

Определение сил взаимодействия в системе колесо — рельс на основании измерения напряжений в шейке рельса

Ю. С. РОМЕН, О. А. СУСЛОВ, А. А. БАЛЯЕВА

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Непосредственное измерение сил взаимодействия экипажа и пути практически невозможно. Их определение можно осуществлять, измеряя напряжения в рельсах, взаимозависимости которых с силами носят вероятностный характер. Корреляция показаний сил и напряжений для поезда в большинстве случаев находится в диапазоне 0,9–0,95. Практический метод определения сил взаимодействия по напряжениям в шейке рельса был предложен Шлупфом. Получаемые результаты можно применять при проведении сертификационных испытаний. Точность метода цифровой обработки данных по напряжениям в трех точках шейки рельса существенно выше. Погрешность расчета сил не превосходит 4 %, что показывает целесообразность использования трехточечного метода при определении сил взаимодействия для установления условий обращения.

Ключевые слова: взаимодействие подвижного состава и пути; методы измерений сил взаимодействия; боковые силы; рамные силы; напряжения

Введение. При внедрении в эксплуатацию нового и модернизированного подвижного состава одной из основных проблем являются условия обеспечения как безопасности движения, так и прочности экипажа и пути, которые обуславливаются силами в системе колесо — рельс [1, 2]. В мировой практике исследований различают три компоненты силы взаимодействия: вертикальную, горизонтальную и продольную [1, 3]. Так как продольная составляющая не оказывает существенного влияния на устойчивость колеса на рельсе, при проведении динамических испытаний определяют одновременно (в одном сечении пути) величины только горизонтальных и вертикальных составляющих сил взаимодействия, которые имеют случайную величину, поскольку определяются множеством факторов.

Непосредственное измерение сил взаимодействия в контакте колесо — рельс практически невозможно. Однако, поскольку они обуславливают напряженное состояние как элементов конструкции пути, так и ходовых частей подвижного состава, их определение с известной степенью точности можно осуществлять, проводя соответствующие измерения напряжений как в пути, так и в элементах ходовых частей подвижного состава [3, 4, 5, 6].

Напряжения и силы в системе колесо — рельс обуславливаются рядом параметров, часть из которых не являются строго фиксированными. Поэтому их взаимозависимости на подвижном составе и в пути носят не абсолютный, а вероятностный характер с достаточно высокими корреляционными связями. Корреляция показаний сил взаимодействия и напряжений в рельсе в большинстве случаев находится в диапазоне 0,9–0,95 и изменяется в зависимости от характера положения в колее соседних колесных пар при их набегании на рельс. На рис. 1 приведены величины полусумм и полуразностей кромочных напряжений подошвы в различных сечениях рельса, по которым можно оценивать величину вертикальных и боковых нагрузок [7, 8] под осями грузовых вагонов в сечениях пути при разных скоростях движения. На рис. 1, а видно, что в диапазоне величин боковых сил Y_B до 20 кН выделяется группа точек, в которой коэффициент регрессии выше, чем для всей совокупности соотношения боковых сил и полуразности напряжений в кромках подошвы рельса. Эти точки зарегистрированы в основном при отсутствии набегания на рельс рассматриваемой колесной пары, когда на величину полуразности кромочных напряжений в данном сечении подошвы рельса оказывают ошутимое влияние силы воздействия соседних колес.

Силы, действующие от колеса на рельс. При определении параметров взаимодействия подвижного состава и пути наиболее целесообразно рассматривать систему координат рельса [1]. Ее элементы:

ось X — касательная к оси пути, проходящая через центр рельса;

ось Y — горизонтальная ось, параллельная поперечной оси рельса;

ось Z — вертикальная ось рельса.

Разложение сил контактного взаимодействия в координатном пространстве XYZ характеризует разностороннее воздействие колеса на путь в рассматриваемом сечении.

Вертикальная сила P — сумма проекций на ось Z сил контактного взаимодействия. Ее действие распро-

страняется на элементы промежуточных креплений подрельсового основания, балластный и иные несущие слои вплоть до земляного полотна. Она определяет деградацию пути в части балластного слоя, вызывает изломы подкладок и шпал, износ резиновых прокладок, просадки и перекосы пути.

Продольная сила N — сумма проекций сил контактного взаимодействия на ось X . Передается на элементы промежуточных рельсовых креплений и через подрельсовое основание на балласт и нижележащие слои. Действие этой силы вызывает продольную деформацию пути, его угон и влияет на величину продольно-поперечного изгиба рельса.

Боковая сила воздействия на рельс Y_B — сумма проекций всех сил контактного взаимодействия на ось Y . Действует в первую очередь на удерживающие элементы креплений и подрельсовое основание в поперечном направлении. Она является сдвигающей силой для элементов рельсошпальной решетки. Определяет прочность и износ элементов промежуточных рельсовых креплений, вызывает изменение ширины колеи. Суммарное воздействие боковых сил $Y_{пр}$ и $Y_{лев}$ на правом и левом рельсах создает сдвигающую силу [9], действующую на всю рельсошпальную решетку и определяющую деградацию пути в плане. Если пренебречь инерционными процессами, то оно соответствует рамной силе, действующей на буксы колесной пары. Величина рамной силы создает поперечное воздействие на ходовые части и является одним из динамических параметров экипажа, результаты измерения которого характеризуют его устойчивость от схода и воздействие на путь. На рис. 2 приведены результаты измерений на экипаже рамных сил и суммы боковых на рельсах для грузового вагона в одном из сечений пути кривой радиусом 650 м [10]. Уровень корреляции этих параметров по их средним величинам составляет 0,98.

