

**Объем информации для установления
допустимых скоростей движения
по результатам комплексных испытаний**

д.т.н. Ю.С Ромен, инж. М.С. Тихов

Условия обращения нового или модернизированного подвижного состава устанавливаются на основании результатов комплексных динамических и по воздействию на путь испытаний. В процессе проведения таких испытаний одновременно регистрируются как процессы динамики экипажа, так и напряженное состояние элементов конструкции пути, обусловленное силовым воздействием данного подвижного состава.

Количество регистрируемых параметров на подвижном составе определяется требованиями безопасности движения и комфорта пассажиров (для пассажирского подвижного состава) и лимитируется приказом МПС №41[1]. Согласно приказу при установлении условий обращения должны выполняться требования не превышения допустимых значений следующих параметров взаимодействия для подвижного состава: рамных сил, коэффициента запаса устойчивости против схода колесной пары с рельсов, коэффициента вертикальной динамики, вертикальных и горизонтальных ускорений кузова вагона и рамы тележки.

В соответствии с существующей методикой динамические параметры экипажа измеряются непрерывно на различных участках пути. Причем общий объем полученных реализаций динамических процессов для каждой конструкции пути и скорости движения должен быть не меньше 200 с. Такие требования к объему динамической информации обусловлены случайным характером рассматриваемых процессов и установлены на основании многолетней практики проведения ходовых испытаний.

В конструкциях пути предельные значения параметров взаимодействия, назначенные приказом МПС, обусловлены не только требованиями безопасности, а имеют технико-экономическую основу – при

существующих в настоящее время системах технического обслуживания и ремонта железнодорожного пути силы взаимодействия должны не превышать величин, обеспечивающих целостность рельсовой колеи и допустимый уровень накопления деформаций за период времени между двумя плановыми его проверками при проходах вагона-путеизмерителя.

Современная методика испытаний по воздействию на путь [2] включает в себя непосредственное измерение следующих показателей: напряжений в наружной и внутренней кромках подошвы рельсов, горизонтальных и вертикальных нагрузок, передаваемых колесами на рельсы и шпалы, отжатый и просадок рельсов.

Используемые в настоящее время комплексы путеиспытательной аппаратуры позволяют проводить измерение указанных параметров только в дискретных сечениях датчиками, установленными непосредственно на пути с передачей данных в стационарную лабораторию. Исключением является лишь непосредственное измерение вертикальных и горизонтальных нагрузок на путь с помощью тензометрической колесной пары. Однако этот метод не нашел применения в испытаниях по воздействию на путь при установлении условий обращения новых и модернизированных типов подвижного состава в силу своей сложности и чрезвычайной трудоемкости оборудования измерительной колесной пары для каждой новой конструкции экипажа. Поэтому обычно исходя из условий проведения испытаний измерения указанных лимитирующих параметров, характеризующих напряженное состояние пути, выполняются датчиками расположенными на протяжении 2-3 рельсовых звеньев длины 25 метров в 10-18 сечениях пути.

Количество исследуемых сечений пути лимитируется возможностями конкретной измерительной и обрабатывающей аппаратуры, а также финансовыми возможностями ее приобретения.

Традиционный метод обработки экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии пути под воздействием подвижного состава состоит в следующем. Данные, полученные по одному и

тому же показателю воздействия в разных сечениях пути, объединяются в одну статистику для каждой оси испытуемого экипажа. Объединяется информация, полученная во всех опытных заездах, проведенных в одном направлении и при одной скорости движения. По скорости разброс по заездам может достигать 5 км/ч. Для полученной совокупности значений вычисляются первые четыре центральных момента, после чего определяются максимально вероятные значения величины по двум распределениям – нормальному и Чебышева-Эрмита (Лапласа-Шарлье) с вероятностью 0,994, соответствующей в случае нормального распределения квантили математического ожидания плюс 2,5 среднеквадратического отклонения. Из двух распределений выбирается то, которое по статистическим параметрам более точно описывает экспериментальную выборку. В том случае, если теоретические кривые распределения не соответствуют экспериментальным данным, в качестве оценки показателя выбирается среднее из трех максимальных наблюдаемых значений.

