

Динамические силы и процессы в рельсах при ударном взаимодействии колес с дефектами

О. Г. КРАСНОВ, О. К. БОГДАНОВ, М. Г. АКАШЕВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКИ»), Коломна, 140402, Россия

Аннотация. Проблема взаимодействия колес подвижного состава с дефектами на поверхности катания и рельсов железнодорожного пути и также движению колес по неровностям рельсов посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных исследований. Весомый вклад в решение данной проблемы внес М. Ф. Вериго. В настоящее время появились новые измерительно-программные комплексы, позволяющие обрабатывать большие объемы статистической информации, что дает возможность уточнить ряд положений.

На основе экспериментальных исследований определены характерные особенности динамических процессов взаимодействия колес с типовыми дефектами на поверхности катания, суммарных прогибов рельсов от воздействия ударных сил. Сделаны выводы.

Ключевые слова: ударные силы; динамические процессы; дефекты колес; суммарный прогиб рельса; спектр; частота; ускорение

Одним из факторов, определяющих интенсивность взаимодействия рельсового пути и подвижного состава, является состояние поверхности катания колесных пар подвижного состава и рельсов железнодорожного пути.

Состояние вопроса. Основы теории о движении колеса по изолированным неровностям пути и возникающих при этом силах инерции неподрессоренных масс были заложены русскими учеными — акад. Н. П. Петровым [1] и проф. А. А. Холодецким [2]. В дальнейшем эта теория была развита в трудах профессоров Н. Т. Митюшина [3], В. П. Крачковского [4], Г. М. Шахунянца [5], К. Н. Мищенко [6], А. А. Попова [7], К. П. Королёва [8], В. Н. Данилова [9].

Объемные исследования по вопросу о движении колеса по неровности и колеса с неровностью были выполнены во ВНИИЖТе проф. М. Ф. Вериго [10, 11, 12]. В частности, им предложен способ определения дополнительного прогиба рельса с использованием исходных данных в виде натурного графика изолированной неровности с определением методом промера кривизны натурной неровности. С использованием дифференциального уравнения С. П. Тимошенко [13] предложено определять дополнительный прогиб рельса, производя графоаналитическое интегрирование.

М. Ф. Вериго обоснованы распределения вероятностей действия сил инерции неподрессоренных масс и параметры этого распределения для практических расчетов. Это позволяет оценить наибольшие величины сил, действующих на рельс при движении по нему колеса с непрерывными неровностями на поверхности катания, и определить вероятность наблюдения этой силы.

В дальнейшем исследования по вертикальным силам взаимодействия колес подвижного состава и железнодорожного пути были развиты в работах А. Я. Когана [14, 15, 16, 17], Р. Ковалёва [18], Н. Н. Кудрявцева [19] и др.

Условия проведения испытаний. Специалистами ОАО «ВНИКИ» проведен комплекс экспериментальных исследований по установлению закономерностей динамических процессов и фактических значений сил взаимодействия колес с дефектами на поверхности катания и рельсов на современных конструкциях пути. С этой целью выполнено оборудование опытного участка железнодорожного пути измерительными приборами на участке Голутвин — Озеры Московской железной дороги. Верхнее строение опытного участка пути включало рельсы Р65, железобетонные шпалы, балласт щебеночный с толщиной слоя под шпалой 350—380 мм, промежуточные рельсовые скрепления КБ-65. Перед оборудованием рельсов измерительными приборами проводился визуальный осмотр поверхностей катания рельсов. На поверхности катания рельсов не допускалось наличие дефектов в виде выбоков, выщербин и других коротких неровностей, приводящих к ударному взаимодействию колес и рельсов.

Для непрерывной регистрации динамических нагрузок применен силовой метод, разработанный проф. Н. Н. Кудрявцевым [19]. Суть метода заключается в том, что по сжатию шейки рельса удается с наибольшей достоверностью судить о величине вертикального силового воздействия. Шейка расположена вблизи зоны контакта колеса с рельсом, имеет небольшие поперечные размеры, поэтому ее вертикальные деформации оказываются достаточно большими,

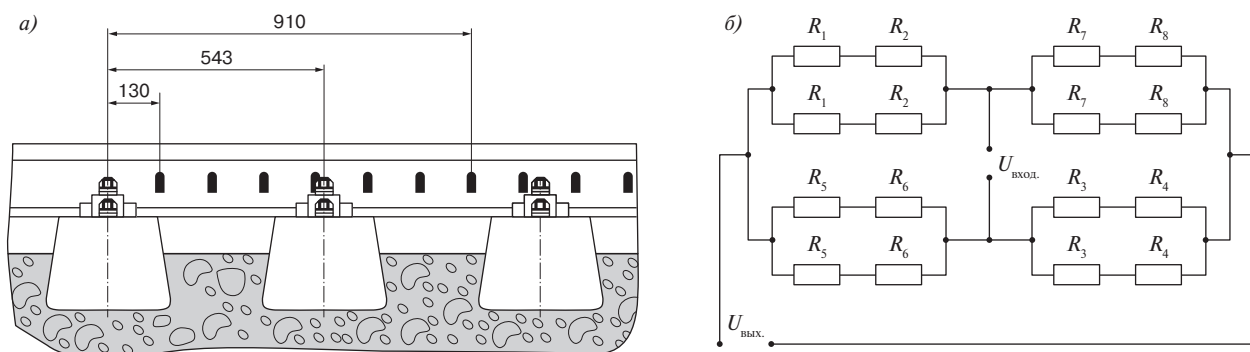


Рис. 1. Схема измерительного модуля для непрерывной регистрации вертикальных сил:
 а — размещение тензодатчиков на рельсе; б — соединение тензорезисторов в измерительные схемы

Fig. 1. Scheme of measuring module for continuous recording of vertical forces:

а — placing strain gauges on the rail; б — connection of strain gauges to the measuring circuit

чтобы фиксировать разнообразные величины силового воздействия. Преимуществом размещения тензодатчиков в средней части шейки рельса, на его нейтральной оси является минимальное влияние на показание сил изгибных деформаций рельса.

На выбранном участке пути обе рельсовые нити на длине окружности колеса оборудовались шестью измерительными модулями для непрерывной регистрации вертикальных сил по три на каждую нить в соответствии со схемами, предложенными в работе [19]. Схема установки тензодатчиков на рельсе и схема измерительного модуля показаны на рис. 1.

Регистрация вертикальных сил, действующих от колес подвижного состава на шейку рельса, производилась измерительно-вычислительным комплексом МИС-026 производства НПП «Мера». Общий вид опытного участка представлен на рис. 2.

Для определения величин перемещений подошвы рельса под действием ударных сил опытный участок оснащался датчиками перемещений. Вдоль одной рельсовой нити, по которой перемещались колеса с дефектами на поверхности катания, с наружной стороны рельса последовательно между шпалами устанавливались три датчика перемещений, фиксирующих вертикальные перемещения подошвы рельса, и один датчик для регистрации горизонтальных поперечных колебаний рельса. Следует отметить, что в нашем случае прогиб подошвы рельса представлял суммарную деформацию непосредственно рельса, упругой рельсовой прокладки и подшпального основания.

Схема оборудования опытного участка датчиками перемещений представлена на рис. 3.

Датчики перемещений закреплялись на свайке, которая забивалась с наружной стороны рельса в земляное полотно.

