

УДК 625.12.033.38

Анализ влияния динамической нагрузки колеса на рельсы условиях скоростного движения поездов в Узбекистане

С. Т. Джаббаров, Н. Б. Кодиров

Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100167, г. Ташкент, ул. Темир-йулчилар, 1

Для цитирования: Джаббаров С. Т., Кодиров Н. Б. Анализ влияния динамической нагрузки колеса на рельсы в условиях скоростного движения поездов в Узбекистане // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 531–543. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-531-543

Аннотация

Цель: Обоснование выбора факторов, определяющих формирование динамической нагрузки на железнодорожный путь со стороны современного подвижного состава при скоростном и высокоскоростном движении. Для достижения этой цели были проведены теоретические предпосылки и экспериментальные исследования. В результате работы разработана методика определения вертикальной расчетной силы, которая действует от колеса на рельс. **Методика:** Скоростные и высокоскоростные поезда, в силу своей принципиальной конструкции и значительного увеличения скорости движения, требуют пересмотра методов расчета воздействия подвижного состава на железнодорожный путь. Это включает анализ соотношений среднеквадратических отклонений различных динамических сил и оценку влияния различных факторов при разных скоростях движения. **Результаты:** В рамках работы были проведены экспериментальные измерения для изучения изменений динамической нагрузки. В результате были получены зависимости между средней и расчетной вертикальными силами и скоростью движения для современных пассажирских поездов. С использованием факторного дисперсионного анализа были получены численные характеристики влияния различных факторов на значение вертикальной силы, действующей от колеса на рельс. Также были определены степени влияния различных факторов на формирование этой силы.

Ключевые слова: Расчет пути на прочность, верхнее строение пути, скоростное движение, напряжение в пути, динамическая сила, динамическое неравенство.

Введение

Выполняя расчеты прочности пути, решаются разнообразные задачи, такие как определение напряжений и деформаций, возникающих в элементах верхнего строения железнодорожного пути из-за воздействия движущегося поездного состава, обоснование конструкции и оценка мощности пути по установленным условиям эксплуатации, расчет допустимых скоростей движения по условиям прочности пути, установка температурного

режима эксплуатации бесстыкового пути и т. п. Их методика имеет долгую историю, которую можно отследить начиная с XIX века. В развитие этого направления свой вклад внесли многие известные отечественные и зарубежные ученые. Современным действующим документом является отраслевая инструкция — «Правила расчетов железнодорожного пути на прочность и стойкость» [1].

Один из основных вопросов, решаемый практическими расчетами колеи на прочность, — это

определение максимально возможных напряжений в элементах железнодорожного пути, что является показателем его прочности. Поэтому понятно, что основное внимание уделялось «тяжелым» грузовым единицам подвижного состава, преимущественно локомотивам для грузовых поездов. Но их скорость движения, как правило, не превышает 80–90 км/ч. Даже с учетом пассажирского движения использование методики расчета согласно [2] ограничено скоростью 160 км/ч.

Современное развитие транспортных сетей подразумевает внедрение скоростного и высокоскоростного движения пассажирских поездов на железных дорогах Узбекистана [3]. В связи с принципиальными конструктивными изменениями в таких поездах и значительным увеличением скорости движения возникает необходимость пересмотра методик расчета воздействия этих поездов на железнодорожный путь [4, 5].

При проектировании высокоскоростного подвижного состава используются две концепции тягового привода: локомотивная (сосредоточенная тяга) и моторвагонная (распределенная тяга).

В концепции локомотивной тяги тяговые двигатели устанавливаются на электровозах, которые, как правило, размещаются по одному в главной и хвостовой частях высокоскоростного поезда. Однако существуют исключения, например, в некоторых высокоскоростных поездах, таких как Х2000 (Швеция) и ICE2 (Германия), используется только один электровоз, или поезд АРТ-Р (Великобритания), в котором два электровоза размещаются в середине состава.

В концепции моторвагонной тяги тяговые устройства равномерно распределяются вдоль поезда. Это позволяет достичь более равномерного распределения мощности и более гибкой конфигурации состава.

Обе концепции имеют свои преимущества и применяются в зависимости от требований и особенностей высокоскоростных поездов.

На высокоскоростных железнодорожных линиях применяются различные конструкции опирания кузовов на тележки у подвижного состава. Существуют две основные концепции: сочлененная и независимая.

В концепции сочлененной тележки два смежных вагона опираются на одну тележку. Эта концепция используется, например, в поездах семейства TGV, производимых международным концерном Alstom.

В концепции независимой тележки каждый вагон поддерживается двумя индивидуальными тележками. Промежуточные одноосные тележки используются, например, в поездах Talgo-250, где применяется концепция сочлененных вагонов. Конструкторы продолжают соперничество и соблюдают одну из этих двух концепций в разработке высокоскоростных поездов в зависимости от их требований и специфики.

При равных условиях считается, что уменьшение жесткости рессорного подвешивания благоприятно влияет на плавность движения железнодорожных экипажей. Современные тенденции по улучшению плавности хода в основном связаны со снижением жесткости рессорного подвешивания и соответствующим увеличением статического прогиба.

Применение гидравлических приборов с компьютерным управлением представляет собой новый подход, который не подразумевает полное соответствие существующим расчетным методикам для пружинно-механических систем. Эти новые технологии и методы выходят за рамки классических расчетных подходов, предусмотренных для пружинно-механических систем.

Таким образом, современные тенденции в области повышения плавности движения железнодорожных экипажей связаны с уменьшением жесткости рессорного подвешивания и внедрением новых технологий, таких как гидравлические приборы с компьютерным управлением, которые требуют разработки новых расчетных методик и подходов.

