



# Вибрационные процессы в балластном слое при нестационарных режимах нагружения



Олег КРАСНОВ  
Oleg G. KRASNOV

Олег БОГДАНОВ  
Oleg K. BOGDANOV



## Vibrational Processes in the Ballast Layer Under Non-Stationary Load Conditions

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 70)

**Представлены результаты исследований динамических и вибрационных процессов в балластном слое на глубине 100 и 200 мм ниже подошвы шпал при нестационарных режимах нагружения из-за ударного взаимодействия колёс, имеющих дефекты на поверхности катания в виде ползунов, и рельсов. Установлены зависимости величины виброускорений от значений ударной вертикальной нагрузки колёс с дефектами на рельс.**

**Ключевые слова:** железная дорога, железнодорожный путь, вибрационные процессы, нестационарное нагружение, ударные силы, ускорения, частицы щебня, слой балласта, дефекты колёс, поверхность катания, тензорезистор.

*Краснов Олег Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий отделом пути и специального подвижного состава акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Москва, Россия.*

*Богданов Олег Константинович – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории эксплуатационных испытаний отдела пути и специального подвижного состава АО «ВНИКТИ», Москва, Россия.*

Одной из причин интенсивного расстройств железнодорожного пути под поездной нагрузкой являются нестационарные режимы нагружения, возникающие при взаимодействии колёс и рельсов, которые имеют дефекты на поверхности катания. Известны экспериментальные и теоретические исследования процессов вибрационного воздействия на зернистые среды, в том числе щебёночный балласт железнодорожного пути [1–4].

В данной статье изложены результаты исследований динамических и вибрационных явлений, возникающих в зоне контакта колеса с рельсом и балластном слое при действии ударных сил от колёс с дефектами.

При действии ударных сил на рельсы в элементах верхнего строения пути, в том числе в балластном слое, возникают вибрационные и динамические процессы, которые приводят к снижению внутреннего трения между частицами балласта, обуславливают «вибротекучесть» зернистых сред и интенсифицируют осадки балластного слоя.

## УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

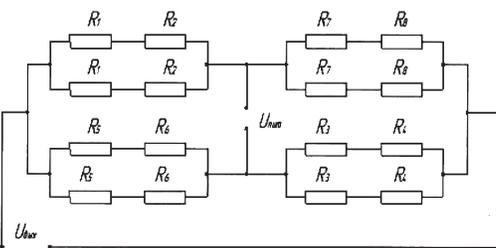
Для исследования вибрационных процессов балластного слоя при одновременном учёте вертикальных сил был выбран опытный участок на перегоне Голутвин—Озёры Московской железной дороги.

Характеристики участка представлены в таблице 1.

Для оценки сил взаимодействия колёс и рельсов обе рельсовые нити оборудовались шестью измерительными модулями, непрерывно регистрирующими вертикальные силы. На нейтральной оси каждого рельса с внутренней и наружной сторон было наклеено по 48 тензорезисторов, каждый на расстоянии 130 мм друг от друга.

Схема оборудования участка измерительными тензомодулями для регистрации вертикальных сил и общий вид опытного участка представлены на рис. 1 и 2.

Для получения количественных значений вибрационных полей, возникающих в балластном слое от величин ударных сил, были проведены измерения уровней ускорений в балластном слое. Для этого изготовлены имитаторы частиц



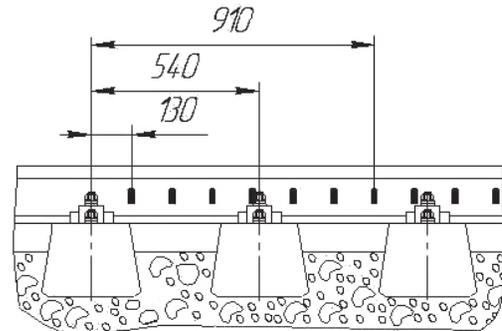
а)

Таблица 1  
Характеристика участка

Наименование показателя	Значение показателя
Путь	прямой, бесстыковой
Рельсы	Р65
Шпалы	железобетонные
Скрепления	КБ-65, нормально затянутые
Эпюра шпал	не менее 1840 шт. на 1 км
Балласт	щебень твёрдых пород, фракции от 25 до 60 мм
Подуклонка рельсов	от 1/20 до 1/22
Диапазон скоростей движения, км/ч	до 90

балласта — частицы неправильной формы, размером 50–70 мм из эпоксидной смолы, внутри которых устанавливались вибродатчики КД-35 во взаимно перпендикулярных направлениях. Датчики соединялись с виброусилителями, далее с измерительным комплексом МИС-026 (НПП «МЕРА»).