В начале каждого цикла измерений проводилась тарировка измерительных каналов. В процессе исследований одновременно определялись вертикальные силы, действующие на правую и левую рельсовые нити измерительного участка от колес. Выполнялась

регистрация вертикальных перемещений и боковых отжатий рельсов одновременно с регистрацией вертикальных сил, действующих на рельсы со стороны подвижного состава.

Перед каждым циклом испытаний под грузовой вагон подкатывались колесные пары (КП) с дефектами в виде ползунов, наваров, неравномерного проката с



Рис. 2. Общий вид измерительного участка для исследования ударных сил взаимодействия колес с дефектами и рельсов
 Fig. 2. General view of the measuring section for research of impact forces interaction of the wheels and rails with defects



Рис. 3. Общий вид установки датчиков перемещений для регистрации вертикальных и горизонтальных перемещений рельса
 Fig. 3. General view of the installation of motion sensors for vertical and horizontal displacements of the rail

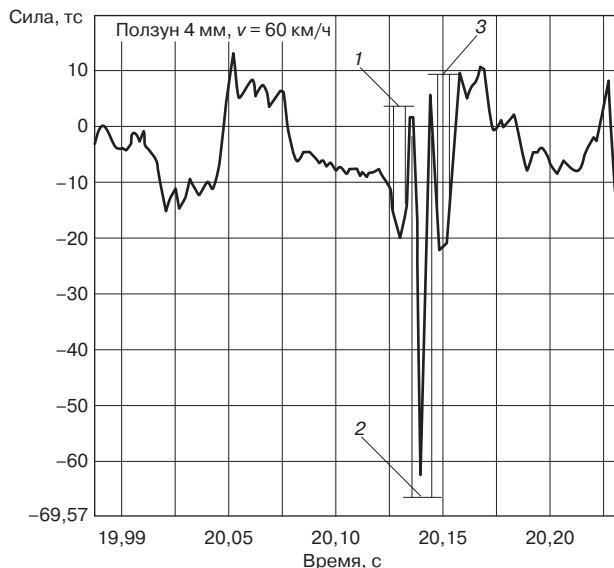


Рис. 4. Характер изменения динамической силы при взаимодействии колеса с ползуном и рельса:

1 — фаза обезгруживания колеса; 2 — фаза импульсного изменения вертикальной силы при взаимодействии ползуна с рельсом; 3 — фаза последодействия

Fig. 4. Nature of changes of dynamic forces at interaction of the flat wheel and the rail:

1 — phase of wheel unloading; 2 — phase of impulse change of the vertical force when the flat interacts with the rail; 3 — aftereffect phase

размерами $h = 1, 2, 3, 4$ мм. Исследования выполнялись при проезде груженого и порожнего грузового вагона, имеющего колеса с разными типами дефектов (ползун, навар, неравномерный прокат) и разными геометрическими параметрами, по измерительному участку со скоростью 30 км/ч, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч прямым и обратным ходом. Для каждой скорости движения опытного поезда заезды проводились в каждом направлении не менее 5 раз.

Динамические силы при взаимодействии колес с дефектами и рельсом. Ползун на поверхности катания колеса — плоское место, возникающее при движении по рельсу заклиненного колеса. В первое время после образования ползуна, когда края его имеют четко ограниченные ребра, траектория движения центра тяжести колеса имеет резкий перелом в середине неровности. При движении вагона происходит закатка острых граней и изменение формы ползуна. Это определяет видоизменения процессов взаимодействия колеса с рельсом. Характерный процесс изменения динамической силы при взаимодействии ползуна с рельсом показан на рис. 4.

Для процесса взаимодействия колеса с ползуном имеется ряд характерных участков (фаз):

- фаза обезгруживания колеса, наблюдается в момент поворота колеса относительно края ползуна до момента его контакта с рельсом и характеризуется опусканием центра тяжести колеса на глубину ползуна. Время обезгруживания колеса составляло

$t_{об} = 0,005...0,008$ с в зависимости от скорости движения и величины ползуна;

- фаза взаимодействия ползуна с рельсом, характеризующаяся импульсным повышением ударной силы. Наблюдается в интервале времени $t_{уд} = 0,003...0,005$ с;

- фаза снижения ударной нагрузки. После достижения максимального значения вертикальная сила снижается. Время спада нагрузки $t_{сп} = 0,008...0,015$ с;

- фаза затухания колебательного процесса, характеризуется восстановлением стабильной статической вертикальной нагрузки. Время затухания колебательного процесса находится в пределах $t_z = 0,015...0,02$ с.

Временные интервалы и амплитудные значения вертикальных нагрузок определялись размером и формой ползуна, скоростью движения, жесткостью подрельсового основания, статической нагрузкой на колесо с ползуном. Это позволяет идентифицировать ползун по характерным фазам как тип дефекта.

Для разных глубин ползуну установлены зависимости ударных сил от размера ползуна и скорости движения для груженого вагона при летнем состоянии пути. Результаты представлены на рис. 5.

Анализ изменения ударных сил от скорости движения при наличии дефекта типа ползун на поверхности катания колеса показал:

- ударные силы интенсивно возрастают при скорости движения до $v = 30...50$ км/ч, достигают максимальных уровней в диапазоне скоростей 50–70 км/ч, а затем несколько снижаются при дальнейшем повышении скорости движения;

- при одинаковых режимах движения и повторных проездах характерен значительный разброс значений ударных сил, что связано с различием условий взаимодействия колеса с рельсом из-за извилистого движения колеса;

- опытные данные по ударным силам с наиболее высокой степенью достоверности аппроксимируются полиномиальным законом с приведенными на графиках коэффициентами.

Дефект в виде «наvara» представляет собой наплыв металла на поверхности катания колеса, форма которого близка к синусоидальной. Навары могут иметь длину от десятков до сотен миллиметров и высоту до 3–5 мм. Характерный процесс взаимодействия колеса с «наваром» и рельсом показан на рис. 6.

Процесс изменения динамической силы при взаимодействии колеса, имеющего дефект типа навар, с рельсом имеет два пиковых повышения вертикальной нагрузки, между которыми наблюдается период обезгруживания колеса. Первое пиковое повышение нагрузки определяется ударным взаимодействием края полки наvara с рельсом в момент наезда и имеет более высокие значения. Второе пиковое повышение нагрузки возникает после обкатывания полки наvara и характеризует ударное взаимодействие в период съезда