Следует отметить, что поскольку при измерениях боковые силы определяют по напряжениям в рельсе, а рамные — на подвижном составе, то вследствие неравноупругости пути под и над шпалами уровень их корреляции в междушпальных ящиках примерно на 10 % ниже, чем непосредственно над шпалой.

Основные методы измерений сил взаимодействия. При проведении испытаний подвижного состава основным является определение вертикальных и боковых сил, так как их величина и отношение определяют в первую очередь интенсивность расстройств пути и устойчивость колеса на рельсе.

До 60-х гг. прошлого века для определения напряженного состояния пути использовали в основном измерения кромочных напряжений в подошве рельса. Вследствие приведенных выше корреляционных зависимостей по их полусумме и полуразности оце-

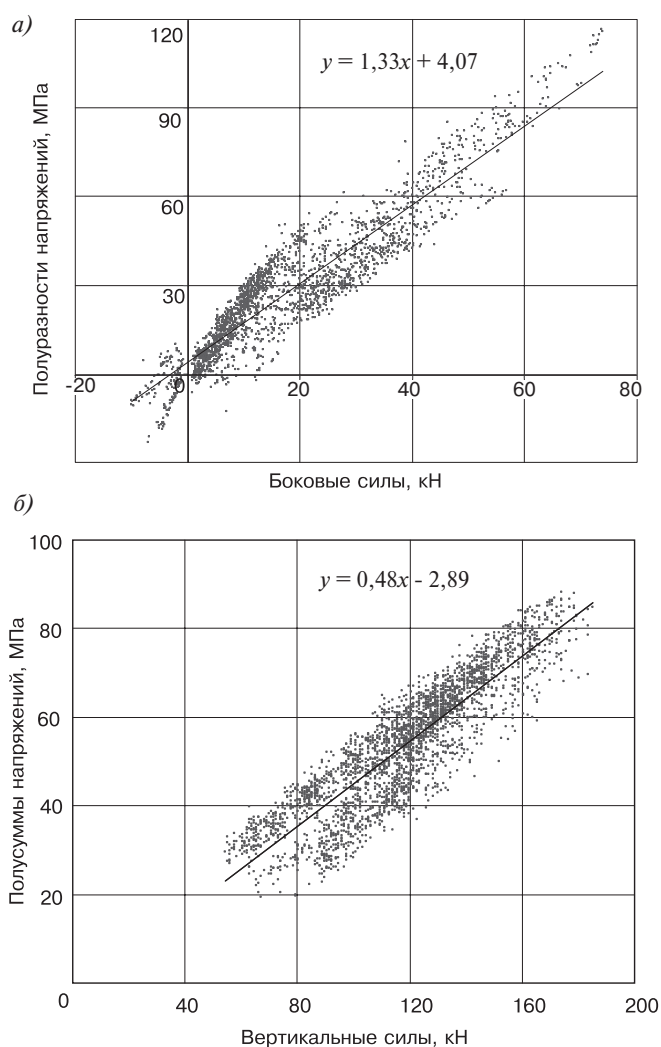


Рис. 1. Напряжения в кромках подошвы рельсов в зависимости от нагрузок на рельсы: а — полуразности напряжений в зависимости от горизонтальных нагрузок (коэффициент корреляции 0,95); б — полусуммы напряжений в зависимости от вертикальных нагрузок (коэффициент корреляции 0,9)

Fig. 1. Stresses in the edges of the rails sole, depending on the loads on the rails: а — half-differences of stress as a function of the horizontal loads (the correlation coefficient is 0.95); б — half-sum of stresses depending on vertical loads (the correlation coefficient is 0.9)

нивали величины вертикальных и боковых сил, действующих на рельс от подвижного состава.

Тензометрические датчики для измерения напряжений в динамике были изобретены в США в 1938 г. и предложены для измерений на железной дороге в 1944 г. [11]. В 1945 г. тензодатчики начали применяться на железных дорогах России. Вначале основным инструментом непосредственного измерения сил являлось определение максимальных деформаций под проходящим подвижным составом с последующим их умножением на соответствующие жесткости, которые определяли при статической калибровке.

В 1946 г. М. Ф. Вериго предложил для оценки динамического воздействия подвижного состава на путь

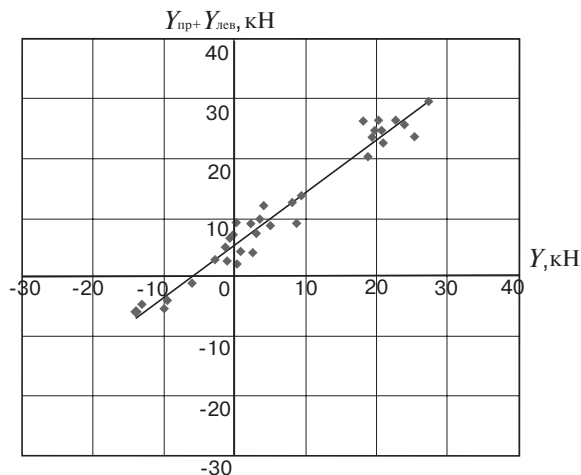


Рис. 2. Сумма боковых сил $Y_{пр}$ и $Y_{лев}$ на двух рельсах в зависимости от рамной силы Y при движении вагона со скоростями от 60 до 120 км/ч (корреляция по средним значениям), коэффициент корреляции 0,98

Fig. 2. Sum of the lateral forces $Y_{пр}$ and $Y_{лев}$ on two rails depending on the frame force Y when the car moves at speeds of 60 to 120 km/h (correlation by mean values), the correlation coefficient is 0.98

вести непрерывную регистрацию сил взаимодействия колеса и рельса, используя напряженное состояние диска колеса [12]. Этот метод в дальнейшем был реализован на локомотивах и грузовых вагонах [4, 5, 6, 13].