Цель

Цель данного исследования заключается в обосновании выбора факторов, которые определяют формирование динамической нагрузки на железнодорожный путь со стороны современного подвижного состава при условиях скоростного и высокоскоростного движения. Для достижения этой цели были проведены теоретические предположения и экспериментальные исследования.

В результате данного исследования будет разработана методика определения вертикальной расчетной силы, которая действует от колеса на рельс. Эта методика будет основываться на предшествующих теоретических и экспериментальных исследованиях, а также учете различных факторов, которые влияют на динамическую нагрузку на путь при скоростном и высокоскоростном движении подвижного состава.

Методика

Основным направлением адаптации расчетов пути на прочность для высоких скоростей движения следует считать адекватность учета динамики самого процесса движения. Касательно рельсов, в соответствии с принятой гипотезой Н. П. Петрова, прогиб рельса происходит мгновенно, а за очертание изгиба рельса под влиянием динамической перегрузки принимается линия изгиба от статической перегрузки, численно равного значению динамической силы в данный момент времени [6].

Пределы и граничные условия применения такого предположения были рассмотрены Д. М. Курганом [7]. Динамическая нагрузка учитывается через соответствующее определение расчетной силы, за которую принимается максимальная вероятная сила с вероятностью не превышения 0,994, состоящая из статической нагрузки и комплекса динамических добавок, т. е.:

$$P_{\text{раз}} = \bar{P} + 2,5S, \quad (1)$$

где \bar{P} — среднее значение силы, действующей от колеса на рельс;

S — среднеквадратическое отклонение динамической вертикальной нагрузки колеса на рельс, кг.

В практических расчетах пути на прочность [6, 8] показатели силы, действующие от колеса на рельс, определяются по формулам:

$$\begin{cases} \bar{P} = P_{\text{ст}} + \bar{P}_p \\ S = \sqrt{S_p^2 + S_{pн}^2 + 0,05S_{нк}^2 + 0,95S_{окн}^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{\text{ст}}$ — вес экипажа, отнесенный к одному колесу (статическая нагрузка);

\bar{P}_p — среднее значение силы от колебаний сверхрессорного веса экипажа;

S_p — среднеквадратическое отклонение силы от колебаний сверхрессорного веса экипажа;

$S_{pн}$ — среднеквадратическое отклонение силы от перекачки колеса по рельсу с неровностью;

$S_{нк}$ — среднеквадратическое отклонение силы от наличия на колесе изолированного неровности;

$S_{окн}$ — среднеквадратическое отклонение силы наличия на колесе непрерывного неровности.

Максимальное значение силы от колебаний надрессорного веса экипажа (кузова) можно определить через максимальные и статические прогибы рессор, а также через коэффициент вертикальной динамики [6] по следующей формуле:

$$P_{p(\text{max})} = k_d (P_{\text{ст}} - q_k), \quad (3)$$

где k_d — коэффициент вертикальной динамики;

q_k — вес необрессоренной части экипажа, отнесенный к одному колесу, кН.

Среднее значение силы от колебаний сверхрессорного веса экипажа принимается к 75 % от

его максимального значения, а едноквадратичное отклонение — 8 % [9] и определяется по следующему выражению:

$$\begin{cases} \bar{P}_p = 0,75P_{p(\max)} \\ S_p = 0,08P_{p(\max)} \end{cases} \quad (4)$$

Среднеквадратическое отклонение силы от перекачки колеса по рельсу с неровностью в соответствии с [9] определяется по следующей формуле:

$$S_{\text{рн}} = 1,81 \cdot 10^7 \alpha_1 \beta \varepsilon \gamma \sqrt{\frac{U q_k}{k}} \bar{P} V, \quad (5)$$

где α_1 — коэффициент, зависящий от типа шпал (учитывает вес верхнего строения пути, участвующего во взаимодействии с колесом);

β — коэффициент, учитывающий тип рельсов (зависит от момента инерции рельса);

ε — коэффициент, зависящий от типа шпал;

γ — коэффициент, зависящий от вида балласта;

U — модуль упругости подрельсовой основы, МПа;

k — коэффициент относительной жесткости рельса, см⁻¹;

V — скорость движения, км/ч.

Согласно [8], среднеквадратическое отклонение силы, возникающей из-за наличия изолированного неровного участка на колесе, может быть рассчитано по следующей формуле:

$$S_{\text{инк}} = 0,05 \alpha_0 \xi e_0 \frac{U}{k}, \quad (6)$$

где α_0 — коэффициент, зависящий от типа шпал;

ξ — безразмерный прогиб (отношение дополнительного прогиба рельса, возникающего вследствие наличия на колесе изолированного неровности, до глубины этого неровности);

e_0 — глубина изолированной неровности на колесе, см.

Среднеквадратическое отклонение силы от наличия на колесе непрерывного неравенства в соответствии с [8] рекомендовано определять по формуле

$$S_{\text{онк}} = \frac{1,63 \cdot 10^{-2} a_0 U \sqrt{qkV^2}}{d^2 \sqrt{kU - 32k^2 qk}}, \quad (7)$$

где d — диаметр колеса, см.

Как видно из приведенных формул, динамические составляющие силы, действующие от колеса на рельс, имеют сложные зависимости от многих параметров. Выполненные исследования показали, что для большинства разновидностей современных единиц скоростного и высокоскоростного подвижного состава характерна зависимость вклада каждой динамической добавки в общее значение силы. Определяющими исходными данными можно считать скорость движения и модуль упругости подрельсовой основы.