Имитаторы частиц щебня со встроенными вибродатчиками устанавливались в балласт на уровне  $100 \pm 10$  мм ниже подошвы шпалы и на глубине  $200 \pm 10$  мм и были



б)

Рис. 1. Схема измерительного модуля для непрерывной регистрации: а) вертикальных сил; б) расположения тензодатчиков на рельсе.



Рис. 2. Общий вид пути, оборудованного измерительными приборами для регистрации вертикальных сил.



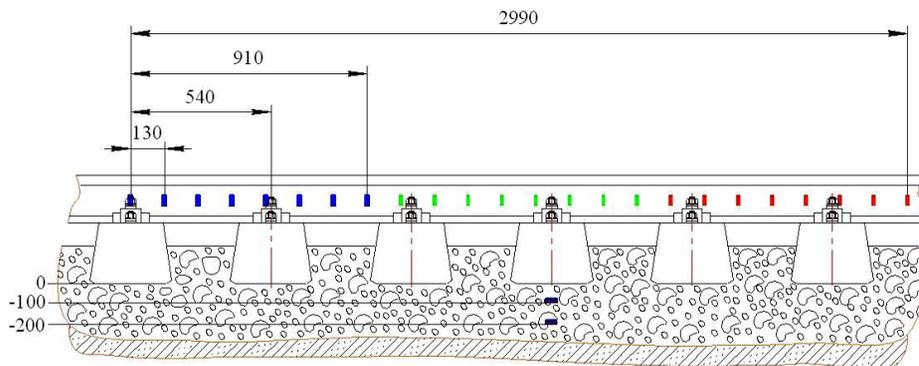


Рис. 3. Схема установки имитаторов частиц щебня с вибродатчиками.

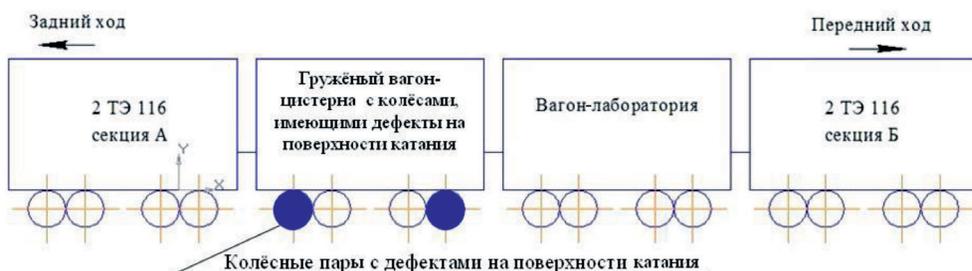


Рис. 4. Схема опытного поезда.

Таблица 2  
Геометрические параметры ползунов

Дефект	Геометрический параметр дефекта, мм	
	Глубина	Длина*
Ползун	1	64
	2	87
	3	101
	4	129

\*Длина хорды ползуна

ориентированы по вертикальной и горизонтальной продольной оси железнодорожного пути. При этом использовались три измерительных модуля для возможности позиционирования зон действия ударных сил.

Схема установки имитаторов частиц щебня представлена на рис. 3.

На время исследований формировалась плотка опытного поезда, включающего две секции локомотива 2ТЭ116, опытный вагон и вагон-лабораторию (рис. 4).

Измерение вибраций осуществлялось при проезде гружёного грузового вагона, имеющего колёса с дефектом в виде ползуна. Дефекты на поверхности катания колёсных пар выполняли на производственной площадке АО «ВНИКТИ».

Геометрические параметры ползунов приведены в таблице 2.

При испытаниях на левом колесе первой колёсной пары первой тележки формировалось два ползуна с глубиной 4 и 1 мм с разворотом на 180° друг относительно друга. На левом колесе четвёртой колёсной пары второй тележки аналогично формировались ползуны с глубиной 3 и 2 мм с расположением на диаметрально противоположных участках обода колеса. Такое расположение дефектных колёсных пар в передней и задней тележках грузового вагона позволяло рассматривать их как набегающие при движении в прямом или обратном направлениях (см. рис. 4).

Замеры выполнялись при проезде грузового вагона (цистерны) по измерительному участку со скоростями 30–80 км/ч с интервалом скорости 10 км/ч, прямым и обратным ходом. Для каждой скорости измерения проводились при заездах не менее пяти раз в каждом направлении. Перед испытаниями выполнялась тарировка измерительных каналов по вертикальным силам путём прокатывания опытного поезда по измерительному участку со скоростью 1–1,5 км/ч при известных значениях колёсных нагрузок.