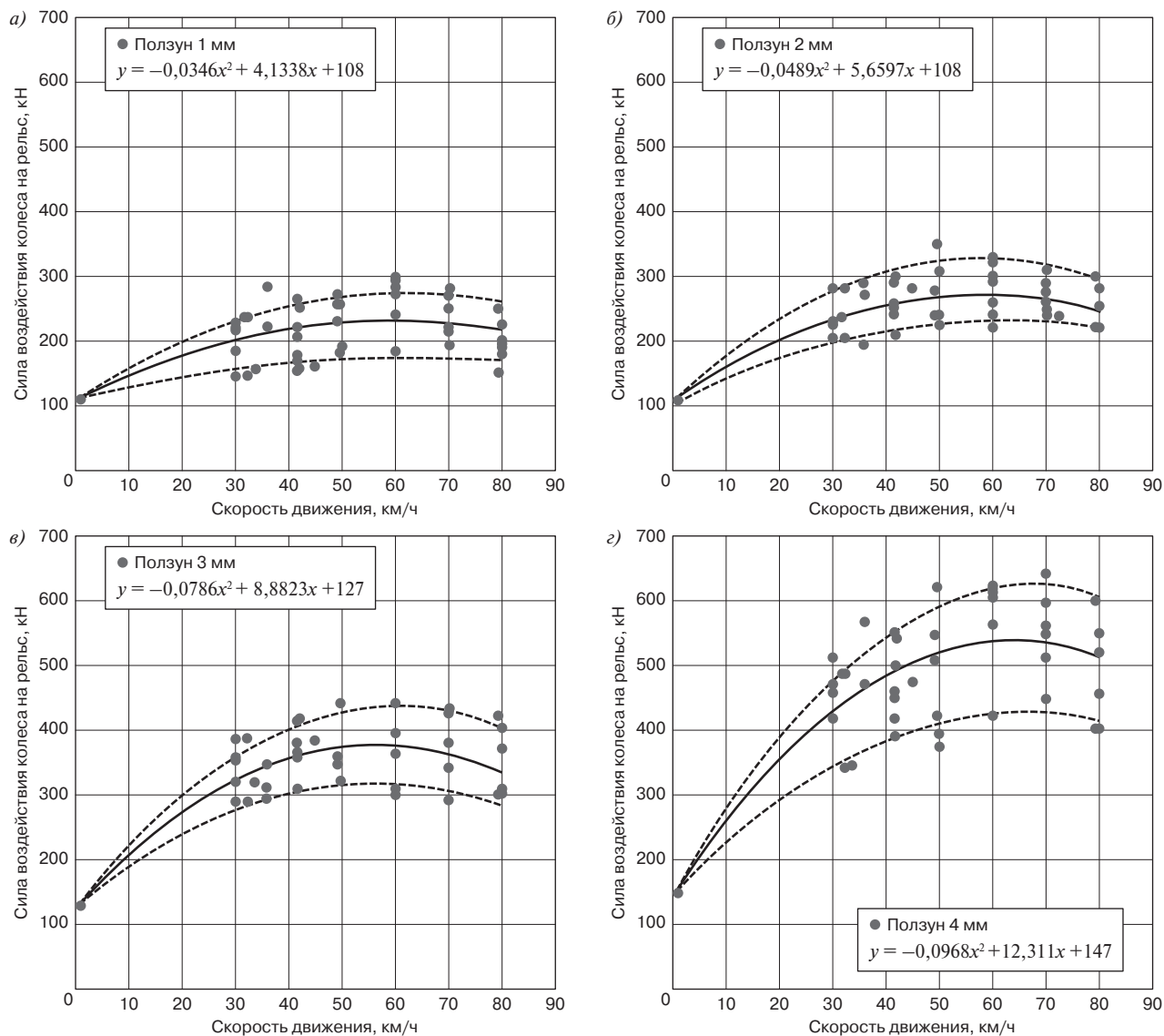


Рис. 5. Величины и характер изменения ударных сил взаимодействия колес с ползунами глубиной h и рельсом от скорости движения:

$a - h = 1$ мм; $б - h = 2$ мм; $в - h = 3$ мм; $з - h = 4$ мм

Fig. 5. The values and behavior of the impact forces of the wheel interaction with the flats of h depth and rail from the speed:

$a - h = 1$ мм; $б - h = 2$ мм; $в - h = 3$ мм; $з - h = 4$ мм

с навара. В зависимости от скорости движения продолжительность действия первого импульса составляла 0,001–0,003 с. Второй импульс вертикальной нагрузки наблюдался через 0,01–0,015 с, по амплитуде он ниже первого импульса в 1,5–1,8 раза. На рис. 7 показаны зависимости ударных сил от скорости движения при наличии наваров на поверхности катания колеса.

Анализ изменения ударных сил от скорости движения при дефектах в виде навара на поверхности катания колеса показал:

- ударные силы возрастают с повышением скорости движения;
- при одинаковых режимах движения и повторных проездах характерен значительный разброс значений ударных сил;

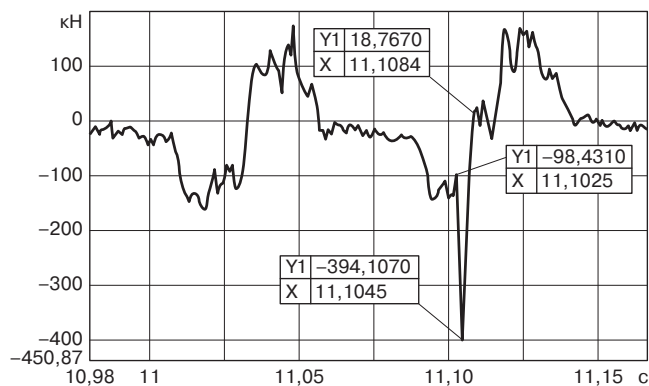


Рис. 6. Характер изменения динамической силы при взаимодействии колеса с «наваром»

Fig. 6. The nature of change of dynamic force when wheels interacting with the “weld-on”

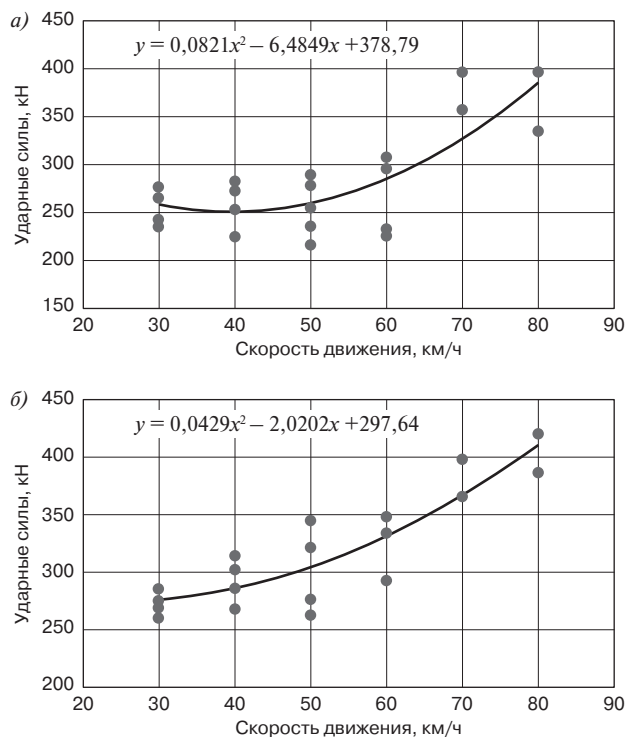


Рис. 7. Характер изменения ударных сил взаимодействия колес с наварями глубиной h и рельсом от скорости движения: а — 2 мм; б — 3 мм

Fig. 7. Nature of change of impact forces of wheel interaction with weld-on of h depth and the rail from the speed: а — 2 mm; б — 3 mm

• опытные данные по ударным силам с наиболее высокой степенью достоверности аппроксимируются полиномиальным законом с приведенными на графиках коэффициентами.

В процессе эксплуатации вагонов, особенно в зимнее время, появляется неравномерный износ поверхности катания колес. Обычно он возникает на колесах с большим общим прокатом и появляется вследствие закатки небольших ползунов, а также неоднородности структуры и термообработки металла обода колес.