Результаты

Значения вертикальных сил были вычислены согласно формулам (4) — (7) и представлены в виде графических изображений на рисунках с 1 по 7.

На рис. 1 приведены результаты расчетов по определению изменения значений среднеквадратических отклонений динамических сил, входящих в практические прочностные расчеты, в зависимости от скорости движения, выполненных по формулам (4) — (7). При этом модуль упругости подрельсового основания принять 50 Мпа [10].

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1, позволил установить, что соотношение среднеквадратических отклонений динамических сил, а соответственно, и влияние разных факторов для разных скоростей движения не одинаково. Так, можно отделить зону со скоростями движения до 80–100 км/ч (характерно для грузовых поездов,

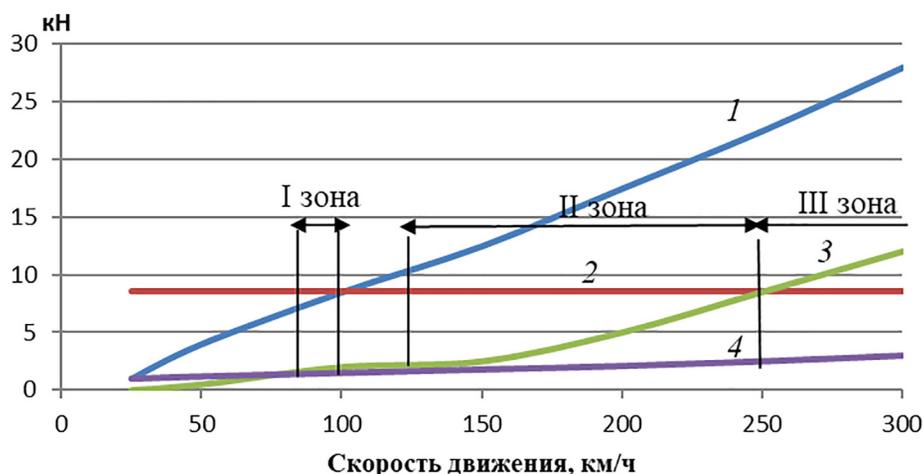


Рис. 1. Изменение среднеквадратических отклонений динамических сил от скорости движения:

$$1 — S_{pH}; 2 — S_{инк}; 3 — S_{бнк}; 4 — S_p$$

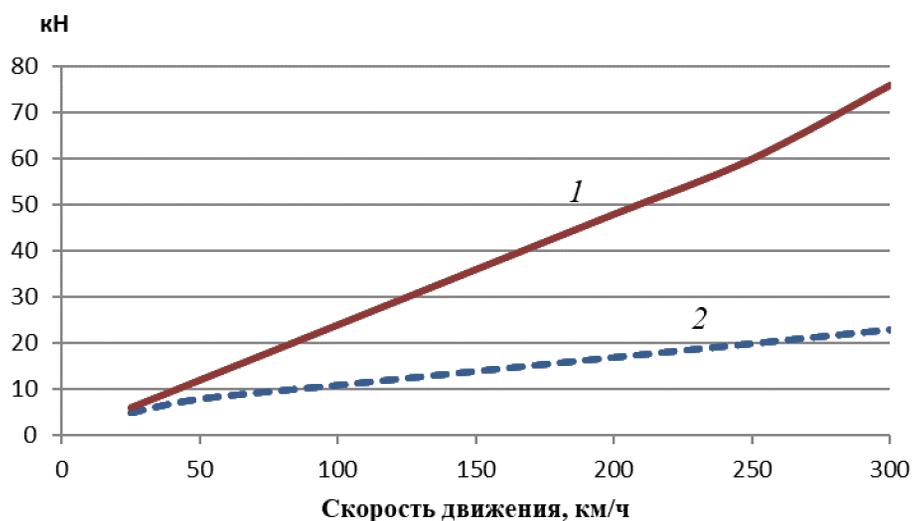


Рис. 2. Изменение составляющих расчетной силы в зависимости от скорости движения:

$$1 — 2,5S; 2 — \bar{P}_0$$

условно I зона) и зоны со скоростью движения 120–250 км/ч (II зона) и более 250 км/ч (III зона).

На рис. 2 приведена зависимость составляющих расчетной силы (общего среднеквадратического отклонения и среднего значения силы от колебаний наддрессорного веса экипажа) в зависимости от скорости движения.

Для исследования изменения динамической нагрузки от колеса подвижного состава, т. е. локомотивов и вагонов, на рельс в зависимости

от скорости движения для пассажирских поездов произведены расчеты по определению их значений по формуле (10), приведенной в [8]. Результаты расчетов в виде графических изображений приведены на рис. 3–5. При этом предполагалось, что пассажирские поезда приводятся в движение локомотивами серий Talgo-250 и Skoda.