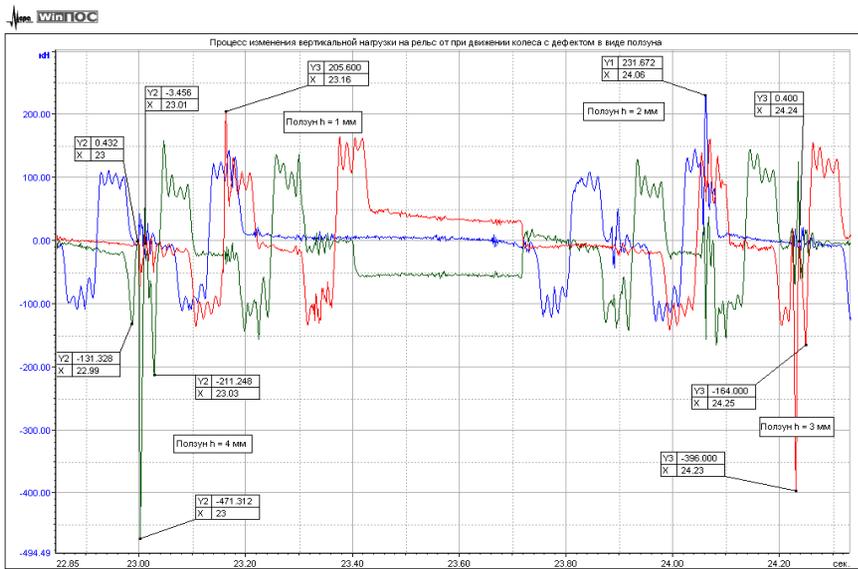


Рис. 5. Процесс воздействия колёс с дефектами в виде ползунов на рельс при скорости движения опытного поезда 32 км/ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Уровни вертикальных сил на рельсы.** В ходе исследований экспериментально определены силы взаимодействия имеющих дефекты колёс и железнодорожного пути в летних условиях эксплуатации.

На рис. 5 представлен типичный график процесса воздействия колёс с дефектами в виде ползунов на рельс при скорости движения 32 км/ч.

При взаимодействии колёс с ползунами глубиной 1, 2, 3 и 4 мм инициируется удар-

ный импульс, величина которого при проезде опытного вагона составила 206, 232, 396 и 471 кН соответственно.

Для процесса движения колеса с ползуном по рельсу характерно наличие периода обезгруживания колеса — с началом его поворота относительно края ползуна до момента контакта с рельсом, при котором инициируется ударный импульс. Для ползуна глубиной 4 мм длительность обезгруживания составила 0,0156 с, величина ударного импульса достигла значения

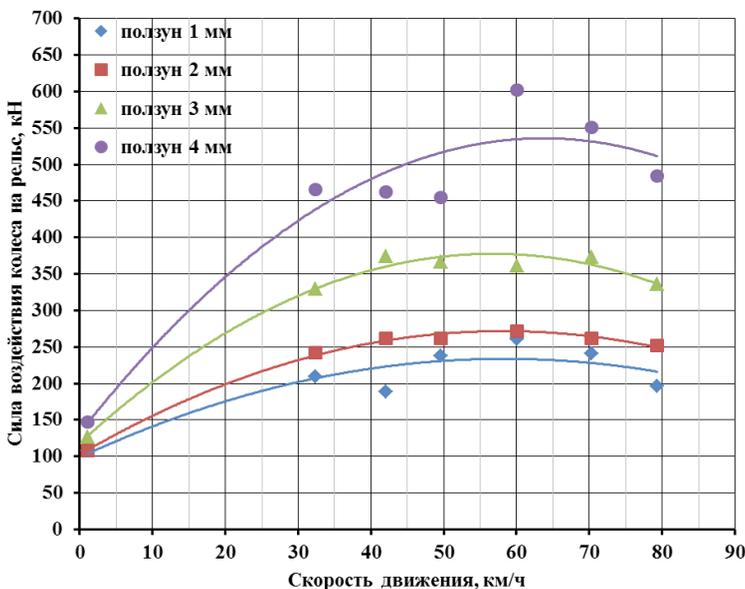


Рис. 6. Графики изменения ударной вертикальной нагрузки (среднее значение) на рельс от колеса с дефектом в зависимости от величины ползуна и скорости движения.