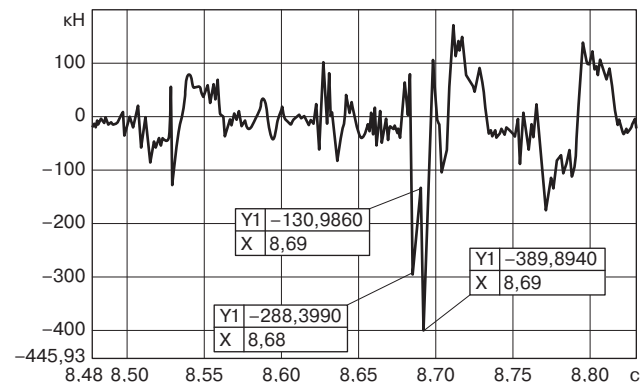
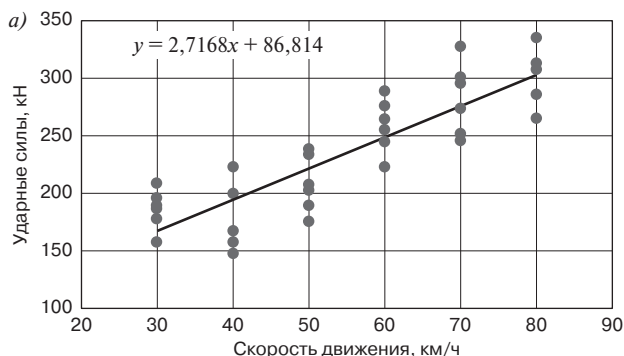


Рис. 8. Характер изменения динамической силы при взаимодействии колеса с неравномерным прокатом
Fig. 8. Nature of change of dynamic force when wheel interacting with uneven rolling

Неравномерный прокат представляет местные одиночные или волнообразные неровности, при этом преобладают в основном волнообразные. У некоторых колес эти неровности распространяются по всей длине окружности, а у других — на части ее длины, что определяет разнообразие форм динамических процессов. Ниже рассмотрены динамические процессы, зафиксированные при неравномерном прокате, реализованном на колесе грузового вагона по рекомендациям специалистов ОАО «ВНИИЖТ» и представляющем собой косинусоидальную впадину максимальной глубиной $h = 4$ мм и длиной 500 мм. Процесс взаимодействия колеса с неравномерным прокатом с рельсом показан на рис. 8.

Динамический процесс взаимодействия неравномерного проката с рельсом представляет два пиковых повышения вертикальной нагрузки, между которыми наблюдается период обезгруживания колеса. На рис. 9 представлены зависимости максимальных значений ударных сил при дефектах в виде неравномерного проката от скорости движения.

Динамические процессы в рельсе при ударном взаимодействии колес. Характерные динамические процессы,

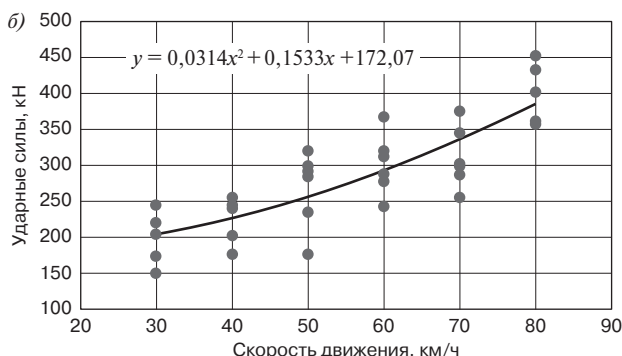


Рис. 9. Характер изменения максимальных ударных нагрузок при взаимодействии колеса с неравномерным прокатом и рельса от скорости движения:

а — неравномерный прокат $h = 2$ мм; б — неравномерный прокат $h = 4$ мм

Fig. 9. Nature of change of maximum impact loads when the wheel interacting with uneven rolling and rail from the speed: а — uneven rolling $h = 2$ mm; б — uneven rolling $h = 4$ mm

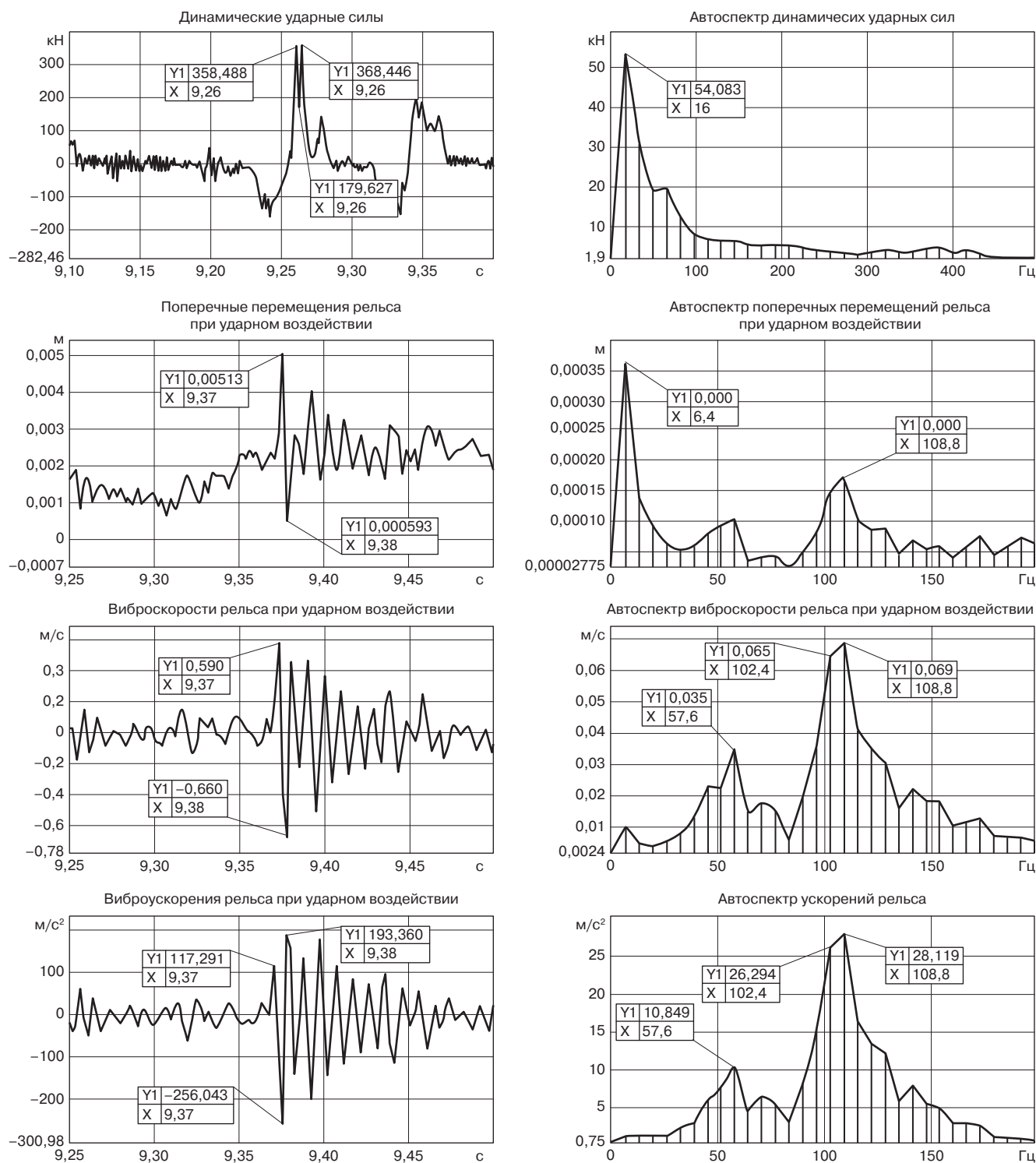


Рис. 10. Динамические процессы в рельсе в вертикальном направлении при ударном взаимодействии колеса с неравномерным прокатом $h = 4$ мм. Вагон-цистерна — груженная

Fig. 10. Dynamic processes in the rail in the vertical direction under impact interactions of wheel with uneven rolling with $h = 4$ mm. Loaded tank car

возникающие в рельсе при ударном взаимодействии колеса с неравномерным прокатом глубиной $h = 4$ мм при движении грузового вагона, представлены на рис. 10.