Приведенные значения средней и расчетной (рис. 3) сил определялись по результатам статистической обработки данных. С целью полу-

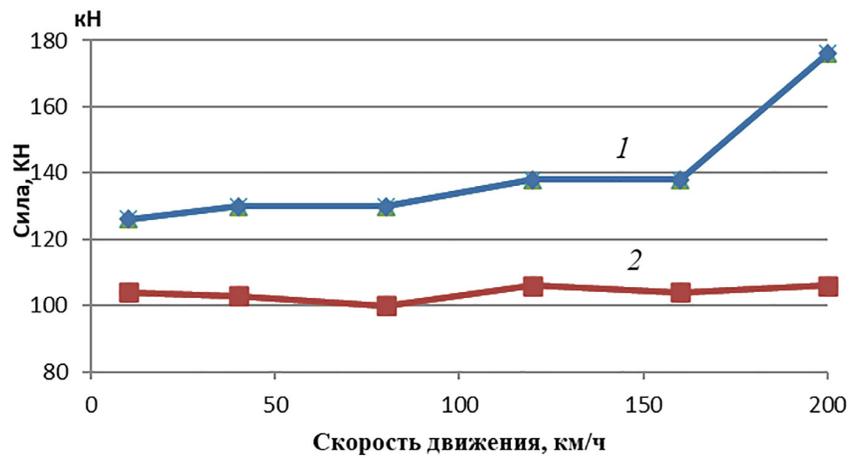
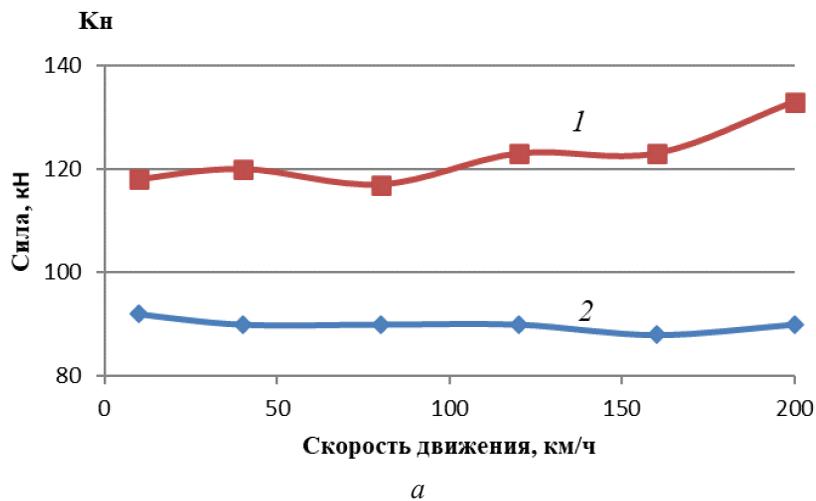
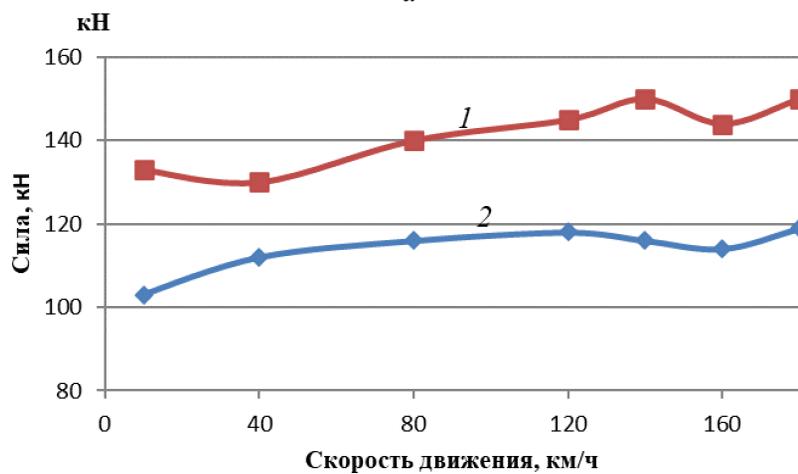


Рис. 3. Взаимосвязь между средней и расчетной вертикальной силами в зависимости от скорости движения для локомотива поезда Talgo-250 ($P_{ст} = 105,5$ кН):
 1 — среднее значение силы; 2 — расчетное значение силы



a



б

Рис. 4. Взаимосвязь между средней и расчетной вертикальной силой в зависимости от скорости движения для пассажирского вагона поезда:
a — Talgo-250 ($P_{ст} = 85$ кН); *б* — Skoda ($P_{ст} = 99$ кН): 1 — среднее значение силы; 2 — расчетное значение)

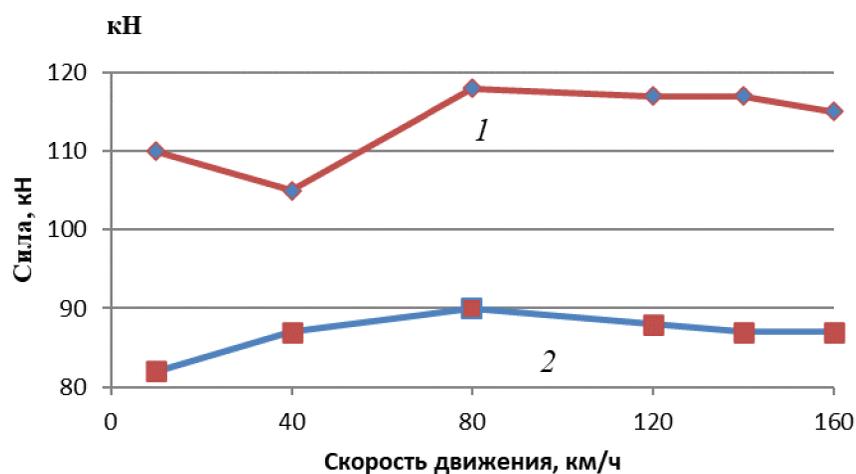


Рис. 5. Взаимосвязь между средней и расчетной вертикальной силами в зависимости от скорости движения для прицепного вагона поезда Skoda ($P_{ст} = 84$ кН):
1 — среднее значение силы; 2 — расчетное значение силы

чения количественных характеристик влияния различных факторов на значение вертикальной силы, которая действует от колеса на рельс, были выполнены факторные дисперсионные анализы с использованием результатов достаточного количества измерений для экспериментального поезда Talgo-250 [9–11].