В работе [14] приведены методы измерений сил взаимодействия, применяемые различными фирмами. С.П. Тимошенко указывал, что «для того чтобы получить вертикальную и боковую компоненты давления колеса на рельс в условиях эксплуатации, необходимо произвести измерение напряжения в трех волокнах рельса...» [11, с. 214].

Методика экспериментального определения вертикальных и боковых сил, действующих на рельс, по измерению напряжений (деформаций) в трех точках его сечения (по наружной стороне головки и по двум кромкам подошвы) была разработана О.П. Ершковым под руководством Е.М. Бромберга [15, 16]. В соответствии с применявшейся методикой оценки взаимодействия по кромочным напряжениям параметры силового воздействия определяли по формулам:

$$\text{вертикальная сила } P = A_1 S_{нр}^n + A_2 S_{вр}^n; \quad (1)$$

$$\text{боковая сила } Y = B_1 S_{нр}^n + B_2 S_{вр}^n + B_3 S_{гр}^n; \quad (2)$$

$$\text{крутящий момент в сечении } M = Yh - Pe, \quad (3)$$

где $S_{нр}^n$, $S_{вр}^n$, $S_{гр}^n$ — показания датчиков в наружной, внутренней кромках подошвы и на наружной стороне головки рельса; h — превышение плоскости действия боковой силы над центром изгиба сечения, положение которого может не совпадать с положением нейтральной оси сечения; e — эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки относительно продольной оси рельса; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , B_3 — расчетные коэффициенты, определяемые по положению мест наклейки

датчиков, плоскости приложения боковой силы и размеров элементов сечения рельса.

При отсутствии электронной портативной вычислительной техники трехточечный метод О.П. Ершкова был достаточно трудоемким, так как требовал проведения большого количества расчетов. Поэтому для проведения серийных испытаний он был заменен методом Шлупфа [17, 18], разработанным для определения силового воздействия на рельс по измерениям деформаций шейки рельса. Метод заключается в определении разности моментов в двух сечениях шейки рельса, в которых моменты сопротивления изгиба одинаковы. Имеем

$$M_a = Yh_a - Pe; \quad M_b = Yh_b - Pe, \quad (4)$$

где h_a и h_b — плечо приложения боковой силы относительно каждого из поперечных сечений (a и b).

Если величины моментов сопротивления и площади горизонтальных сечений шейки в местах наклейки тензодатчиков равны, то при равенстве масштабных коэффициентов по разности моментов изгиба определяют величину боковой силы

$$Y = (M_a - M_b) / (h_a - h_b). \quad (5)$$

При отсутствии в 50-х гг. мощной цифровой вычислительной техники четыре тензорезистора (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) включали в плечи одного моста Уитстона, а для определения вертикальной нагрузки использовали еще одну пару датчиков (R_5 , R_6) и мост (рис. 3). Опыты А.К. Шафрановского [13] показали, что в случае правильно выбранных сечений для мест наклейки и одинаковых коэффициентах передачи датчиков эксцентриситет приложения нагрузки практически не влияет на результаты измерений. Принципиальной неточностью метода Шлупфа являлось допущение, что слагаемое Pe в формуле для определения момента во всех сечениях одинаково [19]. В действительности этим допущением можно пользоваться в том случае, когда расстояние по высоте между сечениями достаточно мало [20] по сравнению с расстоянием до точки приложения силы.

Поскольку при определении условий обращения рассматривают максимальные величины боковых сил взаимодействия, которые возникают при набегании гребнем колеса на головку рельса, для проведения калибровок на домкратной тарировочной установке применялся специальный адаптер с поверхностью, аналогичной профилю колеса (рис. 4) [3]. Это позволяло в процессе калибровок имитировать силовые процессы в контакте при набегании колеса на рельс, что уменьшало погрешности, возникающие в системе вследствие неточности определения мест наклейки датчиков и разности размеров шейки рельса в измеряемых сечениях. Следует отметить, что хотя указанные

