

НОВЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ КОЛЕСО/РЕЛЬС НА УЧАСТКАХ С СИЛЬНО ИЗНОШЕННЫМИ РЕЛЬСАМИ

Н. И. Карпущенко, И. А. Котова, И. Д. Котов

Сибирский государственный университет путей сообщения, г.Новосибирск

Приведена методика экспериментальных исследований процессов в системе колесо/рельс с использованием цифровых фото- и видеокамер. Показаны основные результаты экспериментов, проведенных по этой методике, описаны обнаруженные в ходе экспериментов особенности взаимодействия ходовых частей подвижного состава и рельсовой колеи в опытных кривых и дана теоретическая оценка устойчивости колесной пары в кривой с учетом этих особенностей с позиций безопасности движения поездов.

На ряде участков Западно-Сибирской железной дороги на протяжении последних девяти лет ведутся наблюдения за износом рельсов. Самым сложным из них с точки зрения плана и профиля пути является перегон Инская–Сокур Инской дистанции пути, имеющий большое количество кривых радиусом 350–600 м, расположенных на уклонах до 12 ‰. Участок имеет грузонапряженность (по состоянию на 01.01.2005 г.) по первому пути 62,0 млн т·км бр./км в год (Мт), по второму пути – 59,3 млн т·км бр./км в год. На участке уложен звеньевой путь с рельсами Р65 на деревянных шпалах и щебеночном балласте. По перегону обращаются грузовые поезда, сопровождаемые локомотивами ВЛ10, ВЛ11 со скоростью движения (по приказу Начальника дороги) 60 км/ч и электропоезда ЭД4М, ЭР2 со скоростью движения 70 км/ч.

Летом 2004 года на опытном участке был проведен эксперимент по определению характера взаимодействия ходовых частей подвижного состава и рельсовой колеи при вписывании в кривые малого радиуса с использованием цифровых фото- и видеокамер. Видеокамеры были установлены внутри колеи к рабочим граням рельсов. Для расположения камеры один шпальный ящик освобождался от балласта, после чего в него поперек колеи укладывалась рельсовая рубка с болтовыми отверстиями длиной 0,5 м. К рубке через одно из болтовых отверстий была прикреплена переоборудованная головка стандартного штатива для видеокамеры. Одновременно рубка служила в качестве гасителя колебаний, передающихся от подвижного состава через элементы верхнего строения пути на камеру при проведении видеосъемки. Камера, защищенная от возможного ударного воздействия кожухом из оргстекла, монтировалась на головку штатива. При этом с помощью шарнира штатива можно было изменять угол наклона объектива в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также с помощью штыря с резьбой, посредством которого головка штатива была прикреплена к рубке, и двух фиксирующих гаек изменять положение камеры по вертикали.

Кроме того, был переоборудован стандартный пульт ДУ видеокамеры, в результате чего появилась возможность управления камерой в процессе видеосъемки за пределами зоны действия оптического инфракрасного сигнала.

В процессе съемки информация от видеокамеры передавалась в режиме реального времени через порт IEEE 1394 на мобильный компьютер.

Схема установки аппаратуры для проведения эксперимента представлена на рисунке 1.

Параллельно с видеосъемкой проводились измерения горизонтальных перемещений (отжатий) головки наружного рельса при движении подвижного состава с помощью индикаторов часового типа. Индикаторы были прикреплены к свайкам, заглубленным в балласт на один метр (см. рисунок 1). Для того чтобы получить максимальное значение перемещения головки рельса под проходящим поездом, из индикатора удалялась рабочая пружина и полость его заполнялась пластичной смазкой.

Снаружи колеи положение ходовых частей подвижного состава в процессе вписывания в кривую фиксировалось на цифровую фотокамеру.

Профиль изношенной головки рельса снимался с помощью специального шаблона. Шаблон, изготовленный по профилю нового рельса в соответствии с [1], устанавливался на головку рельса и упирался нижними гранями в его подошву. Просвет между внутренней поверхностью шаблона и рабо-

чими поверхностями головки рельса заполнялся пластилином, после чего шаблон снимался с рельса и форма изношенной головки переносилась на бумагу.