Таким же образом было установлено влияние числа осей на значение вертикальной силы действия колеса на рельс, что характеризует влияние колебаний кузова и неровностей на колесах (в качестве примера рассмотрено 8 осей пассажирских вагонов с примерно одинаковой нагрузкой) (рис. 4, а).

Также было проанализировано влияние места перереза рельса на значение вертикальной силы действия колеса на рельс, что характеризует влияние движения колеса по динамическим неровностям колеи, возникающим в результате колебаний рельса (в качестве примера рассмотрено 8 сечений на обоих нитях с разными расстояниями на участке с общей длиной 42 метра без наличия существенных отклонений в удержании) (рис. 4, б).

Аналогичные расчеты были выполнены для прицепного вагона поезда Skoda при $P_{ст} = 84$ кН. Взаимосвязь между средней и расчетной верти-

кальной силами в зависимости от скорости движения для прицепного вагона изображена на рис. 5.

Анализ влияния вертикальных сил от скорости движения поездов на основе моделирования движения высокоскоростного поезда Talgo-250 в Узбекистане

Для исследования взаимосвязи между вертикальными силами и скоростью движения поездов было проведено моделирование движения высокоскоростного поезда Talgo-250 при различных скоростях и при постоянной осевой нагрузке от локомотива. Общее количество измерений в матрице расчетов менялось в зависимости от уровня скорости движения. Например, при скорости 200 км/ч было проведено 420 измерений. Результаты полученных данных подчиняются нормальному закону распределения, что позволяет выявить закономерности влияния вертикальных сил на скорость движения поездов.

На рис. 6 приведены примеры законов распределения, полученных по экспериментальным данным, для скоростей движения 80 и 200 км/ч с шагом дискретизации сигнала 12,5 кН.

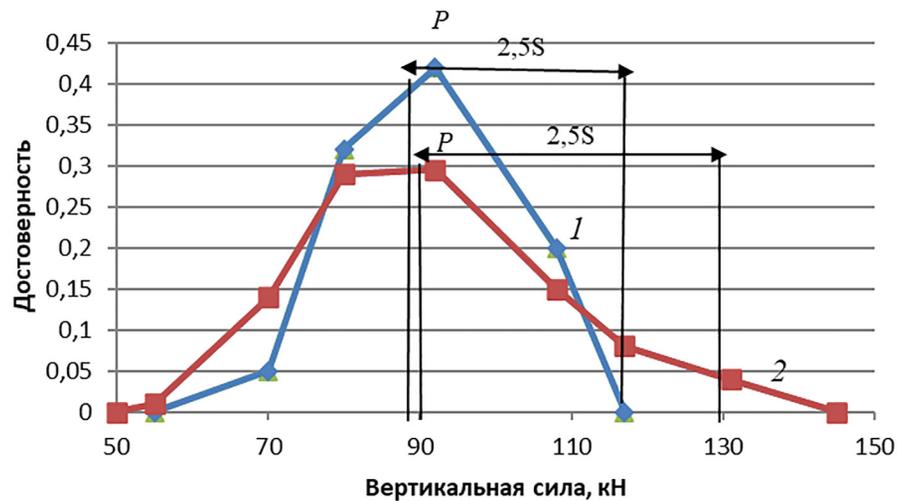


Рис. 6. Закон распределения вертикальной силы от колеса на рейку по экспериментальным измерениям для пассажирского вагона поезда Talgo-250:

1 — скорость движения 80 км/ч; 2 — скорость движения 200 км/ч

Для скорости движения 200 км/ч была установлена степень воздействия (по коэффициенту Фишера), число оси вагона на уровне 1,696; степень воздействия номера сечения рельса — 122,4 при уровне критического значения коэффициента Фишера 2,02. Для других значений скорости движения соотношение приведенных показателей принципиально не меняется. К примеру, при скорости движения 80 км/ч получены коэффициенты Фишера 0,296 и 120,1 для оси и сечения рельса соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что в современных пассажирских вагонах эффективно гасятся колебания кузова и они не приводят к значительному увеличению вертикальной силы давления колеса на рельсы. Основным фактором, который вызывает возмущение динамической силы, является прохождение колесом динамических неровностей колеи, которые образуются даже при отсутствии значительных геометрических неровностей вследствие колебаний рельса на упругой подрельсовой основе.

Поэтому целесообразно рассмотреть методику определения именно динамической силы от прохождения колеса по рельсовой неровности.

В первичном виде формулу (5) можно представить следующим образом:

$$S_{\text{рн}} = 0,707\alpha \frac{n^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{Uq_k}{k}} Vi, \quad (8)$$

где 0,707 — коэффициент перехода от максимального значения силы к ее среднеквадратичному отклонению, соответствующий тригонометрической функции, закладываемой для описания гармонических колебаний;

g — ускорение свободного падения;

i — динамический уклон рельсовой неровности;

α_0 — коэффициент, вошедший в формулу впоследствии, определяется отношением массы колеса и массы колеи, приведенных к точке их контакта.

