyunin V.A. Influence of train driving modes on longitudinal and lateral forces occurring in curved sections [Electronic resource] / V.A. Matyunin, I.L. Parahnenko // Young science of Siberia: electron. scientific. zhurn. – 2021. – No. 1(11). – Access mode: <https://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>, free. - Title from the screen. - Yaz. rus, eng.