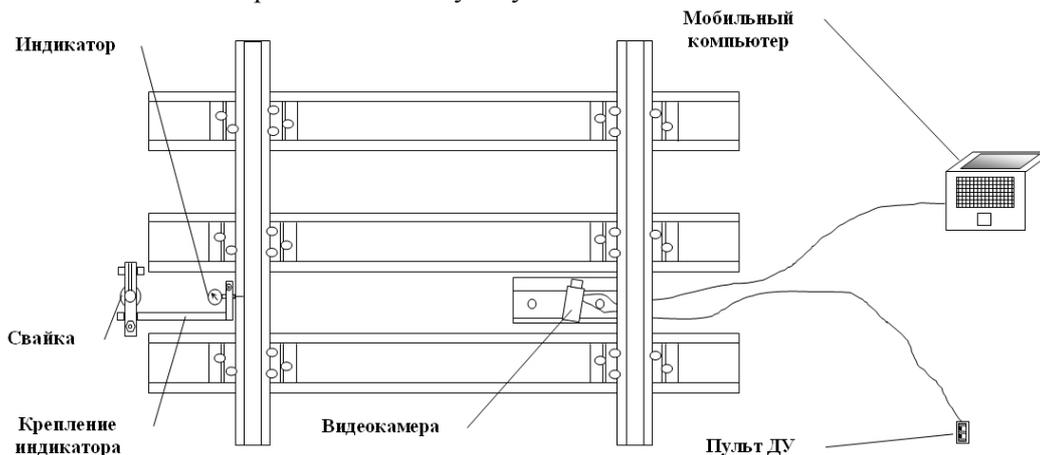


Рисунок 1– Схема установки аппаратуры для проведения эксперимента

Радиусы кривых были определены по стрелам изгиба, полученным в результате съемки, параметры кривых (возвышение наружного рельса, ширина колеи) – с помощью путеизмерительного шаблона ЦУП, подуклонка рельсов – строительным угломером.

В результате покадровой расшифровки видеосъемки были обнаружены некоторые особенности взаимодействия ходовых частей подвижного состава и рельсовой колеи в кривых малых радиусов.

В последние годы в железнодорожной прессе идет активная полемика на тему необоснованного перехода на ширину колеи 1520 мм и якобы вызванного этим роста интенсивности износа рельсов. Некоторые авторы утверждают, что такая ширина колеи недостаточна для свободного вписывания подвижного состава и неизбежно приводит к распуску колеи и износу обеих рельсовых нитей в кривых.

Приведенные ниже кадры фото- и видеосъемки показывают, что боковой износ на внутренних нитях отсутствует. На большинстве рабочих граней внутренних нитей кривых радиусом 600 м и менее отсутствуют даже следы касания гребней колес, кроме того, стоп-кадры видеосъемки показали наличие значительных зазоров между гребнями колес и боковыми гранями внутренних рельсов при движении и даже при остановке поезда в кривой (рисунок 2). Поэтому утверждения о недостатке ширины колеи в кривых не имеют под собой никаких оснований.

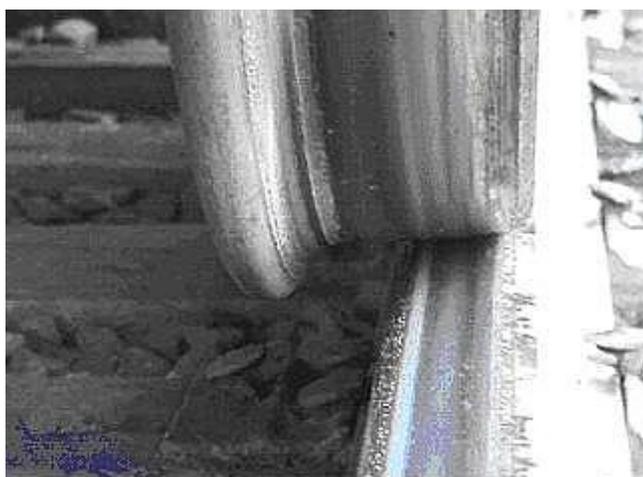


Рисунок 2 – Зазор между гребнем колеса и боковой гранью внутреннего рельса в кривой радиусом 368 м