Формула (8) является результатом обработки данных решения дифференциального уравнения колебаний механического пара «колесо — рельс», первично полученного для подрельсового основания с деревянными шпалами. Для железобетонных шпал была предложена другая формула [12, 13]:

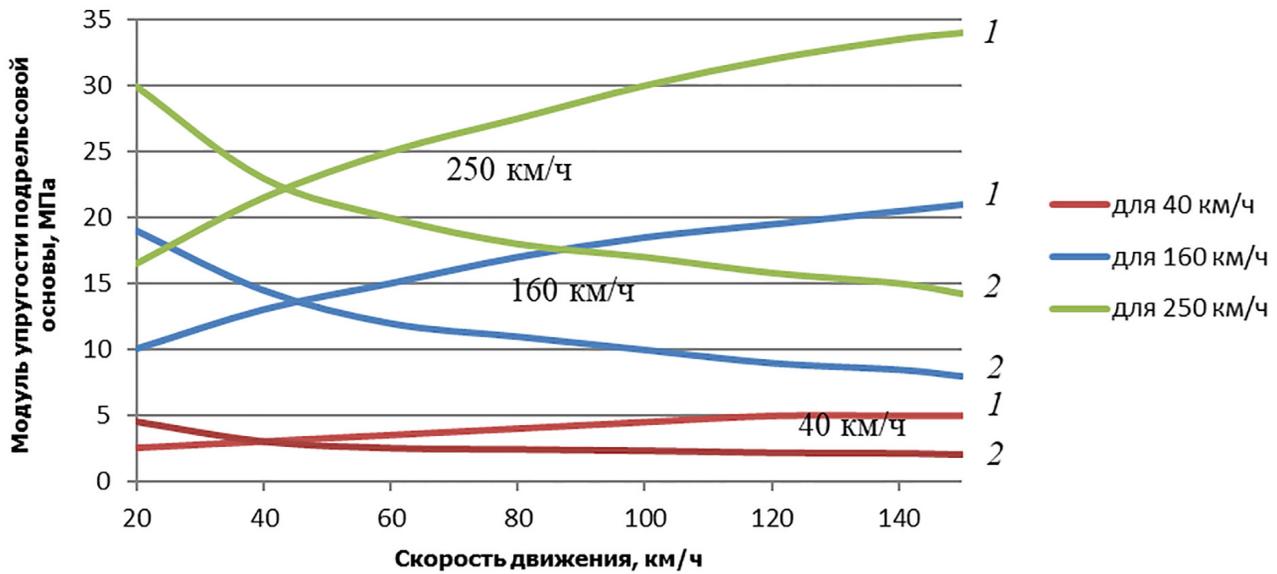


Рис. 7. Изменение среднеквадратического отклонения силы при движении колеса по неровной рельсовой основе относительно модуля упругости подрельсовой основы можно оценить двумя способами: первый — с использованием формулы (5), второй — с применением формулы (8) при скоростях движения 40, 160 и 250 км/ч

$$S_{\text{рн}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3} \bar{P} V \sqrt{q_k}}{\sqrt[8]{EIU^3}} \quad (9)$$

где E — модуль упругости рельсовой стали;
 I — момент инерции рельса.

Однако в современных практических расчетах пути на прочность [5] используется формула (8), полученная из формулы (5) с соответствующими коэффициентами, учитывающими прежде всего изменение параметров динамического неравенства при применении железобетонных шпал, вызванное увеличением жесткости подрельсовой основы и изменением приведенной массы пути:

$$\begin{cases} i = A \alpha_1 \beta \epsilon \gamma \bar{P} \\ A = \frac{1,788 \cdot 10^4 \sqrt{2g}}{n^2 \alpha_0} \end{cases} \quad (10)$$

Кривые зависимостей среднеквадратического отклонения силы при прохождении по рельсовому неравенству от модуля упругости

подрельсового основания рассчитаны по формулам (5) и (8). Данные результаты для уровней скоростей движения поездов: 40, 160 и 250 км/ч представлены на рис. 7. Проведенный анализ полученных результатов (см. рис. 7) показывает, что при низких скоростях движения различия в расчетах являются незначительными. Модули упругости подрельсовой основы, вычисленные для разных уровней скорости с использованием формул (5) и (8), в диапазоне скоростей 40–50 км/ч совпадают с достаточной точностью. Существенное увеличение модуля упругости приводит к различию результатов, которое становится особенно ощутимым при высоких скоростях движения [14–16].

В данном исследовании не предполагается решать задачу определения приведенной массы пути. Напротив, приведенные рассуждения указывают на то, что такой параметр является искусственным и может быть использован только при низких скоростях движения в рамках статических схем расчета [7].

Выводы

Анализ результатов статистической обработки данных расчетных исследований движения современных пассажирских поездов со скоростями движения до 200 км/ч относительно уровня динамической вертикальной силы действия колеса на рельс позволил установить степень влияния вышеприведенных факторов на формирование значения этой силы. Обнаружение расхождений между полученными расчетными значениями и теоретическими данными указывает на необходимость пересмотра методики определения расчетной силы для практических расчетов прочности пути в условиях движения пассажирских поездов с высокими скоростями. Пересмотр должен состоять не только в корректировке существующих методов, но и в формировании новых подходов на основе современных математических моделей или соответствующих статистических данных с учетом зарубежного опыта [17].

Такой подход скрывает влияние детальных характеристик колеи и подвижного состава на формирование динамической силы, но позволяет получать адекватные численные значения для соответствующих расчетов прочности железнодорожного пути.

Представленные результаты открывают новые перспективы для научной задачи разработки современных методов расчета напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути при высоких скоростях движения. На основе проведенных теоретических исследований и расчетных измерений были установлены факторы, вызывающие динамическую составляющую вертикальной силы в современных пассажирских [18].