Значения средних и максимальных сил взаимодействия колёс с ползунами и железнодорожного пути для летних условий эксплуатации

Скорость движения подвижного состава V, км	Геометрические размеры ползуна, мм		Максимальное значение вертикальной силы, кН	Минимальное значение вертикальной силы, кН	Математическое ожидание сил взаимодействия колёс и рельсов пр., кН	Среднеквадратическое отклонение вертикальных ударных сил $\sigma$ , кН	Значение максимальных ударных сил $P_{\text{вер.}}^{\text{max}} = m_p + 3\sigma$ , кН
	глубина h	длина l					
1,1*	1	64			108		
	2	87			112		
	3	101			127		
	4	129			147		
32	1	64	284	145	210	43	338
	2	87	290	194	242	35	347
	3	101	386	290	330	32	426
	4	129	567	346	465	65	659
42	1	64	265	153	188	39	306
	2	87	300	210	261	31	355
	3	101	415	307	374	34	476
	4	129	550	392	463	52	620
49	1	64	271	191	237	35	343
	2	87	307	225	262	37	373
	3	101	440	320	366	52	522
	4	129	547	373	455	85	710
60	1	64	296	183	261	43	391
	2	87	320	220	272	38	387
	3	101	440	300	361	53	520
	4	129	622	563	602	23	672
70	1	64	271	193	241	32	336
	2	87	289	239	262	20	323
	3	101	431	292	373	58	548
	4	129	641	447	551	67	752
79	1	64	269	180	197	31	289
	2	87	280	220	252	30	342
	3	101	400	300	336	46	474
	4	129	550	400	484	51	638

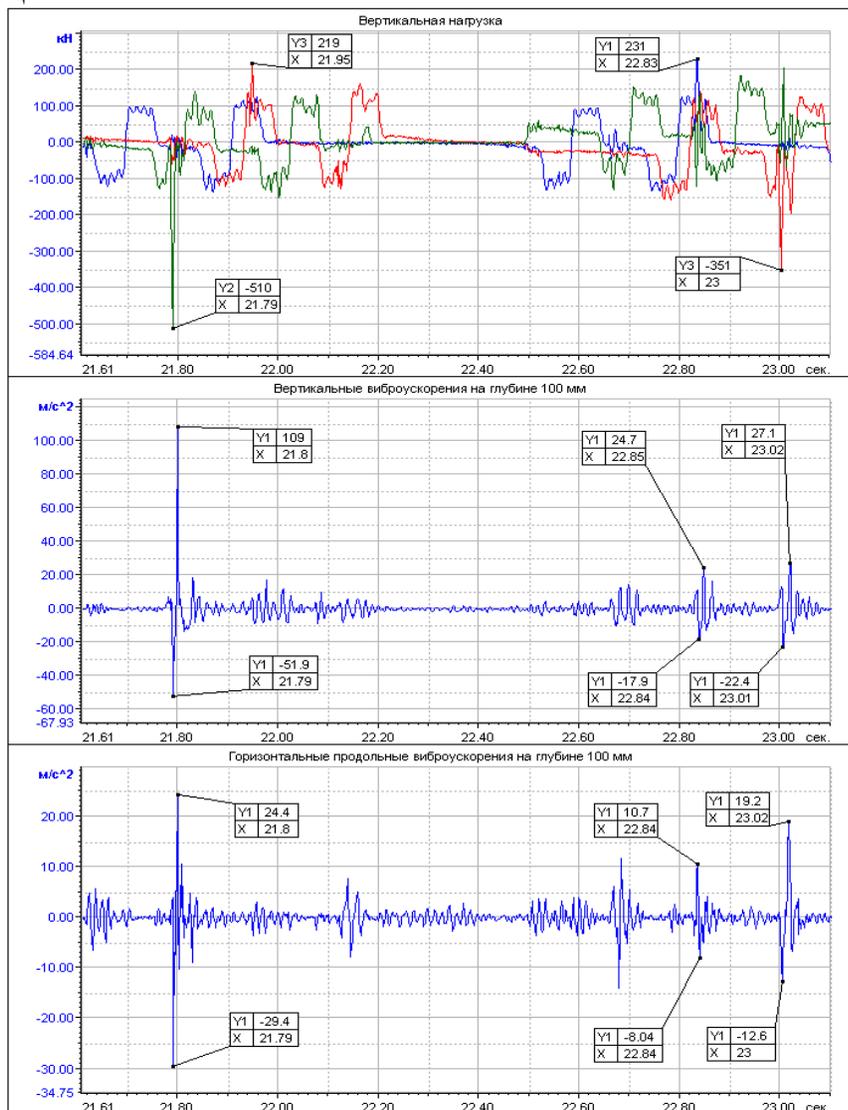
\* Со скоростью движения 1,1 км/ч была выполнена одна поездка – для тарировки датчиков.

471 кН. По факту временные интервалы и амплитудные значения вертикальных сил определяются размерами и формой ползунов, скоростью движения, жёсткостью подрельсового основания, статической нагрузкой на колесо с ползуном.

При разбросе вертикальных сил учитывались их статистические характеристики: величины максимальных, минимальных, средних значений сил и их среднеквадратические отклонения. Значения вертикальных сил и их статистические параметры для

ползунов различной глубины и разных скоростей движения представлены в таблице 3.