Процесс взаимодействия колеса с неравномерным прокатом, представляющий косинусоидальную впадину максимальной глубиной $h = 4$ мм и длиной 500 мм, с рельсом характеризуется двумя пиками

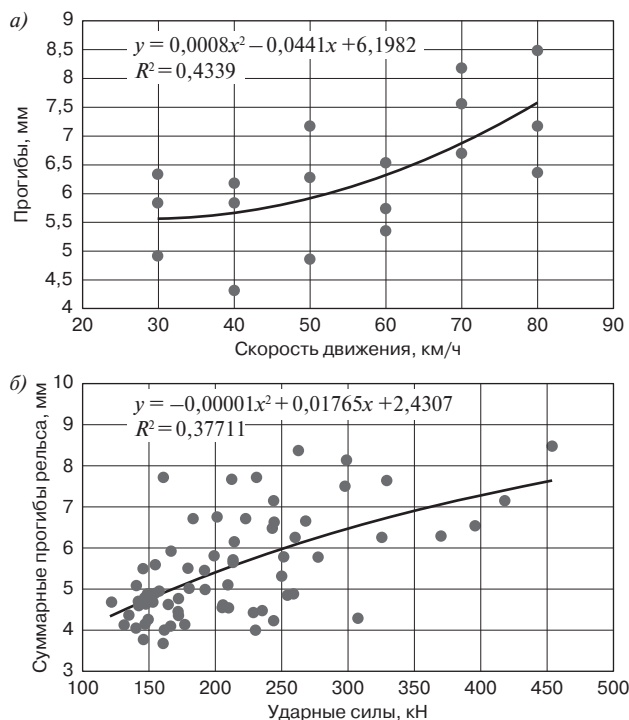


Рис. 11. Характер изменения суммарных прогибов рельса от скорости движения (а), значений ударных сил (б)
Fig. 11. The nature of change in the total deflections of the rail from the speed (а), from the impact forces values (б)

нагрузки. Для рассматриваемого случая величина первого ударного импульса имела значение 358 кН, второго $P_{уд}^2 = 366$ кН со снижением силы между пиками до $P_{уд}^{1-2} = 179,6$ кН. Максимальные амплитуды гармонических составляющих спектра приходятся на частоту $f_0 = 16$ Гц. Сплошной спектр гармонических составляющих ударного взаимодействия характеризуется снижением амплитуд гармоник при повышении частоты. При частотах $f > 100$ Гц значения амплитуд гармонических составляющих колебательного процесса не превышают 5–6 кН.

Ударное взаимодействие вызывает импульсный прогиб рельса с начальными амплитудами от $A_{пр}^1 = 5,1$ мм до $A_{пр}^2 = -5,93$ мм. После импульсного прогиба в рельсе развивается затухающий гармонический процесс. В спектре колебаний рельса имеют место усиления амплитуд гармонических составляющих при частотах $f_1 = 6,4$ Гц, $f_2 = 50...60$ Гц, $f_3 = 100...110$ Гц.

Виброскорости v_p и вертикальные виброускорения W_p изменялись аналогично поперечным вертикальным перемещениям рельса. Процессы имели затухающий характер со временем затухания колебаний $t_{зат} = 0,1...0,12$ с, совершая 10–12 колебаний. В спектрах скоростей и ускорений наблюдается усиление гармонических составляющих на частотах $f_1 = 57,6$ Гц и $f_2 = 100...110$ Гц. Пиковые амплитуды виброскоростей в момент удара достигали $v_{рв}^{max} = 0,59$ м/с, при движении вниз $v_{рн}^{max} = -0,66$ м/с.

Пиковые амплитуды ускорений в момент удара достигали $W_{рл}^{max} = 193$ м/с², $W_{р2}^{max} = -256$ м/с².

На рис. 11 показана зависимость суммарных прогибов рельса от скорости движения и величин ударных сил. (Под суммарным прогибом понимается деформация подошвы рельса относительно неподвижной сваики, включающая деформацию рельса, упругой рельсовой прокладки и подрельсового основания.) Из графика видно, что зависимости прогибов от скорости и величин ударных сил описываются полиномиальными зависимостями с тенденциями к снижению прироста величины прогиба при повышении величин ударных сил. Это подтверждает влияние на деформационные процессы нелинейного характера жесткостей упругих подрельсовых прокладок и подшпального основания. Максимальные суммарные прогибы достигали 8–9 мм при значениях ударных сил $P_{уд} = 400...450$ кН. Наблюдался существенный разброс прогибов рельса при близких значениях ударных сил.

Анализ прогибов рельсов от действия ударных сил показал:

- характерен существенный разброс суммарных прогибов рельсов при воздействии близких по значениям ударных сил. Это определяется разным положением места взаимодействия дефекта и рельса — над шпалой, ближе к центру между шпалами, ближе к краю шпалы, т. е. разными жесткостными параметрами подрельсового основания в зоне ударного взаимодействия;
- имеется тенденция к снижению суммарных прогибов рельсов с повышением значений ударных сил, что может быть объяснено нелинейными параметрами жесткости упругих рельсовых прокладок и подшпального основания.

Для случая порожнего вагона характер взаимодействия и динамические процессы в рельсах имели некоторые особенности. Процесс взаимодействия колеса с неравномерным прокатом и рельса при движении порожнего вагона представлен на рис. 12.

Из графиков видно, что при снижении статической нагрузки на колесо с $P_{ст}^k = 115$ кН до $P_{ст}^k = 35$ кН уровни ударной силы для конкретного рассматриваемого случая снизились с 366 до 207 кН (приблизительно на 43%), хотя колесная нагрузка уменьшилась почти в 3,3 раза. Это может быть объяснено, с одной стороны, большим коэффициентом динамичности порожних вагонов, когда отношение $\frac{P_{уд}^k}{P_{ст}^k} = K_g^{пор}$ составляет 6, а для груженого вагона $\frac{P_{уд}^k}{P_{ст}^k} = \frac{366}{115} \approx 3,2$.

Другим фактором является значительный разброс ударных сил при одинаковых режимах движения, что связано с извилистым движением колесных пар, разными углами набегания и другими условиями взаимодействия колеса и рельса.

Спектр ударного процесса взаимодействия колеса с дефектом и рельса для порожнего вагона имеет более широкий частотный диапазон, чем для груженого вагона, — до 320 Гц. Пик амплитуд гармонических составляющих сместился с $f_0 = 16$ Гц для груженого вагона до $f_0 = 64$ Гц для порожнего вагона. При данной частоте амплитуда гармонической составляющей имела значение $P_{f=64}^{yl} = 26,4$ кН, наблюдается усиление высокочастотных составляющих гармоник в диапазоне 160–220 Гц с

амплитудами $P_{f=160}^{yl} = 10$ кН. Ударный импульс определил увеличение суммарного прогиба рельса до 5 мм. В спектре колебаний рельса имеют место усиления амплитуд гармонических составляющих вертикальных перемещений рельса на частотах $f_0 = 6,4$ Гц и $f_i = 102,4$ Гц.