Кроме того, видеосъемка позволила выявить следующую особенность взаимодействия рельсов и колес подвижного состава. При значительной величине бокового износа колеса гребнями начинают катиться по основанию выработки на боковой грани рельса (рисунки 3 и 4), и интенсивность износа рельсов несколько снижается, но появляется опасность схода колес с рельсов при плохой рихтовке пути и неплавном ведении поезда.

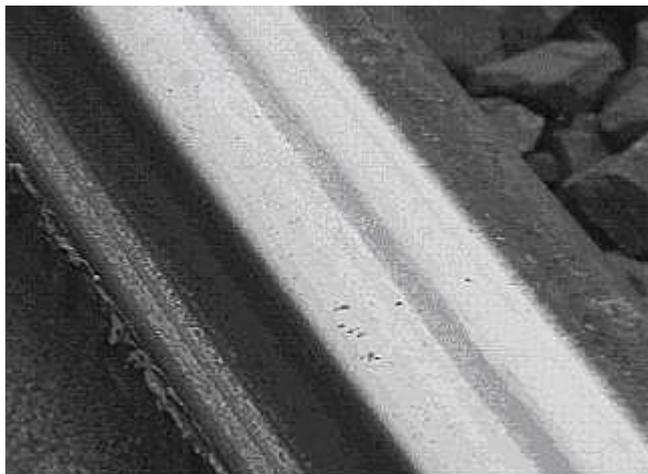


Рисунок 3 – Наружный рельс в кривой радиусом 354 м после пропуска 104,7 Мт



Рисунок 4 – Взаимодействие колес грузового локомотива и рельсовой колеи в кривой радиусом 368 м (первое колесо тележки оторвано от поверхности катания, качение осуществляется по выработанной на боковой грани полке)

При этом реализуется свободная перекосная схема вписывания, при которой первое колесо тележки гребнем набегают на наружный рельс и катятся по полке на его боковой поверхности, а второе колесо не касается боковой грани наружного рельса и катится по поверхности катания рельса.

Такая схема контактирования подтверждается наличием колесных пар, имеющих накатанные вершины гребней и отправленных на обточку в вагонное депо.

Через некоторый промежуток времени полки на боковой грани наружного рельса обламываются (рисунок 5), ослабляя при этом поперечное сечение рельсов и создавая условия для развития в них более опасных дефектов.

Характеристика кривой, для которой выше приведены стоп-кадры видеосъемки, представлена в таблицах 1 и 2, а поперечный профиль наружного рельса, снятый с помощью шаблона, описанного выше, – на рисунке 6.

Динамические значения параметров, приведенные в таблице 2, получены после измерения горизонтальных перемещений головки наружного рельса во время прохода подвижного состава с помощью индикаторов часового типа. Максимальное значение перемещения при проходе грузового груженого поезда составило 4 мм, что соответствует динамическому углу отклонения оси рельса $1,36^\circ$.

Как видно из таблицы 2, динамическая подуклонка рельсов наружной нити находится в пределах, определенных [2] (подуклонка рельсов в прямых и наружной рельсовой нити в кривых не должна быть меньше $1/60$ и больше $1/12$). В связи с этим нельзя считать некоторую боковую упругость пути в кривых, вызванную наличием напильных резиновых прокладок в скреплении Д0 [3], фактором, существенно влияющим на характер взаимодействия колес подвижного состава с рельсами и интенсивность их износа.