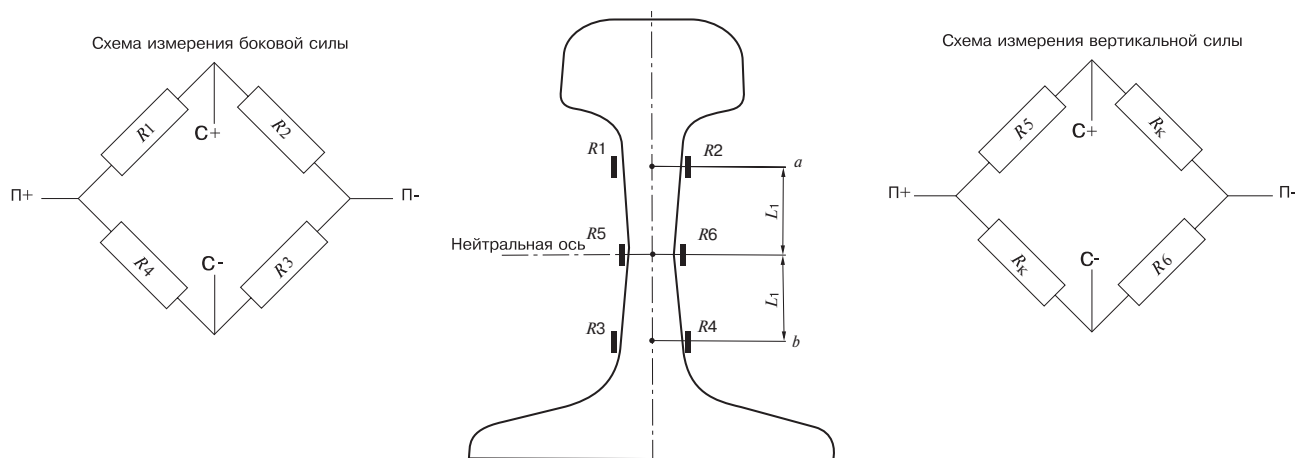


Рис. 3. Схемы измерений вертикальной и боковой сил:

R — тензометрические резисторы; $R_1, 2, 3, 4, 5, 6$ — активные тензорезисторы, R_k — компенсационные; Π — линии питания моста; C — сигнальные линии

Fig. 3. Schemes for measuring vertical and lateral forces:

R — strain-gauge resistors; $R_1, 2, 3, 4, 5, 6$ — active strain gauges, R_k — compensatory resistors; Π — power lines of the bridge; C — signal lines

погрешности не позволяют полностью нивелировать влияние момента Pe в мостовых схемах при вычитаниях в соответствии с формулами (4) и (5), их влияние не приводит к существенным неточностям при оценке и сравнении максимальных величин сил взаимодействия различных экипажей. Обуславливается это тем, что максимальные величины сил взаимодействия имеют место при набегании колеса на рельс в точках контакта, которые определяются размерами головки рельса, и поэтому величина эксцентриситета e в данном сечении примерно одинакова для всех экипажей.

Применение вычислительной техники при определении сил взаимодействия по измерениям напряжений в шейке рельса. Внедрение в процессы обработки данных средств цифровой вычислительной техники позволяет избежать погрешностей метода Шлупфа, возникающих вследствие неточности определения мест расположения тензометрических схем и различия в масштабных коэффициентах регистрируемых сигналов.

В частности, в методике «РЖД-2016» [21] реализуется замена электрической аппаратной обработки аналоговых сигналов по Шлупфу математической. Определение напряжений в каждой из четырех точек наклейки проводится в этом случае отдельной мостовой схемой. Это вдвое увеличивает число используемых тензодатчиков (до 16) и каналов измерения (до 4). Однако, поскольку в основе данного экспериментально-расчетного метода лежит использование матриц влияния, в этом случае для определения действующих на рельс сил по напряжениям в местах наклейки первичных тензометрических преобразователей (тензорезисторов) не требуется точной наклейки тензорезисторов.

При использовании, согласно С. П. Тимошенко, измерения напряжений не в четырех, а в трех точках рельса [11] количество аппаратуры существенно

уменьшается. В предлагаемом методе вместо 8 тензодатчиков, объединяемых в два моста, которые используются при определении боковой и вертикальной силы по методике Шлупфа, напряжения измеряют тремя полумостовыми схемами на шейке рельса с наклейкой 6 тензодатчиков (рис. 5).

Если датчики 1 и 3 расположены с внутренней стороны рельса, а датчик 2 — с наружной, то выражения для определения напряжений в трех i -х сечениях шейки рельса имеют вид:

$$\sigma_i = a_i P + (-1)^i b_i Y + (-1)^i c_i M, \quad (6)$$

где σ_i — напряжения, в сечениях шейки рельса (i — номер точки измерения); P — вертикальная сила, действующая от колеса на рельс на поверхности катания головки рельса; Y — боковая сила, действующая от колеса на рельс на головку рельса; $M = Pe$ — момент вертикальной силы при поперечном смещении точки контакта на головке рельса; a, b, c — элементы ма-

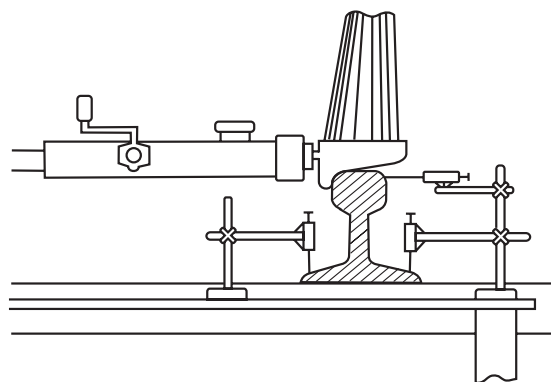


Рис. 4. Схема установки для создания калибровочной нагрузки на рельс

Fig. 4. Installation scheme for creating a calibration load on a rail

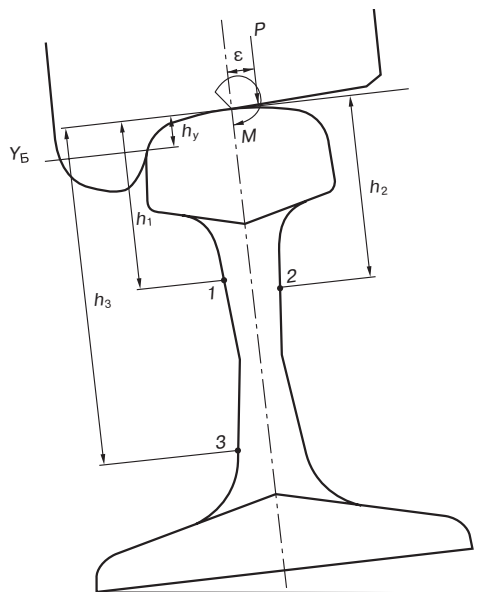


Рис. 5. Расчетная схема определения вертикальной и боковой сил взаимодействия по трем точкам измерения (1, 2 и 3) напряжений в шейке рельса: h_i — смещение, соответствующее i -й точке измерения; h_y — смещение боковой силы относительно поверхности катания; ε — смещение точки приложения вертикальной силы P