На рис. 1 приведены вероятные и наблюдаемые характеристики напряжений в наружной кромке подошвы рельсов при воздействии на путь первой оси вагона.

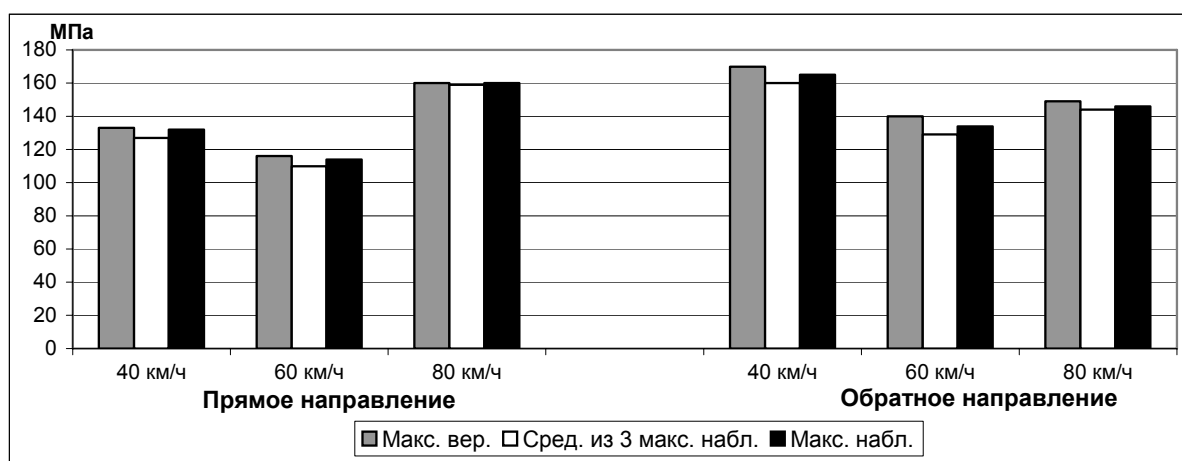


Рис. 1 - Максимальные вероятные и наблюдаемые значения напряжений в кромках подошвы рельсов под грузовым полувагоном в кривой радиусом 350 м

В данном случае во всех вариантах движения выбранные максимальные вероятные значения оказывались выше, чем средние из трех максимально наблюдаемых величин. В отдельных случаях выше оказались

максимальные наблюдаемые значения. Особенно это характерно для ненабегающих осей тележек вагона, когда возникает значительный разброс наблюдаемых значений. Аналогичная картина наблюдается и для боковых нагрузок на рельсы в двух опытных участках пути (рис. 2). В целом, оценка экспериментальных данных теоретическим вероятностным законом дает увеличение до 5 %, что при определении допустимой скорости позволяет использовать ее в качестве величины, характеризующей всю генеральную совокупность данных.