На рис. 6 представлены графики изменения среднего значения ударной вертикальной нагрузки на рельс от колеса с дефектом в зависимости от величины ползуна и скорости движения. Графики показывают, что вертикальная нагрузка на рельс при проезде колеса с ползуном с увеличением скорости растёт, достигая максимального значения при скоростях 55–65 км/ч.



**Рис. 7. Виброграммы ускорений частиц щебня в балластном слое на глубине 100 мм от подошвы шпал в вертикальном направлении при взаимодействии с колёсами с ползунами.**

С дальнейшим увеличением скорости движения вертикальная сила на рельс от колеса с ползуном снижается.

*Уровни виброускорений в балластном слое.* Характер динамических процессов, возникающих в балластном слое при ударном взаимодействии колёс с дефектом в виде ползуна и рельсов, иллюстрирует рис. 7.

Процесс изменения виброускорений частиц балласта в вертикальном и продольном направлениях в зоне рельса характерен и синхронен процессу воздействия вертикальных сил на рельс.

Рассмотрим результаты параметров вибраций в балластном слое от взаимодействия колёс с ползунами как наиболее показательные.

При движении опытного вагона со скоростью 32 км/ч наиболее близкий к месту установки вибродатчиков (на расстоянии  $\approx 0,3$  м) ударный импульс оказался величиной 510 кН.

Импульсное взаимодействие передавалось на элементы верхнего строения пути, вызывая повышение ускорений как в вертикальном, так и продольном направлении.



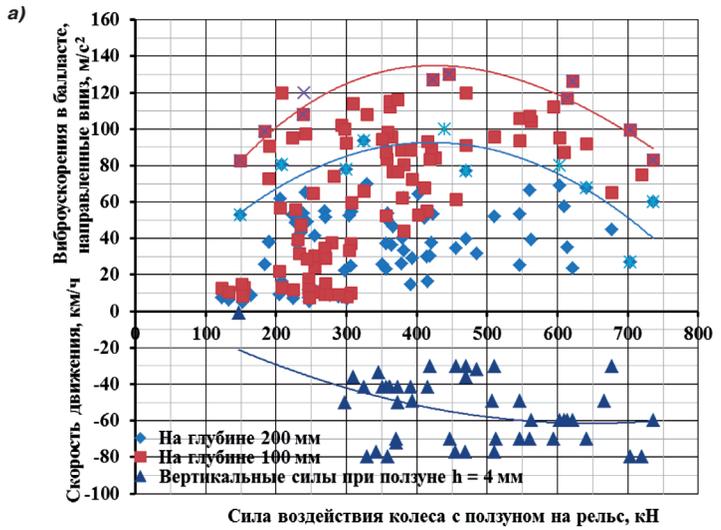
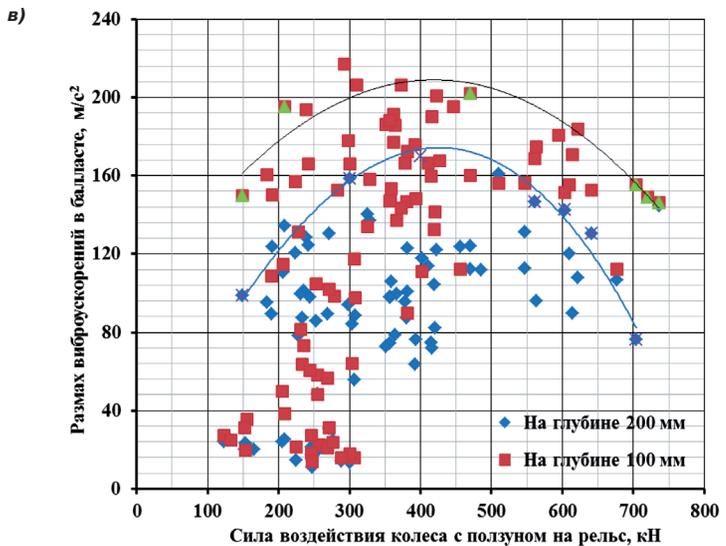
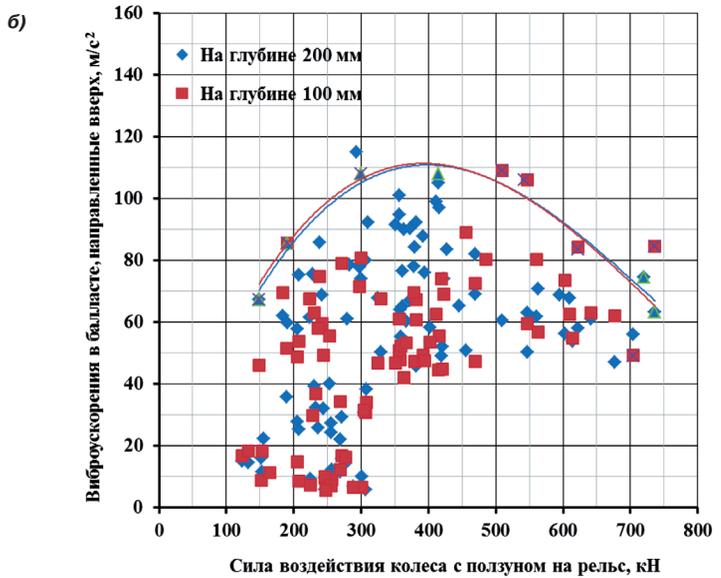