Fig. 5. Calculation scheme for determining vertical and lateral forces of interaction with respect to three points of measurement (1, 2 and 3) of stresses in the neck of the rail: h_i — displacement corresponding to the i -th measuring point; h_y — displacement of the lateral force relative to the rolling surface; ε — displacement of the point of application of the vertical force P

трицы напряжений, являющиеся соответствующими коэффициентами влияния в выражениях для напряжений при нагрузках на рельс

$$a_i = k_{ip} / F_i, b_i = k_{iy} (h_i - h_y) / W_i, c_i = k_{im} / W_i, \quad (7)$$

где F_i — площадь соответствующего сечения шейки рельса; W_i — момент сопротивления в данном сечении; h_i — расстояние от поверхности катания на головке рельса до центра измерительного тензорезистора в i -м сечении шейки; h_y — расстояние от поверхности катания рельса до точки приложения боковой силы.

Совокупность измеряемых напряжений σ_i , описываемых уравнениями (6), представляет систему трех уравнений с тремя неизвестными силовыми параметрами. Определение боковой силы производится не по разности моментов $M_a - M_b$, вызывающих соответствующие напряжения, как это реализовано в методе Шлупфа (5), а в результате решения системы уравнений по данным замеров в местах наклейки датчиков и коэффициентов передачи датчиков. Повышение количества усилительных каналов увеличивает используемое оборудование и трудоемкость работ. Однако при математической обработке измерений уменьшается погрешность определения сил взаимодействия, так как жесткостные параметры рельса и значения коэффициентов передачи датчиков входят

в величины коэффициентов влияния (7), которые определяются при калибровке.

Элементы матрицы влияния a_i , b_i , c_i определяются в результате калибровочных нагружений рельса по формулам (7) с учетом соответствующих знаков в уравнениях (6) и значений коэффициентов передачи k_{ip} , k_{iy} , k_{im} .

В результате тарировочных нагружений получают зависимости напряжений σ_i от действующих сил для вычисления коэффициентов влияния (7), которые являются неизвестными в системе (6), при известных калибровочных силах и обуславливаемых ими напряжениях. Эти коэффициенты определяются при трехкратном калибровочном приложении различных систем нагрузок и дают возможность реализации обратной операции — определение сил по известным напряжениям, когда в уравнениях (6) при известных коэффициентах (7) в качестве неизвестных выступают силы.

Рассмотрим методику калибровки.

1. При отсутствии боковой силы нагружаем рельс вертикальной силой P известной величины по центру головки ($Y = 0$, $e = 0$). В том случае $a_i = \sigma_i / P$.

2. Нагружаем рельс вертикальной силой P при заданном поперечном смещении точки ее приложения ($Y = 0$, $M = Pe$). По результатам измерения напряжений получаем для каждого из уравнений системы (6) величины $c_i = (\sigma_i - a_i P) / (-1)^i M$.

3. Для определения величин коэффициентов влияния боковых сил b_i при расчетной реализации рассматриваемой обработки данных методом конечных элементов можно использовать калибровку приложением заданной боковой силы Y при $P = 0$. В этом случае $b_i = \sigma_i / (-1)^i Y$.

Однако в эксперименте, а тем более в полевых условиях организовать подобное нагружение достаточно сложно. К тому же в реальности приложение боковых сил сопровождается вертикальным воздействием колесной нагрузки. Потому калибровку боковой силой производят с вертикальным пригрузом известной вертикальной центральной нагрузкой, и расчет ведется по формуле

$$b_i = (\sigma_i - a_i P) / (-1)^i Y.$$

Решение системы трех линейных уравнений для определения величины сил взаимодействия в зависимости от напряженного состояния рельса в рассматриваемом его сечении имеет вид:

$$\begin{aligned} P &= A_{p1} S1 + B_{p2} S2 + C_{p3} S3; \\ Y &= A_{y1} S1 + B_{y2} S2 + C_{y3} S3; \\ M &= A_{m1} S1 + B_{m2} S2 + C_{m3} S3, \end{aligned} \quad (8)$$

где $S1, 2, 3$ — показания соответствующего датчика под действующей в рассматриваемом сечении рельса системой нагрузок.

Коэффициенты матрицы (8) $A_{p1}, B_{p2}, C_{p3}, A_{y1}, B_{y2}, C_{y3}, A_{m1}, B_{m2}$ и C_{m3} определяются решением уравнений (6) либо по формулам Крамера, что для системы трех линейных уравнений не представляет трудностей, либо как элементы псевдообратной матрицы с использованием соответствующей системы программ [22].

Верификация рассматриваемого метода измерений сил взаимодействия. Для проверки рассматриваемого метода была разработана конечно-элементная модель, позволяющая теоретически получать напряжения в точках измерения для сопоставления с результатами эксперимента на стенде (рис. 6). Экспериментальная модель представляет отрезок рельса длиной 60 см, закрепленный с двух сторон в зоне опирания рельса на подкладки. На основе разработанной модели были выполнены варианты расчеты нагружения рельса различными сочетаниями вертикальной и боковой сил.