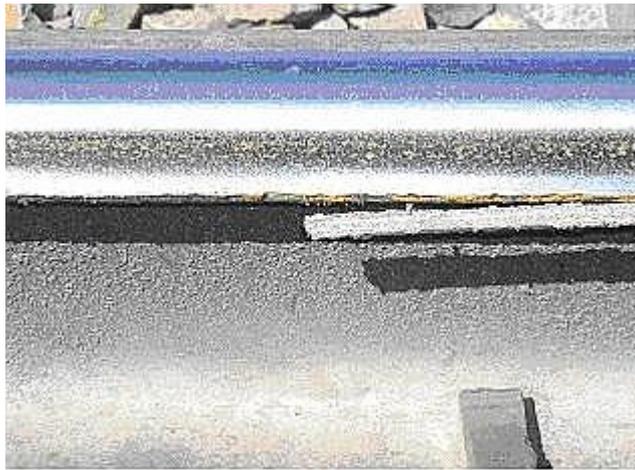


Рисунок 5 – Откол полки на боковой грани наружного рельса

Таблица 1 – Характеристика кривой

Местоположение	Грузонапря- женность, млн т·км бр. / км в год	Пропу- щенный тоннаж, Мт	Скорость движения по приказу Начальника дороги, км/ч		Ра- диус, м	Шири- на колеи, мм	Воз- выше- ние, мм	Интен- сив- ность изно- са, мм/Мт
			груз.	пас.				
Перегон Инская-Сокур ЗСЖД, 19-й км, 1-й путь	60	104	60	70	368	1540	87	0,101

Таблица 2 – Угловые характеристики поперечного профиля наружного рельса

Характер параметра	Углы наклона относительно плоскости рельсового пути					
	подошвы рельса		поверхности катания рельса		боковой грани рельса	полки на боковой грани рельса
	градусы	доли	градусы	доли	градусы	градусы
Статический	2,72	1/21	4,72	1/12	73,00	34,00
Динамический	1,36	1/42	3,36	1/17	71,64	32,64

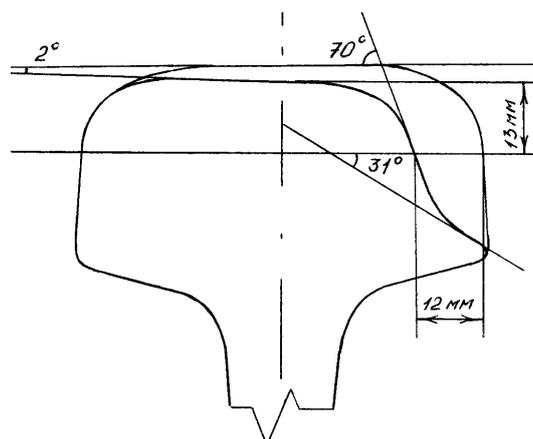


Рисунок 6 – Поперечный профиль наружного рельса в кривой радиусом 368 м после пропуска 104 Мт (значения углов даны относительно горизонта)

Обнаруженные в ходе проведения эксперимента особенности взаимодействия ходовых частей подвижного состава и рельсовой колеи в кривых мало изучены и требуют более детального рассмотрения с точки зрения обеспечения безопасности движения поездов.

Передние колеса тележек вагонов при движении по кривым, а часто и на прямых участках пути набегают гребнями на боковые грани головок рельсов. Угол набегания α (рисунок 7, а) может достигать до 0,01 рад и даже несколько больше (в крутых кривых). Место контакта гребня с головкой рельса находится впереди от вертикального радиуса колеса (рисунок 7, б) на величину $\varepsilon = r_k \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta$ (предварение касания).