Виброскорости v_p и виброускорения по характеру аналогичны процессам для груженого вагона. Пиковые значения виброскорости рельса в момент удара достигали $v_{pv}^{max} = 0,71$ м/с, $v_{ph}^{max} = -0,87$ м/с. В

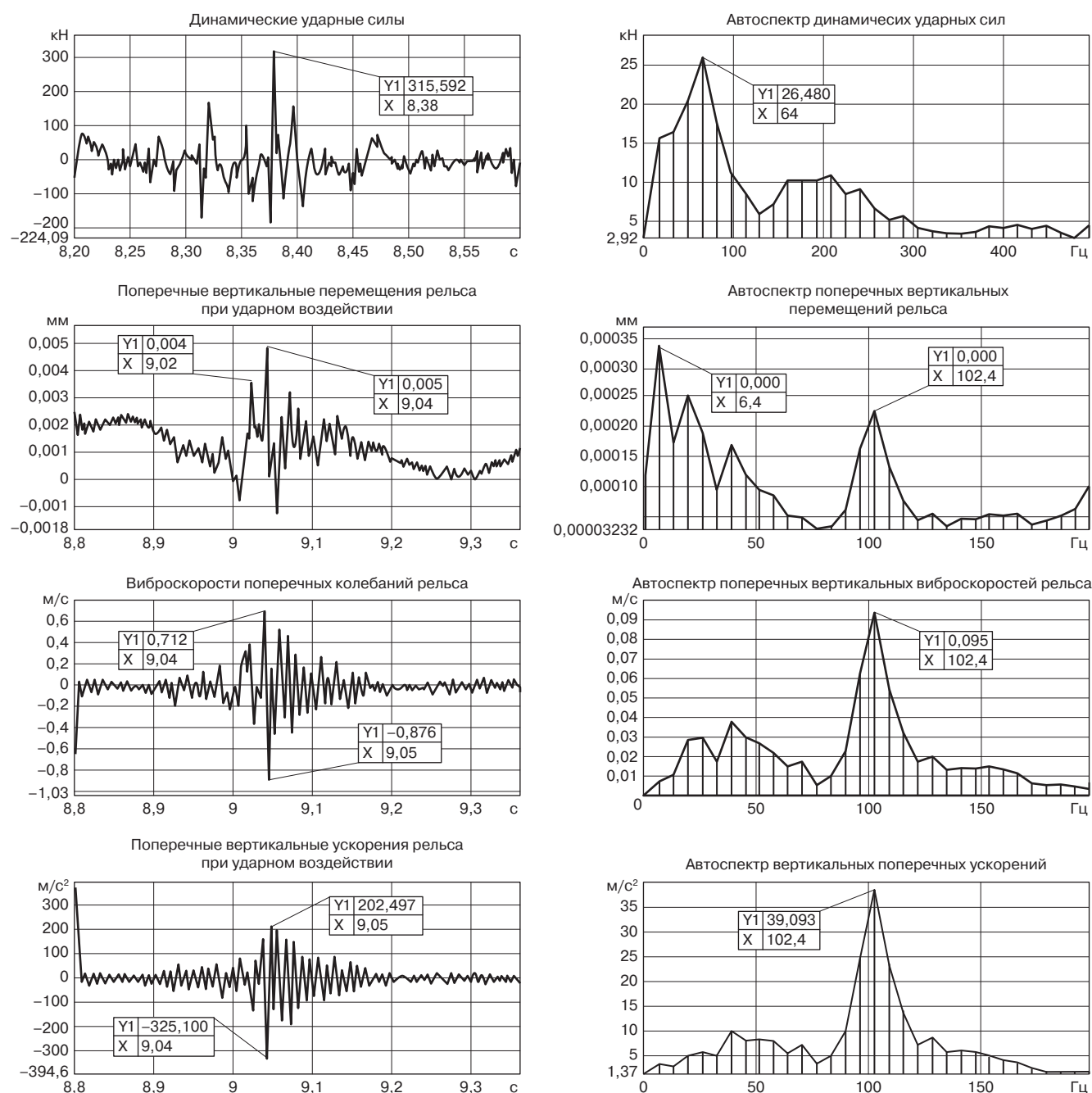


Рис. 12. Динамические процессы в рельсе в вертикальном направлении при ударном взаимодействии колеса с неравномерным прокатом $h = 4$ мм. Вагон-цистерна — порожняя

Fig. 12. Dynamic processes in the rail in the vertical direction under impact interactions of wheel with uneven rolling with $h = 4$ mm. Empty tank car

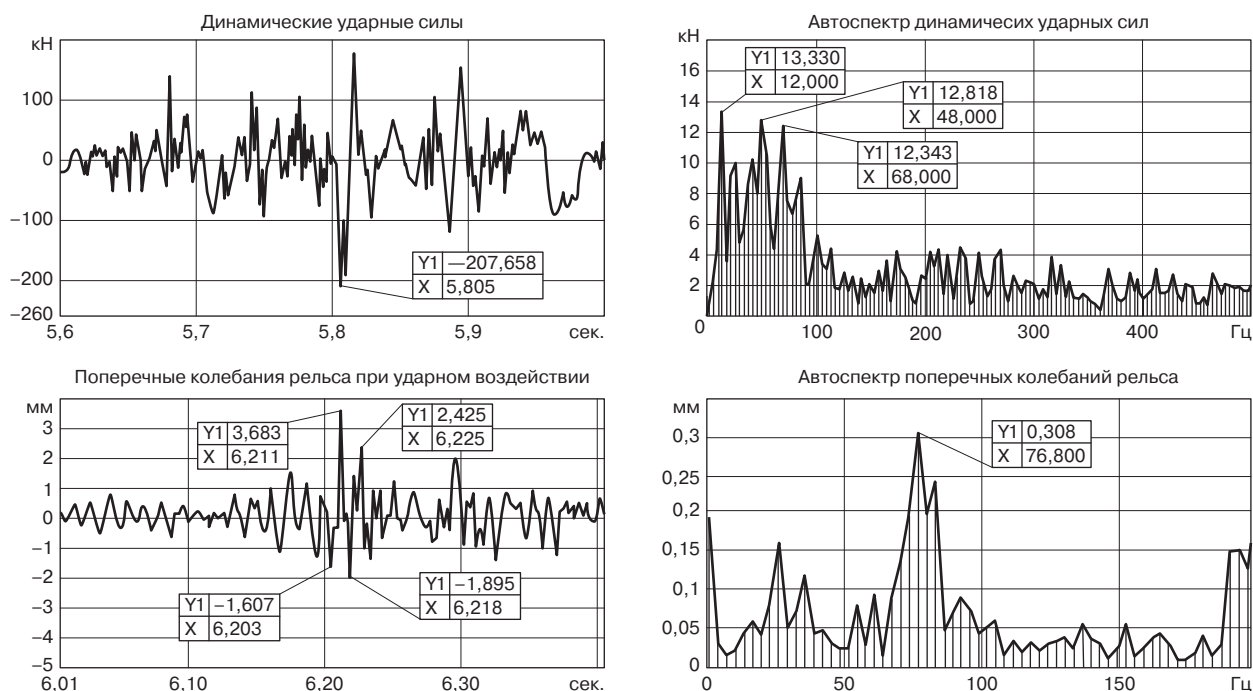


Рис. 13. Динамические процессы в рельсе в горизонтальном поперечном направлении при ударном взаимодействии колеса с неравномерным прокатом $h = 4$ мм. Вагон-цистерна — груженная

Fig. 13. Dynamic processes in the rail in the horizontal transverse direction under impact interaction of wheels with uneven rolling with $h = 4$ mm. Loaded tank car

спектре ускорений наблюдалось усиление амплитуд гармонических составляющих частот $f_i = 102,4$ Гц.