При верификации метода для определения влияния положения точки контакта на головке рельса осуществляли центральное нагружение вертикальной силой и ее смещение вправо и влево относительно продольной оси. В процессе нагружения проводилась фиксация напряжений в точках шейки рельса в соответствии с расчетной схемой. Расхождение результатов измеренных напряжений и их расчетных значений, полученных при конечно-элементном моделировании, лежит в пределах 8%.

На основе полученных данных были приняты величины напряжений для верификации рассматриваемого метода определения сил взаимодействия по измеренным напряжениям.

При решении уравнений (8) по методу Крамера главный определитель системы D вычисляется по формуле

$$D = a1(b3c2 - b2c3) + a2(b3c1 - b1c3) + a3(b2c1 - b1c2). \quad (9)$$

Раскрывая дополнительные определители системы, получаем выражения для расчета сил взаимодействия по данным показаний датчиков $S1, S2, S3$:

$$\begin{aligned} P &= S1(b3c2 - b2c3) / D + S2(b3c1 - b1c3) / D + \\ &+ S3(b2c1 - b1c2) / D; \\ Y &= S1(a2c3 - a3c2) / D + S2(a3c1 - a1c3) / D + \\ &+ S3(a1c2 - a2c1) / D; \\ M &= S1(a2b3 - a3b2) / D + S2(a3b1 - a1b3) / D + \\ &+ S3(a1b2 - a2b1) / D. \end{aligned} \quad (10)$$

Проведенная серия экспериментов показала, что различие опытных и расчетных данных не превосходит 4%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности ввода в пробную эксплуатацию предложенной трехточечной схемы измерения сил для сравнительной оценки, в том числе с методом ГОСТ Р 55050–2012 (метод Шлупфа) и методом «РЖД-2016».

Рис. 6. Верификация модели нагружения рельса на стенде

Fig. 6. Verification of the rail loading model at the stand

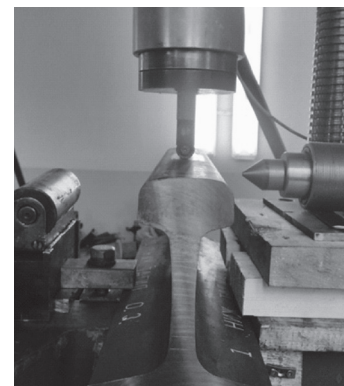


Таблица 1

Напряжения, принятые для расчетов по рассмотренной методике при различных сочетаниях нагрузок

Table 1

Stresses accepted for calculations on the considered method at various combinations of loadings

Номер датчика	Значения напряжений при нагружении рельса, МПа				
	Вертикальной силой (150 кН) по центру	Боковой силой (–100 кН)	Вертикальной силой (150 кН) со сдвигом (+20 мм)	Вертикальной силой по центру (150 кН) и боковой	Вертикальной силой (150 кН) со сдвигом (+20 мм) и боковой
1	–49,5	–24,5	28	–73	3,5
2	–49,5	24,5	–125	–22,5	–98,5
3	–34,2	–125	41,5	–159	–83,3

Таблица 2

Коэффициенты влияния при силах по данным калибровок

Table 2

Coefficients of influence at forces on the basis of calibration data

Номер датчика	Коэффициенты влияния исходной системы a, b, c		
	Вертикальная сила (150 кН) по центру	Боковая сила (–100 кН)	Вертикальная сила (150 кН) со сдвигом (+20 мм)
1	–0,33	–0,245	0,0258
2	–0,33	0,245	–0,02517
3	–0,228	–1,25	0,0252

Выводы. 1. Метод измерения боковой силы с электрической обработкой сигнала (метод Шлупфа) при недостаточной точности наклейки датчиков обладает значительной зависимостью показаний измерений от точки приложения вертикальной силы относительно оси рельса, уступая по точности цифровой обработке экспериментальных данных. Однако, поскольку при установлении условий обращения подвижного состава рассматриваются максимальные значения сил взаимодействия, реализуемые в основном при набе-

гании колеса на рельс, когда смещение вертикальной нагрузки определяется параметрами головки рельса и изменяется незначительно, получаемые результаты можно применять при проведении сертификационных испытаний.

2. Метод цифровой обработки данных при определении сил взаимодействия по напряжениям в трех точках шейки рельса требует для своей реализации три тензометрических моста вместо двух, однако точность его результатов существенно выше, так как зависит только от погрешностей предварительной калибровки сечений.