Для того чтобы предупредить возможность схода колесной пары с рельсов, который может произойти в результате набегания гребня колеса на головку рельса под действием силы F , необходимо и достаточно, чтобы сила P_1 , стремящаяся опустить колесо вниз, была бы больше силы, стремящейся препятствовать опусканию (рисунок 8). Это условие обеспечивается, если проекция силы P_1 на плоскость AB , касательную к образующей поверхности гребня, больше суммы проекций на ту же плоскость всех остальных сил, включая и силы трения:

$$P_1 \sin \beta > (F + \mu' P_2) \cos \beta + \mu (F + \mu' P_2) \sin \beta + \mu P_1 \cos \beta, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения скольжения гребня колеса по закруглению головки рельса; μ' – коэффициент трения поверхности катания колеса по головке рельса; β – угол между общей касательной AB в точке соприкосновения с горизонталью.

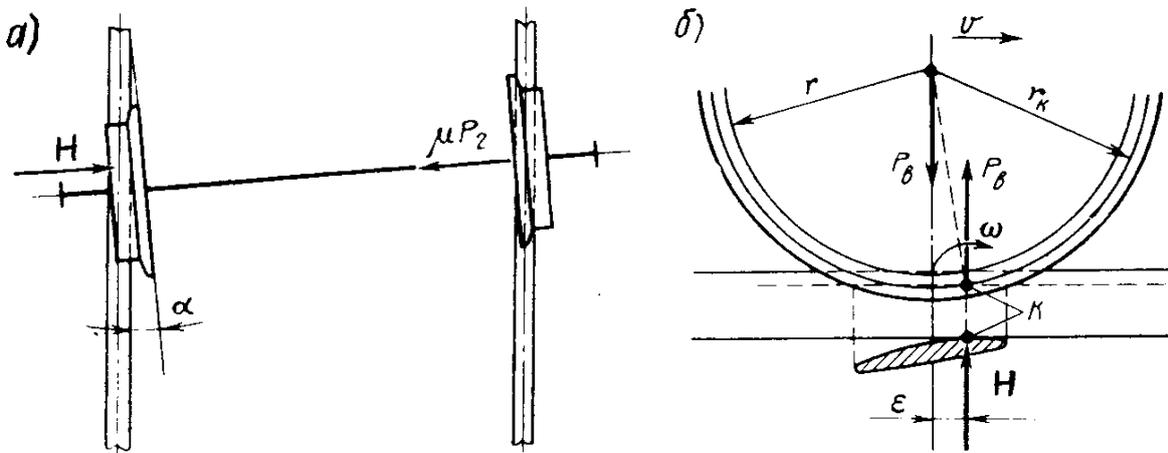


Рисунок 7 – Схема расчета устойчивости колес против схода с рельсов

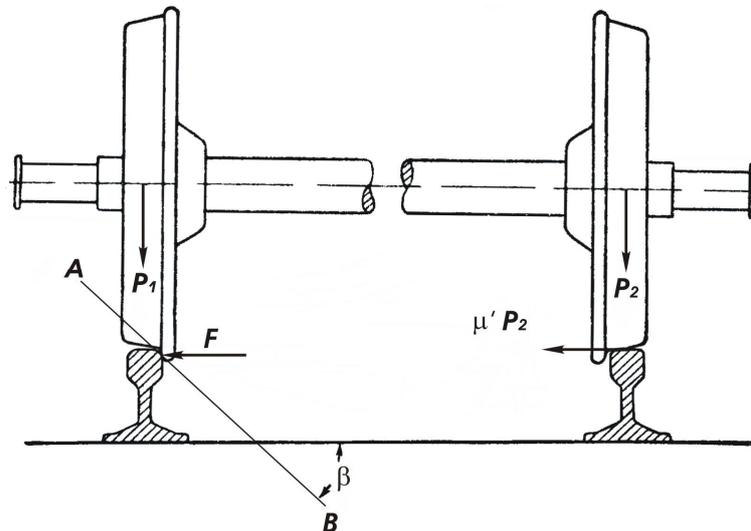


Рисунок 8 – Схема для определения устойчивости колеса на рельсах

Сделав соответствующие преобразования неравенства, получим

$$\frac{F + \mu' P_2}{P_1} \leq \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta}. \quad (2)$$

Данное неравенство является тем условием, при котором схода с рельса не может быть. Анализируя полученное неравенство, нетрудно убедиться, что устойчивость колесной пары уменьшается с

увеличением коэффициентов трения μ и μ' , уменьшением угла β , увеличением колебаний вагона, вызывающих возрастание силы F , и перераспределением сил P_1 и P_2 между колесами.