Пиковые значения ускорений рельса в момент удара достигали $W_{\text{рв}}^{\text{max}} = 202$ м/с², $W_{\text{рн}}^{\text{max}} = -325$ м/с². Процессы носили затухающий характер, колебания виброускорений и виброускорений загасали в течение $t = 1...1,2$ с.

При ударном взаимодействии колес с дефектами и рельсов колебательный процесс в рельсах развивается не только в вертикальном, но и в горизонтальном поперечном направлении.

На рис. 13 представлены динамические процессы в рельсе в поперечном горизонтальном направлении при ударном взаимодействии с рельсом колеса неравномерного проката глубиной 4 мм порожнего вагона-цистерны, движущейся со скоростью $v = 80$ км/ч.

Ударный импульс имеет два пика: максимальный пик имел значение $P_{\text{уд}}^1 = 207$ кН со снижением усилия до $P_{\text{уд}}^{1-2} = 10$ кН между пиками; значение второго пика $P_{\text{уд}}^2 = 191$ кН. Процесс колебаний широкополосный.

Наблюдаются усиления амплитуд гармонических составляющих на частотах $f_i = 12; 48; 68$ Гц до значений 12,3 – 13,3 кН.

В момент удара максимальная амплитуда поперечного перемещения рельса достигала $A = 3,7$ мм. Процесс носил затухающий характер с периодом затухания 0,17 с. В спектре имело место усиление амплитуд гармонических составляющих на частотах $f_0 = 25$ Гц, $f_i = 76$ Гц. Таким образом, ударное взаимодействие

колес с рельсами инициирует прогибы рельсов как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях с развитием затухающих колебательных процессов.

Заключение. В результате выполненных экспериментальных исследований сил взаимодействия колес с дефектами на поверхности катания в виде ползунов, наваров, неравномерного проката с рельсами железнодорожного пути установлено:

1. Динамические процессы взаимодействия колес с такими дефектами, как ползун, навар, неравномерный прокат, имеют характерные форму и фазы, определяемые геометрической формой дефектов.
2. Получены фактические значения ударных сил от типа дефекта, его геометрических размеров, скорости движения, величины колесной нагрузки.
3. Для всех рассмотренных типов дефектов характерен значительный разброс уровней ударных сил при одинаковых режимах движения (скорость, направление), что связано с извилистым характером движения колесной пары, определяющим различия в условиях взаимодействия колеса и рельса.
4. Динамические ударные нагрузки инициируют импульсный суммарный прогиб рельса в вертикальном направлении и его горизонтальное поперечное перемещение. Значения суммарных вертикальных прогибов достигали 8 – 9 мм при значениях ударных сил 400 – 450 кН, что 3,5 – 4 раза больше, чем при квазистатическом движении подвижного состава.

5. Динамический ударный импульс возбуждал затухающие колебательные процессы в вертикальном и горизонтальном направлениях со временем затухания 0,1 – 0,12 с. Уровни вертикальных ускорений в рельсах при ударных силах 400 – 450 кН достигали 191 – 258 м/с². В спектрах вертикальных колебаний доминировали колебания с частотой 6,4; 50 – 60; 90 – 110 Гц. Наличие высокочастотных составляющих связано с возбуждением вертикальных колебаний рельсошпальной решетки. В процессе ударного взаимодействия в поперечном направлении также развивались колебания рельсошпальной решетки с частотами 25, 75 – 80 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Н.П. Напряжения в рельсах от вертикальных давлений катящихся колес. Влияние скорости и неправильного вида колес // Записки Русского технического общества. Санкт-Петербург, 1907. 120 с.
2. Холодецкий А.А. К вопросу о влиянии скорости и неправильного вида колеса на динамические прогибы рельсов. М., 1915. 93 с.
3. Митюшин Н.Т. Влияние выбоин на динамические напряжения в рельсах // Труды МИИТ. Вып. 22. М.: Трансжелдориздат, 1932. С. 35 – 51.
4. Крачковский В.П. Динамическое воздействие нагрузки на железнодорожный путь // Расчеты железнодорожного пути: труды МИИТ. Вып. 54. М.: Трансжелдориздат, 1937. С. 42 – 217.
5. Шахунянц Г.М. Расчеты верхнего строения пути. М.: Трансжелдориздат, 1959. 264 с.
6. Мищенко К.Н. Устройство железнодорожного пути. Т. III, глава V, § 19. М.: Трансжелдориздат, 1944. С. 411 – 421.
7. Попов А.А. К вопросу о динамическом воздействии колеса на рельс при прохождении неровностей пути // Труды ЦНИИ МПС. Вып. 3. М.: Трансжелдориздат, 1949. С. 155 – 186.
8. Королёв К.П. Вписывание паровозов в кривые участки пути // Труды ЦНИИ МПС. Вып. 37. М.: Трансжелдориздат, 1950. 224 с.
9. Данилов В.Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка // Труды ВНИИЖТ. Вып. 70. М.: Трансжелдориздат, 1952. 113 с.
10. Вериго М.Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава // Взаимодействие пути

и подвижного состава и вопросы расчетов пути: труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта, вып. 97. М.: Транспорт, 1955. С. 25 – 288.

11. Вериго М.Ф., Коган А.Я. К вопросу о процессах взаимодействия необрессоренных масс и пути // Вестник ВНИИЖТ. 1969. № 6. С. 22 – 25.

12. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с.

13. Тимошенко С.П. О динамических напряжениях в рельсах // Отдельный оттиск из «Вестника инженера» за 1915. № 4. С. 143 – 152.

14. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: Транспорт, 1997. 326 с.

15. Коган А.Я., Пейч Ю.Л. Расчет нестационарного напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 2. С. 31 – 39.

16. Коган А.Я., Никитин Д.А., Полещук И.В. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса. М.: Интекст, 2007. 168 с.

17. Коган А.Я. Воздействие на путь поездов, имеющих в своем составе вагоны с ползунами на колесных парах // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 3. С. 3 – 7.

18. Kovalev, R., Lysikov, N., Mikheev G., Pogorelov, D., Simonov, V., Yazykov, V., Zakharov, S., Zharov, I., Goryacheva, I., Soshenkov, S., Torskaya, E., Freight car models and their computer-aided dynamic analysis. Multibody System Dynamics. 2010. Vol. 22 (4), 399 – 423.

19. Кудрявцев Н.Н. Исследование динамики необрессоренных масс вагонов // Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта. Вып. 97. М.: Транспорт, 1965. 168 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КРАСНОВ Олег Геннадьевич,

канд. техн. наук, заведующий отделом «Путь и специальный подвижной состав», АО «ВНИКТИ»

БОГДАНОВ Олег Константинович,

канд. техн. наук, ведущий инженер, лаборатория «Эксплуатационные испытания отдела пути и специального подвижного состава», АО «ВНИКТИ»

АКАШЕВ Михаил Геннадьевич,

инженер, лаборатория «Эксплуатационные испытания отдела пути и специального подвижного состава», АО «ВНИКТИ»

Статья поступила в редакцию 23.05.2016 г. актуализирована 28.08.2016 г., принята к публикации 5.09.2016 г.