Рис. 8. Точечные диаграммы вертикальных ускорений частиц щебня на глубине 100 мм и 200 мм ниже подошвы шпалы, направленных вниз (а), вверх (б) и в размах (в) по отношению к ударной вертикальной нагрузке.



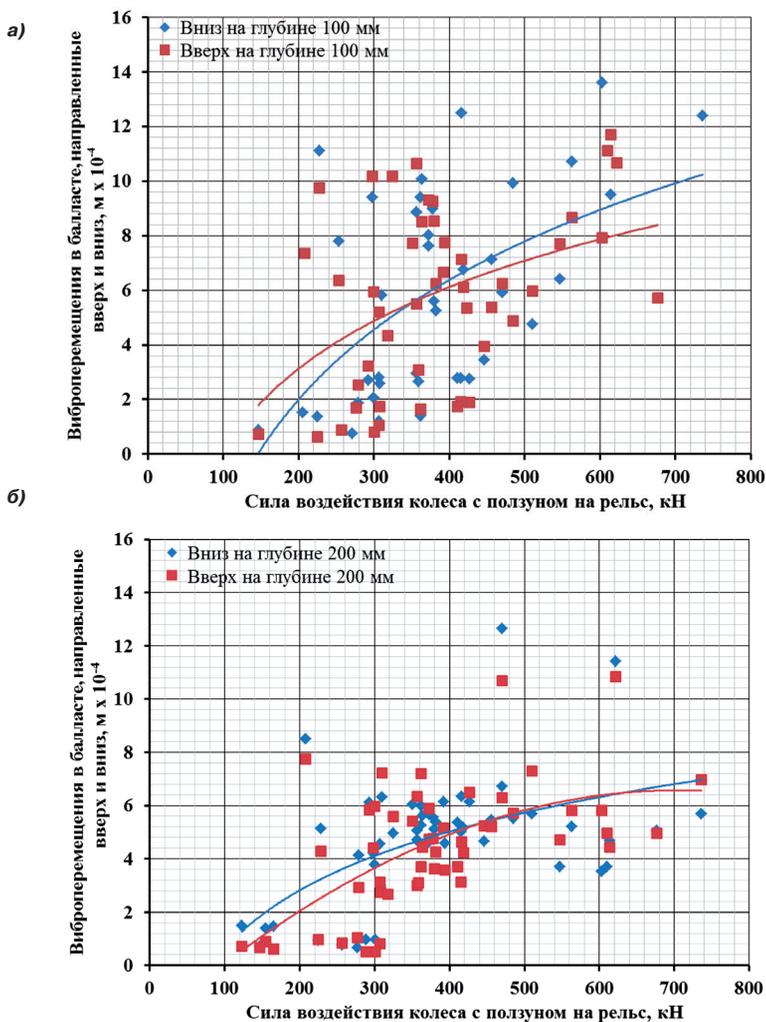


Рис. 9. Точечные диаграммы вертикальных виброперемещений частиц щебня на глубине 100 мм (а) и 200 мм (б) ниже подошвы шпалы, направленных вниз и вверх по отношению к ударной вертикальной нагрузке.

ях. Характер динамических процессов вертикальных ускорений идентичен силовому воздействию.

В момент обезгруживания колеса ускорение направлено в сторону, противоположную упругой отдаче рельсошпальной решётки, т.е. «вниз». Уровни ускорений при этом достигали  $W_{\text{вер.1}}^n = -51,9 \text{ м/с}^2$ . При взаимодействии колеса с рельсом ударный импульс идет «вниз». При этом направления ускорений изменялись на противоположные, а их значения достигали  $W_{\text{вер.2}}^n = 109 \text{ м/с}^2$ , размах ускорений составлял  $W_{\text{вер.}}^{\text{раз}} = 160 \text{ м/с}^2$  (16g).

В продольном направлении наблюдалось синхронное повышение ускорений, но уровни их были ниже в 2–4 раза, что связано с направлением силового воздействия, и по характеру изменений они были ближе к симметричному циклу в отличие

от асимметричного в вертикальном направлении.

Колебательный процесс имел затухающий характер как в вертикальном, так и продольном направлениях (через 0,02–0,03 с), что связано со значительным демпфированием в зернистых средах типа щебёночного балласта.