Полученные рекомендации значительно улучшают существующие методы расчета прочности пути и предлагают практическое решение для их применения при скоростях движения свыше 160 км/ч. Это способствует более точному определению напряженно-деформированного состояния

железнодорожного пути и позволяет эффективно решать практические задачи, связанные с проектированием и эксплуатацией железнодорожных магистралей для высоких скоростей движения [19–22].

Расчетная вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, действительно зависит от множества факторов. При проведении практических расчетов прочности железнодорожного пути этот показатель формируется из нескольких составляющих, влияние которых на разных скоростях движения неодинаково. По анализу результатов аналитических расчетов установлено, что по влиянию разных динамических составляющих можно отделить следующие скоростные зоны: до 80–100 км/ч, 120–250 км/ч, более 250 км/ч.

Теоретические исследования, анализ статистических данных и экспериментальные измерения однозначно указывают, что основным фактором, вызывающим динамическую составляющую вертикальной силы для современных пассажирских поездов, движущихся со скоростью 120 км/ч и выше, являются колебания в системе «колесо — рельс» или так называемое прохождение колесом динамической рельсовой неровности.

Существующие методы расчета динамических сил требуют использования параметра, такого как приведенная масса пути. Однако проведенные исследования показывают, что такой параметр является искусственным и может быть применен только для низких скоростей движения, при использовании статических расчетных схем.

Библиографический список

1. Даниленко Е. И. Правила расчетов железнодорожного пути на прочность и устойчивость: ЦП-0117 1 / Е. И. Даниленко.
2. Джаббаров С. Т. Исследование напряженно-деформированного состояния рельсов при увеличении осевой нагрузки / С. Т. Джаббаров, Н. Б. Кодиров // *Universum: технические науки*. — 2022. — № 12-3(105). —

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-relsov-pri-uvelichenii-osevoy-nagruzki> (дата обращения: 21.02.2023).

3. Djabbarov S. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan / S. Djabbarov, M. Mirakhmedov, A. Śladkowski // *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 369–421.

4. André José Maria C. S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train / C. S. André José Maria // *Vehicle System Dynamics*. — 2013. — Vol. 51. — Iss. 3. — Pp. 481–496. — DOI: 10.1080/00423114.2012.757333.

5. Likhtberger B. Railway track / B. Likhtberger. — Hamburg, DVV Media Group GmbH Publ., 2010. — 434 p.

6. Даниленко Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість: ЦП-0117 / Е. І. Даниленко, В. В. Рибкін. — Київ: Транспорт України, 2004. — 64 с.

7. Курган Д. М. Особенности восприятия нагрузки элементами железнодорожного пути при высоких скоростях движения / Д. М. Курган // *Наука и прогресс трансп. Вестн. Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп.* — 2015. — № 2(56). — С. 136–145. — DOI: 10.15802/stp2015/42172.

8. ЦПТ-52/14. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. — М.: МПС РФ, 2000. — 40 с.

9. Даниленко И., Рыбкин В. В. — Киев: Транспорт Украины, 2004. — 64 с.

10. Djabbarov S. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan / S. Djabbarov, M. Mirakhmedov, A. Śladkowski // *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*. — 2018. — Pp. 369–421.

11. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др. — М.: Транспорт, 1999. — 405 с.

12. Loktev A. Simulation of the Railway under Dynamic Loading / A. Loktev, E. A. Gridasova, E. V. Zapol'nova. — Part 1. Ray Method for Dynamic Problem.

13. Вериго М. Ф. Основные положения методики расчета сил, действующих на железобетонные шпалы / М. Ф. Вериго // *Тр. ВНИИЖТа*. — М., 1963. — С. 5–39.

14. *Contemporary Engineering Sciences*. — 2015. — Vol. 8. — Iss. 18. — Pp. 799–807

15. Cai Z. Modelling the dynamic response of railway track to wheel/rail impact loading / Z. Cai, G. P. Raymond // *Structural Engineering and Mechanics*. — 1994.

16. Djabbarov S. Device of road boards with compacting layers with rollers / S. Djabbarov, Z. Kakharov, N. Kodirov // *AIP Conference Proceedings*. — AIP Publishing LLC, 2022. — Vol. 2432. — Iss. 1. — P. 030036.

17. Roanes-Lozano E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods / E. Roanes-Lozano.

18. *Mathematics in Computer Science*. — 2013. — Vol. 7. — Iss. 4. — Pp. 473–485. — DOI: 10.1007/s11786-013-0164-7.

19. Stukalina O. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries / O. Stukalina, A. Dzhaleva-Chonkova.

20. *Mechanics Transport Communications*. — 2012. — Vol. 10. — Iss. 3/2. — Pp. 3.4–3.8.

21. Agostinacchio M. Parametrical analysis of the railways dynamic response at high speed moving loads / M. Agostinacchio, D. Ciampa, M. Diomedei et al. // *Journal of Modern Transportation*. — 2013. — Vol. 21. — Iss. 3. — Pp. 169–181.