3. Полученные результаты показывают целесообразность использования предлагаемого трехточечного метода при определении взаимодействия подвижного состава и пути для установления условий обращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
2. Esveld C. Modern Railway Track. 2-nd edition. MRT Proctions, 2001. 740 p.
3. Взаимодействие пути и подвижного состава / под ред. М. А. Фришмана. М.: Трансжелдориздат, 1956. 280 с.
4. Prigge W. Die Beanspruchung einer einfachgewellten Eisenbahnradscheibe. Ermittlung der Spannungen mit dem Dehnungsmessstreifenverfahren. Glasers Annalen. 1959. Vol. 83, no. 3. S. 69–73.
5. Prigge W. Die Beanspruchung einer einfachgewellten Eisenbahnradscheibe. Ermittlung der Spannungen durch spannungsoptische Verfahren. Glasers Annalen. 1959. Vol. 83, no. 4. S. 132–136.
6. Olson P., Johnsson S. Seitenkräfte zwischen Rad und Schiene, eine experimentelle Untersuchung. Glasers Annalen. 1959. Heft 5. S. 153–161.
7. Ромен Ю. С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой коле. Методы расчета и испытаний. М.: ВМГ-Принт, 2014. 210 с.
8. Ромен Ю. С., Тихов М. С. Объем информации для установления допустимых скоростей движения по результатам комплексных испытаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. науч. тр. СПб: ПГУПС, 2007. С. 87–94.
9. Королев К. П. Вписывание паровозов в кривые участки пути // Труды ЦНИИ МПС. М.: Трансжелдориздат, 1950. Вып. 37. 224 с.
10. Тихов М. С. Определение условий обращения подвижного состава с использованием корреляции в показателях взаимодействия экипажа и пути: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. М., 2007. 24 с.
11. Тимошенко С. П. Метод исследований статических и динамических напряжений в рельсе // Статические и динамические проблемы теории упругости. Киев: Наукова думка, 1975. 563 с.
12. Шафрановский А. К. Непрерывная регистрация вертикальных и боковых сил взаимодействия колеса и рельса // Труды ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1965. Вып. 308. 96 с.
13. Шафрановский А. К. Измерение и непрерывная регистрация сил взаимодействия колесных пар локомотивов с рельсами // Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1969. Вып. 389. 120 с.
14. Бржезовский А. М. Методы экспериментальной оценки боковых сил (обзор) // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 1. С. 10–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-10-18>.
15. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов // Труды ЦНИИ МПС. М.: Трансжелдориздат, 1955. Вып. 97. С. 289–325.
16. Ершков О. П. Исследование жесткости железнодорожного пути и ее влияние на работу рельсов в кривых участках // Труды ЦНИИ МПС. М.: Трансжелдориздат, 1963. Вып. 264. С. 39–98.
17. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmessstreifen bei den SBB // Technische Rundschau. Bern, 1955. No. 26. S. 35–41.
18. Weber H. H. Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene // Elektrischen Bahnen. Bern, 1961. No. 5. S. 93–110.
19. Влияние вертикальной нагрузки при измерении горизонтальных сил в пути / Э. И. Даниленко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1979. № 1. С. 41–44.
20. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1965. Т. 1. 363 с.
21. Гапанович В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 10–15.
22. Горбаченко В. И. Вычислительная линейная алгебра с примерами на MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 320 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

РОМЕН Юрий Семенович,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

СУСЛОВ Олег Александрович,

канд. техн. наук, директор научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс» (НЦ «ЦПРК»), АО «ВНИИЖТ»

БАЛЯЕВА Алена Александровна,

инженер 1 категории, научный центр «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс» (НЦ «ЦПРК»), АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 12.07.2017 г., актуализирована 27.09.2017 г., принята к публикации 10.10.2017 г.

Determining the force of interaction in a wheel – rail system based on measuring stresses in rails neck

Yu. S. ROMEN, O. A. SUSLOV, A. A. BALLYAEVA

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. When implementing new or modernized rolling stock, one of the main problems is the provision of both traffic safety, and the strength of the carriage and the ways that are determined by forces in the wheel – rail system. It is almost impossible to directly measure the forces of interaction between the crew and the track. Their determination can be carried out by measuring the stresses in rails, the interdependencies of which with forces are of a probabilistic nature. Correlation of the strength and stresses for

the train in most cases is in the range of 0.9–0.95 and varies depending on the position in the track of a group of wheelsets. The correlation level of the frame force measured in the carriage and the sum of lateral forces by its average values is 0.98. A practical method for determining the forces of interaction with respect to stresses in the neck of a rail was proposed by Schlumpf. It involves determining the difference of the moments in the two cross sections of the rail neck with the angular moment of resistance to bending

being equal. In this case, when the scale factors are equal to the difference of the moments, the lateral force is determined. The calculations were made by subtracting electrical signals (four strain gauges were included in the shoulders of the Wheatstone bridge), and a separate bridge was used to determine the vertical load. Errors in determining the lateral force are due to inaccurate location of the sensor sticking, the difference in the dimensions of the rail neck and the displacement of the point of application of the vertical load on the rail head.

However, since the maximum forces are realized when the wheel climbs on the rail, this displacement varies insignificantly. Therefore, the results obtained can be used in conducting certification tests.

The method of digital processing of data on stresses at three points of the rail neck requires for its implementation more strain gauges, but the accuracy of its results is much higher, since it depends only on the errors of preliminary calibration of the cross sections. The error in calculating the forces does not exceed 4 %, which shows the expediency of using the three-point method in determining the interaction forces to establish the conditions of circulation.