Dynamic forces and processes in the rails under impact interaction of wheels with defects

O. G. KRASNOV, O. K. BOGDANOV, M. G. AKASHEV

Joint Stock Company "Research Design and Technological Institute of Rolling Stock" (JSC "VNIKT"), Kolomna, 140402, Russia

Abstract. The paper presents the main results of comprehensive experimental studies on the determination of regularities of dynamic processes and actual values of the forces of interaction of wheels with defects on rolling surface and rails on the modern designs of the track, carried out at the experimental section of railway track.

It was determined experimentally that: dynamic processes of interaction of wheels with defects such as flats, weld-on, uneven rolling have specific shape and phase marked by the geometrical shape of defects;

dependencies on impact forces to the flat-type defects were approximated by a polynomial function with the highest levels of forces in the speed range of 50 – 70 km/h. For defects such as weld-on or uneven rolling marked by impact forces with increasing speed;

all the above types of defects are marked by considerable variation of levels of impact forces for the same modes of running (speed, direction), which is connected with meandering nature of the movement of wheelset, determining differences in the interaction of wheel and rail;

dynamic impact loads initiate pulsed total deflection of rail in the vertical direction and the horizontal transverse motion. Values of total vertical deflection reach 8–9 mm for the values of impact forces of 400–450 kN that is 3.5–4 times more than the quasi-static motion of rolling stock;

dynamic impact impulse excites damped oscillatory processes in vertical and horizontal directions with decay time 0.1–0.12 seconds. The levels of vertical acceleration in the rails with impact forces of 400–450 kN reached 191–258 m/s. The spectrums of vertical oscillations dominated oscillations with a frequency of 6.4, 50–60, 90–110 Hz. The presence of high-frequency components is connected to the excitation of vertical vibrations of the rail-sleeper network. In the process of impact interaction rail oscillations with frequencies of 25, 75–80 Hz also developed laterally.

Keywords: impact forces; dynamic processes; wheel defects; total rail deflection; spectrum; frequency; acceleration

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-354-364>

REFERENCES

1. Petrov N. P. *Napryazheniya v rel'sakh ot vertikal'nykh davleniy katyashchikh koles. Vliyanie skorosti i nepravil'nogo vida koles* [Stresses in the rails from vertical pressure of rolling wheels. The impact of speed and the wrong shape of wheels]. *Zapiski Russkogo tekhnicheskogo obshchestva* [Notes of the Russian Technical Society]. Saint-Petersburg, 1907, 120 p.
2. Kholodetskiy A. A. *K voprosu o vliyaniiskorosti i nepravil'nogo vida kolesa na dinamicheskie progiby rel'sov* [On the effect of the speed and the wrong kind of wheels on the dynamic deflections of rails]. Moscow, 1915, 93 p.
3. Mityushin N. T. *Vliyanie vyboin na dinamicheskie napryazheniya v rel'sakh* [Effect of corrugations on the dynamic stresses in the rails]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1932, no. 32, pp. 35–51.
4. Krachkovskiy V. P. *Dinamicheskoe vozdeystvie nagruzki na zheleznodorozhnyy put'* [Dynamic impact of load on the railway track]. *Raschety zheleznodorozhnogo puti. Trudy MIIT* [Calculations of railway track. Proceedings of MIIT]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1937, no. 54, pp. 42–217.
5. Shakhunyan G. M. *Raschety verkhnego stroeniya puti* [Calculations on railway track superstructure]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1959, 264 p.
6. Mishchenko K. N. *Ponyatie ob udarnom vozdeystvii* [The concept of impact action], G. M. Shakhunyan. *Ustroystvo zheleznodorozhnogo puti* [Structure of railway track], Vol. III, Chapter V, Par. 19. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1944, pp. 411–421.
7. Popov A. A. *K voprosu o dinamicheskom vozdeystvii kolesa na rel's pri prokhozhenii nerovnostey puti* [On the question of dynamic effects of the wheels on the rails when passing track irregularities]. *Trudy TsNII MPS* [Proceedings of TsNII MPS]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1949, no. 33, pp. 155–186.
8. Korolyov K. P. *Vpisyvanie parovozov v krivye uchastki puti* [Performance of steam locomotive in curves sections of track]. *Trudy TsNII MPS* [Proceedings of TsNII MPS]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1950, no. 37, 224 p.
9. Danilov V. N. *Raschet rel'sovoy niti v zone styka* [Calculation of the rail line in the junction area]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1952, no. 70, 113 p.
10. Verigo M. F. *Vertikal'nye sily, deystvuyushchie na put' pri prokhozhenii podvizhnogo sostava* [Vertical forces acting on the

track when rolling stock is passing]. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava i voprosy raschetov puti. Trudy Vsesoyuzn. nauch. issled. in-ta zh. d. transporta* [Interaction of track and rolling stock and issues of track calculations. Proc. of the All-Union Scientific Research Institute of Railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1955, no. 97, pp. 25–288.

11. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *K voprosu o protsessakh vzaimodeystviya neobressorenykh mass i puti* [On the question of the processes of interaction of unsprung masses]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1969, no. 6, pp. 22–25.

12. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of track and rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986, 560 p.

13. Timoshenko S. P. *O dinamicheskikh napryazheniyakh v rel'sakh* [About the dynamic stresses in the rails]. *Vestnik inzhenera*, 1915, no. 4, pp. 143–152.

14. Kogan A. Ya. *Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom* [Dynamics of the railway track and its interaction with rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1997, 326 p.

15. Kogan A. Ya., Peych Yu. L. *Raschet nestatsionarnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktivnykh puti v zone styka rel'sov* [Calculation of non-stationary stress-strain state of structural elements of railway track in the junction area of the rails]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2002, no. 2, pp. 31–39.

16. Kogan A. Ya., Nikitin D. A., Poleshchuk I. V. *Kolebaniya puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya ekipazhey i udarnom vzaimodeystvii kolesa i rel'sa* [Oscillations of track at high speeds of carriages and impact interaction of wheel and rail]. Moscow, Intext Publ., 2007, 168 p.

17. Kogan A. Ya. *Vozdeystvie na put' poezdov, imeyushchikh v svoem sostave vagonov s polzunami na kolesnykh parakh* [Impact on the railway track of trains, having in its composition carriages flats on wheelsets]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 3, pp. 3–7.

18. Kovalev R., Lysikov N., Mikheev G., Pogorelov D., Simonov V., Yazykov V., Zakharov S., Zharov I., Goryacheva I., Soshnikov S., Torskaya E., Freight car models and their computer-aided dynamic analysis. *Multibody System Dynamics*, 2010, Vol. 22 (4), pp. 399–423.

19. Kudryavtsev N. N. *Issledovanie dinamiki neobressorenykh mass vagonov* [Research of dynamics of unsprung masses of cars]. *Trudy Vsesoyuzn. nauch. issled. inst. zh. d. transporta* [Proc. of the All-Union Scientific Research Institute of Railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1965, no. 97, 168 p.

ABOUT THE AUTHORS

KRASNOV Oleg Gennad'evich,

Cand. Sci. (Eng.), Head of Department "Track and specialized rolling stock", JSC "VNIKT"

BOGDANOV Oleg Konstantinovich,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, Laboratory "Operational tests of Department of track and specialized rolling stock", JSC "VNIKT"

AKASHEV Mikhail Gennad'evich,

Engineer, Laboratory "Operational tests of Department of track and specialized rolling stock", JSC "VNIKT"

Received 23.05.2016,

Revised 28.08.2016,

Accepted 05.09.2016

■ E-mail: krasnovog@mail.ru (O. G. Krasnov)