Следующее усиление колебаний, существенно ниже первого по уровню, наблюдалось после полуоборота колеса через  $t = 0,17 \text{ с}$ . Это при скорости движения опытного поезда 31,8 км/ч соответствовало пройденному пути примерно 1,5 м и процессу взаимодействия ползуна  $h = 1 \text{ мм}$  с рельсом. Колебательный процесс представлял набор 5–6 колебаний с уровнем вибраций  $W_{\text{вер.2}} = 12\text{--}18 \text{ м/с}^2$  и  $W_{\text{прод.2}} = 3\text{--}4 \text{ м/с}^2$ . Ещё через полоборота ( $t \sim 3 \text{ м}$ ) наблюдалось очередное взаимодействие



ползуна  $h = 4$  мм с рельсом. Это приводило к повышению ускорений частиц балласта, но уровень ускорений не превышал  $W_{\text{вер}3} = W_{\text{прод}3} < 5-6$  м/с<sup>2</sup>. При дальнейшем движении процесс колебаний частиц щебня, связанный с ударным взаимодействием, прекращался. Таким образом, при мощном ударном взаимодействии, как в нашем случае ползуна  $h = 4$  мм, вибрационные волны распространялись на расстояние до 3 м, вовлекая в колебательный процесс частицы балластного слоя.

На виброграммах наблюдаются периодические зоны повышенных ускорений в вертикальном и продольном направлениях, определяемые регулярным периодическим взаимодействием колеса с ползунами.

Уровни вертикальных вибраций при дефектах на поверхности катания в виде ползуна  $h = 1$  мм имели значения  $W_{\text{вер}1} = 22,4-27,1$  м/с<sup>2</sup>, продольных —  $W_{\text{прод}1} = 12,8-19,2$  м/с<sup>2</sup>, что в 2–4 раза ниже, чем при взаимодействии колеса с ползуном  $h = 4$  мм. Это объясняется более низкими уровнями ударных сил взаимодействия колеса с ползуном  $h = 1$  мм —  $P_{\text{в}}^{\text{уд}} = 180-220$  кН.

При ползунах  $h = 2$  и 3 мм характер колебательного процесса сохранялся, уровни ускорений занимали промежуточные значения, полученные при ползунах  $h = 4$  и 1 мм.

На рис. 8 представлены точечные диаграммы вертикальных ускорений частиц щебня на глубине 100 мм и 200 мм ниже подошвы шпалы, направленных вниз (а), вверх (б) и в размах (в) по отношению к ударной вертикальной нагрузке, возникающей от взаимодействия колёс с ползунами и рельсом. Значения виброускорений принимались лишь те, которые были инициированы ударными импульсами, зафиксированными непосредственно над вибродатчиками или наиболее близкими к ним.

На всех диаграммах проведены огибающие кривые, проведённые по максимальным значениям виброускорений, как наиболее влияющим на устойчивость балласта.

*Анализ опытных данных показал:*

- вертикальные ускорения пропорциональны величине силового ударного воздействия колеса с дефектом на рельс;
- в соответствии с существующей тенденцией к максимальному повышению

силового воздействия от ползунов в диапазоне скоростей от 40 до 50 км/ч сохранялась своя закономерность для ускорений частиц щебня;

- из точечных диаграмм виден значительный разброс уровней ускорений частиц щебня, что объясняется разбросом сил взаимодействия дефектных колёс с рельсами при повторных проездах, случайным характером расстояний от точки взаимодействия дефекта на колесе с рельсом до сечения, в котором установлены датчики ускорений;

- при увеличении глубины залегания частиц щебня с 100 до 200 мм наблюдалась тенденция к снижению уровней вибраций на 15–30 %. Однако из-за разброса уровней ускорений имели место случаи, когда эти уровни на глубине 200 мм превышали ускорения частиц щебня, находящихся на глубине 100 мм при одинаковых условиях испытаний. В целом по более широкой выборке наблюдалась тенденция к снижению уровней ускорений с увеличением глубины залегания частиц из-за затухания процесса распространения ударных волн в зернистой среде;

- сравнительный анализ ускорений «вниз» при взаимодействии ползунов с рельсами показал значительную разницу в уровнях ускорений на разной глубине, что ещё раз подтверждает вероятностный характер процесса;

- в вертикальном направлении процесс колебаний асимметричный, с более значимыми величинами ускорений «вверх». В продольном направлении уровни ускорений в среднем в 1,5–2,5 раза ниже, чем в вертикальном, процесс ближе к симметричному циклу.

Одновременно с ускорениями частиц щебня определены их виброперемещения.