Keywords: interaction of rolling stock and track; methods of measuring interaction forces; lateral forces; frame forces; stresses

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361>

REFERENCES

1. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of the track and rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986, 559 p.
2. Esveld C. *Modern Railway Track*. 2-nd edition. MRT Proceedings, 2001, 740 p.
3. Frishman M. A. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of the track and rolling stock]. Moscow, Transzheldorizdat, 1956, 280 p.
4. Prigge W. *Die Beanspruchung einer einfachgewellten Eisenbahnradsscheibe. Ermittlung der Spannungen mit dem Dehnungsmessstreifenverfahren*. Glasers Annalen, 1959, Vol. 83, no. 3, pp. 69–73.
5. Prigge W. *Die Beanspruchung einer einfachgewellten Eisenbahnradsscheibe. Ermittlung der Spannungen durch spannungsoptische Verfahren*. Glasers Annalen, 1959, Vol. 83, no. 4, pp. 132–136.
6. Olson P., Johnsson S. *Seitenkräfte zwischen Rad und Schiene, eine experimentelle Untersuchung*. Glasers Annalen, 1959, Heft 5, pp. 153–161.
7. Romen Yu. S. *Dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha v rel'sovoy kolee. Metody rascheta i ispytaniy* [Dynamics of the railway carriage in the rail track. Methods of calculation and testing]. Moscow, VMG-Print Publ., 2014, 210 p.
8. Romen Yu. S., Tikhov M. S. *Ob "em informatsii dlya ustanovleniya dopustimyykh skorostey dvizheniya po rezul'tatam kompleksnykh ispytaniy* [The volume of information for establishing the permissible speeds of movement based on the results of complex tests]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty*. Sb. nauch. tr. [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects. Coll. of scientific papers]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2007, pp. 87–94.
9. Korolev K. P. *Vpisyvanie parovozov v krivye uchastki puti* [Entering steam locomotives into curved path sections]. *Trudy TsNII MPS* [Proc. of the Central Research Institute of the Ministry of Railways]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1950, no. 37, 224 p.
10. Tikhov M. S. *Opreделение usloviy obrashcheniya podvizhnogo sostava s ispol'zovaniem korrelyatsii v pokazatelyakh vzaimodeystviya ekipazha i puti*. Kand. tekhn. nauk avtoref. [Determination of the conditions of circulation of rolling stock using correlation in the parameters of the interaction between the crew and the track. Cand. tech. sci. synopsis]. Moscow, 2007, 24 p.
11. Timoshenko S. P. *Metod issledovaniy staticheskikh i dinamicheskikh napryazheniy v rel'se* [Method for studying static and dynamic stresses in the rail]. *Staticheskie i dinamicheskie problemy teorii uprugosti* [Static and dynamic problems of the theory of elasticity]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 563 p.
12. Shafranovskiy A. K. *Nepreryvnaya registratsiya vertikal'nykh i bokovykh sil vzaimodeystviya kolea i rel'sa* [Continuous recording of vertical and lateral forces of wheel and rail interaction]. *Trudy TsNII MPS* [Proc. of the Central Research Institute of the Ministry of Railways]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1965, no. 308, 96 p.
13. Shafranovskiy A. K. *Izmerenie i nepreryvnaya registratsiya sil vzaimodeystviya kolesnykh par lokomotivov s rel'sami* [Measurement and continuous registration of forces of interaction of wheelsets of locomotives with rails]. *Trudy VNIIZhT* [Proc. of the JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Transport Publ., 1969, no. 389, 120 p.
14. Brzhezovskiy A. M. *Metody eksperimental'noy otsenki bokovykh sil (obzor)* [Methods of experimental evaluation of lateral forces (review)]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 1, pp. 10–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-10-18>.
15. Ershkov O. P. *Ustanovlenie koeffitsientov, uchityvayushchikh bokovoy izgib i kruchenie rel'sov* [Establishing the coefficients, taking into account the lateral bending and torsion of the rail]. *Trudy TsNII MPS* [Proc. of the Central Research Institute of the Ministry of Railways]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1955, no. 97, pp. 289–325.
16. Ershkov O. P. *Issledovanie zhestkosti zheleznodorozhnogo puti i ee vliyaniye na rabotu rel'sov v krivykh uchastkakh* [Study on the rigidity of the railway track and its influence on the operation of rails in curved sections]. *Trudy TsNII MPS* [Proc. of the Central Research Institute of the Ministry of Railways]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1963, no. 264, pp. 39–98.
17. Schlumpf G. *Messungen mit Dehnungsmessstreifen bei den SBB*. Technische Rundschau. Bern, 1955, no. 26, pp. 35–41.
18. Weber H. H. *Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene*. Elektrischen Bahnen. Bern, 1961, no. 5, pp. 93–110.
19. Danilenko E. I., Frolov L. N., Romanov V. M., Grayaev A. B., Moras E. *Vliyaniye vertikal'noi nagruzki pri izmerenii gorizonta'lnykh sil v puti* [Influence of vertical load when measuring horizontal forces in the track]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1979, no. 1, pp. 41–44.
20. Timoshenko S. P. *Soprotivleniye materialov* [Materials resistance]. Moscow, Nauka Publ., 1965, Vol. 1, 363 p.
21. Gapanovich V. A. *Voprosy vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tyazhelovesnom dvizhenii* [Questions of the interaction of rolling stock and infrastructure under heavy traffic]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2016, no. 10, pp. 10–15.
22. Gorbachenko V. I. *Vychislitel'naya lineinaya algebra s primerami na MATLAB* [Computational linear algebra with examples on MATLAB]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011, 320 p.

ABOUT THE AUTHORS

Yuriy S. ROMEN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Oleg A. SUSLOV,

Cand. Sci. (Eng.), Director of Research Center "Railway track infrastructure and issues on wheel — rail interaction" (NTs "TsPRK"), JSC "VNIIZhT"

Alena A. Balyaeva,

1st category Engineer, Research Center "Railway track infrastructure and issues on wheel — rail interaction" (NTs "TsPRK"), JSC "VNIIZhT"

Received 12.07.2017

Revised 27.09.2017

Accepted 10.10.2017

■ E-mail: uromen@mail.ru (Yu. S. Romen)