Боковая сила $H = F + \mu'P_2$. В этом случае

$$\frac{H}{P_1} \leq \frac{\operatorname{tg}\beta - \mu}{1 + \mu\operatorname{tg}\beta}. \quad (3)$$

Для электровоза ВЛ10 при $P_1 = P_2 = 115$ кН и $\beta = 70^\circ$ получим:

– при отсутствии смазки на рельсах ($\mu = 0,25$) $H = 1,48P_1 = 170,2$ кН;

– при наличии смазки на рельсах наружной нити ($\mu = 0,10$) $H = 2,07P_1 = 238,1$ кН.

И в первом, и, тем более, во втором случае возникновение боковых сил такой величины на исправном пути маловероятно, и вкатывание гребня колеса на головку рельса, а также зависание колеса гребнем на выкружке рельса (как промежуточное положение) тоже маловероятно.

Если же рассматривать возможность зависания гребня колеса на полке, возникшей в результате износа головки рельса, то при $P_1 = P_2 = 115$ кН и $\beta = 31^\circ$:

– при отсутствии смазки на рельсах ($\mu = 0,25$) $H = 0,3P_1 = 34,5$ кН;

– при наличии смазки на рельсах наружной нити ($\mu = 0,10$) $H = 0,47P_1 = 54,1$ кН.

Такие боковые силы при вписывании тележек электровозов ВЛ10 в кривую $R = 368$ м вполне возможны даже при нулевом непогашенном ускорении, что имело место в эксперименте.

Величину боковой силы определим расчетом на основе экспериментальных данных отжатия рельса.

Отжатие головки рельса вычисляется по формуле (рисунок 9)

$$z_{\Gamma} = z_0 + \varphi_0 h_1, \quad (4)$$

где z_0 – перемещение центра кручения рельса; φ_0 – угол закручивания рельсовой нити в месте приложения горизонтальной нагрузки H ; h_1 – расстояние от центра изгиба до места приложения боковой силы.

Так как вертикальная P и горизонтальная H силы приложены к рельсу эксцентрично, то в сечении приложения этих сил возникает крутящий момент

$$M_{\text{КР}} = Hh_1 - P\left(\frac{b}{2} - r_{\text{в}}\right), \quad (5)$$

где b – ширина головки рельса; $r_{\text{в}}$ – радиус выкружки головки рельса.

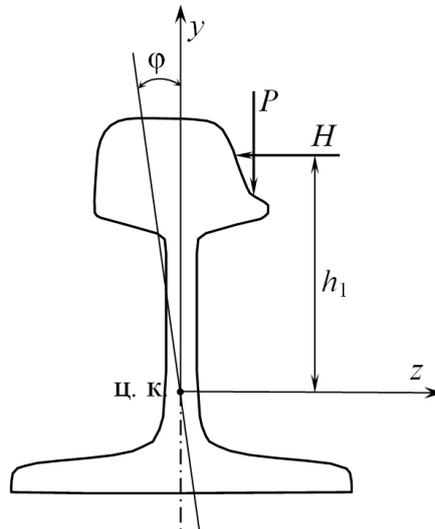


Рисунок 9 – Схема действия сил на рельс с сильным износом головки в кривой

Формула для определения величины поперечного перемещения центра кручения рельса имеет вид

$$z_0 = \frac{Hk_z}{2U_z}, \quad (6)$$

где k_z – коэффициент относительной жесткости подрельсового основания и рельса; U_z – модуль упругости пути в горизонтальном направлении.