22. Talgo 250. Available at: http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf (дата обращения: 08.04.2015).

Дата поступления: 12.07.2023

Решение о публикации: 30.08.2023

Контактная информация:

ДЖАББАРОВ Саидбурхан Тулаганович — д-р техн. наук, проф.; _saidhon_@inbox.ru
КОДИРОВ Нодирбек Бахтиерович — докторант; nodir_kodirov_95@mail.ru

Analysis of the Impact of Wheel Dynamic Load on Rails under High-Speed Train Operations in Uzbekistan

S. T. Jabbarov, N. B. Kodirov

Tashkent University of Transport, 1, Temiryulchilar str., Tashkent, Republic of Uzbekistan

For citation: Jabbarov S. T., Kodirov N. B. Analysis of the Impact of Wheel Dynamic Load on Rails under High-Speed Train Operations in Uzbekistan // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 531–543. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-531-543

Summary

Purpose: Justification of choosing the factors influencing the formation of dynamic load on the railway track by modern rolling stock during high-speed and very high-speed operations. To achieve this goal, theoretical groundwork and experimental research have been conducted. As a result of the work, a methodology has been developed for determining the vertical calculated force exerted by the wheel on the rail. **Methods:** High-speed and very high-speed trains, due to their fundamental design and significant increase in speed, necessitate a reconsideration of methods for calculating the impact of rolling stock on the railway track. This includes the analysis of relationships between root-mean-square deviations of various dynamic forces and the assessment of the influence of different factors at different speeds of operation. **Results:** As part of the study, experimental measurements have been conducted to examine changes in dynamic load. As a result, dependencies between the average and calculated vertical forces and the speed of operation for modern passenger trains have been obtained. By using factorial analysis of variance, numerical characteristics of the influence of various factors on the value of the vertical force exerted by the wheel on the rail have been obtained. Additionally, the degrees of influence of different factors on the formation of this force have been determined.

Keywords: Track strength calculation, track superstructure, high-speed operation, track stress, dynamic force, dynamic inequality.

References

1. Danilenko E. I. *Pravila raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' i ustoychivost': TsP-0117 1* [Rules for calculating railway tracks for strength and stability: TsP-0117 1]. (In Russian)
2. Dzhabbarov S. T., Kodirov N. B. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rel'sov pri uvelichenii osevoy nagruzki [Study of the stress-strain state of rails with increasing axial load]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences]. 2022, Iss. 12-3(105). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-relsov-pri-uvelichenii-osevoy-nagruzki> (accessed: February 21, 2023). (In Russian)
3. Djabbarov S., Mirakhmedov M., Śladkowski A. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan. *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*. Springer, Cham, 2018, pp. 369–421.
4. André José Maria C. S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train. *Vehicle System Dynamics*, 2013, vol. 51, Iss. 3, pp. 481–496. DOI: 10.1080/00423114.2012.757333.
5. Likhtheber B. *Railway track*. Hamburg, DVV Media Group GmbH Publ., 2010, 434 p.
6. Danilenko E. I., Ribkin V. V. *Pravila rozrakhunkiv zaliznichnoi kolii na mitsnist' i stiykist': TsP-0117* [Rules for assessing the size of the salinity for strength and durability: TsP-0117]. Kii'v: Transport Ukraïni Publ., 2004, 64 p.

7. Kurgan D. M. Osobennosti vospriyatiya nagruzki elementami zhelezнодорожного пути pri vysokikh skorostyakh dvizheniya [Features of load perception by elements of the railway track at high speeds]. *Nauka i progress transp. Vestn. Dnepropetr. nats. un-ta zhelezn. transp* [Science and progress of transport. Vestn. Dnepropetr. nat. University of Railways transport]. 2015, Iss. 2(56), pp. 136–145. DOI: 10.15802/stp2015/42172. (In Russian)
8. TsPT-52/14. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti [TsPT-52/14. Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track based on the conditions for ensuring its reliability]. Moscow: MPS RF Publ., 2000. 40 p. (In Russian)
9. Danilenko I., Rybkin V. V. Kiev: Transport Ukrainy Publ., 2004, 64 p.
10. Djabbarov S., Mirakhmedov M., Sładkowski A. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan. *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*, 2018, pp. 369–421.
11. Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I. et al. *Zhelezнодорожный путь* [Railway route]. Moscow: Transport Publ., 1999, 405 p. (In Russian)
12. Loktev A., Gridasova E. A., Zapol'nova E. V. Simulation of the Railway under Dynamic Loading. Part 1. Ray Method for Dynamic Problem.
13. Verigo M. F. Osnovnye polozeniya metodiki rascheta sil, deystvuyushchikh na zhelezobetonnye shpaly [Basic provisions of the methodology for calculating forces acting on reinforced concrete sleepers]. *Tr. VNIIZhTa* [Tr. VNIIZhT]. Moscow, 1963, pp. 5–39. (In Russian)
14. Contemporary Engineering Sciences, 2015, vol. 8, Iss. 18, pp. 799–807.
15. Cai Z., Raymond G. P. Modelling the dynamic response of railway track to wheel/rail impact loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 1994.
16. Djabbarov S., Kakharov Z., Kodirov N. Device of road boards with compacting layers with rollers. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2022, vol. 2432, Iss. 1, p. 030036.
17. Roanes-Lozano E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods.
18. Mathematics in Computer Science, 2013, vol. 7, Iss. 4, pp. 473–485. DOI: 10.1007/s11786-013-0164-7.
19. Stukalina O., Dzhaleva-Chonkova A. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries. *Mechanics Transport Communications*, 2012, vol. 10, Iss. 3/2, pp. 3.4–3.8.
20. Agostinacchio M., Ciampa D., Diomedei M. et al. Parametrical analysis of the railways dynamic response at high speed moving loads. *Journal of Modern Transportation*, 2013, vol. 21, Iss. 3, pp. 169–181.
22. Talgo 250. Available at: http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf (accessed: April 8, 2015).

Received: July 12, 2023

Accepted: August 30, 2023

Author's information:

Saidburkhan T. DJABBAROV — PhD in Engineering, Professor; _saidhon_@inbox.ru

Nodirbek B. KODIROV — Doctoral Student; nodir_kodirov_95@mail.ru