На рис. 9 представлены точечные диаграммы вертикальных виброперемещений частиц щебня на глубине 100 мм и 200 мм ниже подошвы шпалы, направленных «вниз» (рис. 10а) и «вверх» (рис. 10б) по отношению к ударной вертикальной нагрузке, возникающей от взаимодействия колёс с ползунами и рельса.

*Анализ опытных данных показал:*

- виброперемещения частиц щебня имеют устойчивую тенденцию к повышению с увеличением величин вертикальных ударных сил;

- при одинаковых уровнях ударных сил виброперемещения частиц щебня имеют значительный разброс. Так, при  $P_{в}^{уд} = 300$  кН вертикальные перемещения частиц щебня изменялись в пределах 0,1–1,1 мм при движении вниз и 0,05–0,72 мм – при движении вверх. Данный факт может быть объяснён нелинейными характеристиками зернистых сред;

- имеют место различия в уровнях виброперемещений по направлению движения «вниз» (совпадает с направлением ударной силы) и по направлению «вверх» (направление упругой отдачи). Различия в вертикальных виброперемещениях «вверх» и «вниз» подтверждают факт наличия помимо упругой и остаточной деформации балластного слоя при ударном взаимодействии. При этом чем больше ударная сила, тем больше различия между виброперемещениями «верх», «вниз» и значительна остаточная деформация.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований экспериментально определены силы взаимодействия колёс с дефектом в виде ползуна и железнодорожного пути в летних условиях эксплуатации. Анализ показал:

- ударные взаимодействия колёс с дефектами и рельсов являются мощным источником возбуждения вибраций в балластном слое. Это определяет снижение коэффициента эффективного трения в балластном слое и приводит к интенсивным остаточным осадкам и расстройством пути;

- частицы щебня при ударном воздействии колёс на рельсы совершают объёмные колебания – в вертикальном направлении процесс колебаний асимметричный, с более высоким уровнем по направлению «вниз», более низким «вверх»; в продольном направлении процесс колебаний гармонический, с незначительным коэффициентом асимметрии;

- уровни вибраций определяются силой ударного взаимодействия, которая зависит от типа дефекта, его геометрических размеров, скорости движения, а также удалён-

ности балластного слоя от источника ударного взаимодействия. С увеличением удалённости уровни вибраций снижаются. При мощном ударном взаимодействии (например, от ползуна  $h = 4$  мм) вибрационные волны распространяются до 3 м и более;

- колебательный процесс в балласте представляет собой быстро затухающий процесс из-за высокого коэффициента демпфирования зернистой среды, импульсы ускорений от ударной силы затухают практически после первого колебания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов С. Н. О допускаемых напряжениях на балласт // Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчётов пути: Сб. научных трудов. – Вып. 97. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – С. 353–384.

2. Прокудин И. В., Колос А. Ф., Козлов И. С., Николайтис Д. С. Чувствительность щебёночного балласта к вибродинамическому воздействию // Конструкция железнодорожного пути и вопросы технического обслуживания высокоскоростных магистралей: Сб. науч. трудов междунар. науч.– практ. семинара / Ред. Л. С. Блажко. – СПб.: ПГУПС, 2010. – С. 71–72.

3. Колос А. Ф., Николайтис Д. С., Морозова А. А. Оценка чувствительности путевого щебня к действию вибродинамической нагрузки // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Материалы X науч.-тех. конф. – М.: МИИТ, 2013. – С. 164–166.

4. Краснов О. Г., Акашев М. Г., Ефименко А. В. и др. Влияние ударных сил на вибрации в балластном слое // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 3. – С. 5–10.

5. Морозова А. А. Несущая способность подпального основания железнодорожного пути на участках обращения поездов с осевыми нагрузками до 300 кН / Дис... канд. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2014. – 184 с.

6. Третьяков В. В. Влияние характеристик подбалластного основания на интенсивность накопления расстройств пути в вертикальной плоскости / Дис... канд. техн. наук. – М.: ОАО «ВНИИЖТ», 2008. – 150 с.

7. Турсунов Х. И. Исследование колебательного процесса в балластной призме, засоренной барханскими песками // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3. – С. 358–389.

8. Барабошин В. Ф., Лысюк В. С. Улучшение виброзащитных свойств пути с железобетонными шпалами // Вестник ВНИИЖТ. – 1980. – № 1. – С. 48–51.

9. Барабошин В. Ф., Ананьев Н. И. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка. – М.: Транспорт, 1978. – 45 с.

10. Певзнер В. О., Железнов М. М., Каплин В. Н. и др. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подпальных прокладок // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – № 3. – С. 140–146. ●

Координаты авторов: **Краснов О. Г.** – krasnovog@mail.ru, **Богданов О. К.** – bogdanov\_ok@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.10.2016, принята к публикации 28.12.2016.