Зависимость угла закручивания рельса от действующего крутящего момента определяется по формуле

$$\varphi_0 = \frac{M_{кр}}{\beta_\varphi}, \quad (7)$$

где $\beta_\varphi = 2D_K h_K r_1 r_2 (r_1 + r_2) = A\sqrt{U_\varphi} + BU_\varphi$. В этой формуле U_φ – модуль упругости рельсовой нити при кручении; A и B – коэффициенты [4, 5].

В экспериментах на участке пути с рельсами Р65, деревянными шпалами и щебеночным балластом в кривой радиусом 368 м при воздействии на путь электровоза ВЛ10 с нагрузкой от колеса на рельс 115 кН имели место следующие параметры пути: $U_z = 24$ МПа; $k_z = 2,23 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$; $h_1 = 0,1126$ м; $U_\varphi = 360$ кН/рад; $A_\beta = 305$; $B_\beta = 0,286$.

В этом случае в соответствии с (4) $z_r = 0,0659 \cdot 10^{-3} H - 0,47 \cdot 10^{-3}$. При $z_r = 0,004$ м $H = 67,9$ кН. Следовательно, набегающее колесо будет удерживаться на полке даже при смазанных рельсах, что зафиксировано нами при помощи цифровой видеокамеры.

Качение переднего колеса гребнем по наклонной выработке в головке рельса вызывает сильный перекоз вагонной тележки (рисунок 10) с образованием больших зазоров между гребнем заднего колеса и боковой гранью наружного рельса. Величина зазора составляет в среднем $\delta_{ср} = 30,6$ мм. Угол набегания переднего колеса на боковую грань рельса $\alpha = 0,0166$ рад $\approx 1^\circ$.

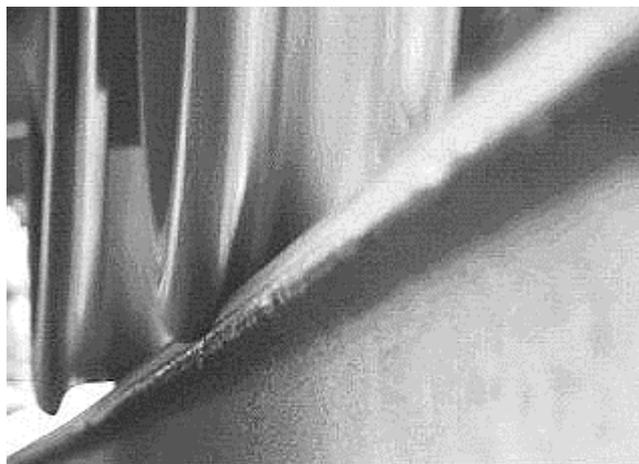


Рисунок 10 – Вписывание в кривую радиусом 368 м тележки грузового вагона

Такой угол набегания вызывает увеличение интенсивности износа рельсов и создает угрозу безопасности движения.

Список литературы

- 1 ГОСТ Р 51685-2000. Рельсы железнодорожные. – Введ. 2000-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 24 с.
- 2 Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути / МПС России. – М.: Транспорт, 2001. – 223 с.
- 3 Ликратов, Ю. Н. Ездим на гребнях колес / Ю. Н. Ликратов // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 11. – С. 52–54.
- 4 Ершков, О. П. Расчеты железнодорожного пути в кривых и нормы его устройства / О. П. Ершков, Л. П. Мелентьев, М. С. Яхов. – М.: Транспорт, 1960. – 205 с.
- 5 Шахунянец, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянец. – М.: Транспорт, 1969. – 536 с.

Получено 09.05.2005

N. I. Karpushchenko, I. A. Kotova, I. D. Kotov. New methods of experimental researches processes in the wheel/rail system on plots with hardly worn rails.

The technique of experimental researches of processes in the wheel/rail system with use of digital photo- and videocameras is adduced. The main results of the experiments conducted on this technique are shown, the features of interaction of parts of a rolling stock and a rail track found during experiments in trial curves are described and the theoretical rating of resistance of a wheel pair in a curve with allowance for these features from items of traffic safety of trains is given.