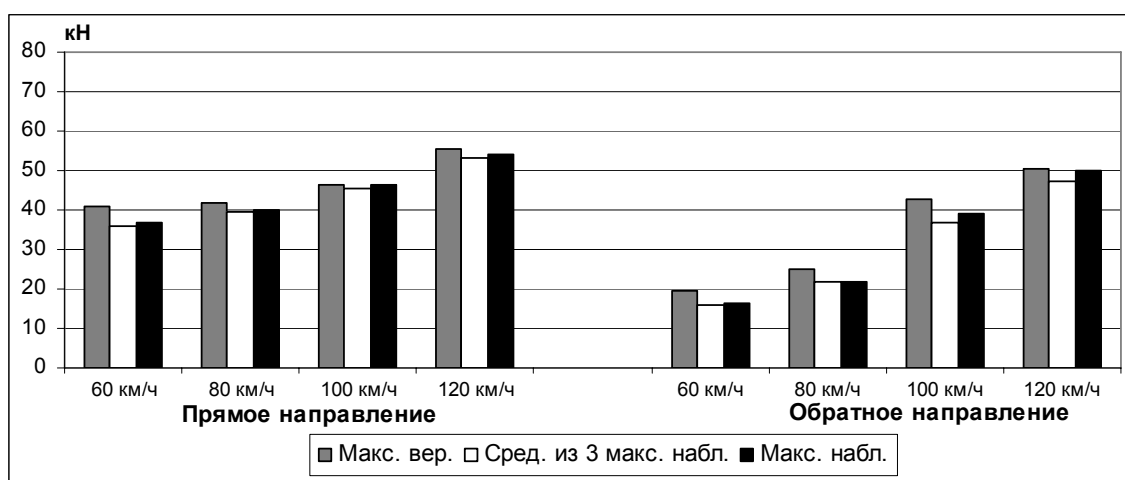


Рис. 2 – Максимальные вероятные и наблюдаемые значения боковых сил под грузовым полувагоном в кривой радиусом 650 метров

Для получения максимально достоверной информации по максимальным измеренным величинам на опытном участке необходимо определить не только количество заездов, но и датчиков. Выбор мест установки датчиков в пределах определенного опытного участка представляет собой отдельную задачу. Поскольку определяющими являются вопросы безопасности движения, то согласно принятой методике должны быть выбраны сечения, где подвижной состав оказывает на путь максимальное воздействие. Показателями для выбора таких сечений могут являться отступления в геометрии пути и величины показателей динамики подвижного состава.

Так как все рассматриваемые процессы являются случайными, и регистрируемые величины имеют случайные характеристики, то другой

серьезной проблемой организации испытаний по воздействию на путь является определение количества проводимых опытных заездов. Их должно быть достаточно для обеспечения достоверности полученных результатов, но проведение избыточных заездов приводит к удорожанию и затягиванию испытаний. В настоящее время количество заездов определяется с учетом полученных в предыдущих испытаниях однотипного подвижного состава среднеквадратических отклонений показателей воздействия на путь. Такой метод был обусловлен тем, что ранее обработка экспериментальной информации по всей совокупности данных при ручной расшифровке осциллограмм обычно занимала несколько недель, что делало невозможным проведение оценок во время испытаний.

В настоящее время методы измерений и обработки опытных данных, основанные на использовании современных технических средств, позволяют получать результаты практически в реальном масштабе времени. Это позволяет поставить задачу оценки достаточности полученной экспериментальной информации во время проведения эксперимента.

Наиболее трудоемким этапом обработки ранее являлась расшифровка опытных записей с выделением из общей массы данных воздействия от каждой оси опытных экипажей. Применение автоматизированных программ обработки дает возможность значительно ускорить данный процесс.

Данные каждого прибора в одном заезде представляют собой совокупность отдельных импульсов, соответствующих возникающим в одном и том же сечении пути напряжениям и нагрузкам под всеми осями опытного поезда. Из этой совокупности выделяется информация о воздействии на путь испытываемого подвижного состава.

Следующим этапом обработки экспериментальных данных является объединение полученных значений по всем датчикам одного типа согласно принятой методике в одну статистику. Количество датчиков в настоящее время обычно составляет 12-16. Отдельно рассматриваются скорости и

направления движения, а также воздействие от каждой оси экипажей, входящих в опытный поезд.

При испытаниях грузовых вагонов были проведены расчеты по определению математического ожидания и среднеквадратического отклонения показателей воздействия на путь в зависимости от количества заездов и приборов в выборке. Для определения достаточности полученного экспериментального материала была использована оценка величины изменения среднего значения и дисперсии показателей напряженно-деформируемого состояния пути под воздействием на него опытного экипажа.

Были выбраны варианты движения с максимальной скоростью в двух опытных участках, именно эти случаи характеризуются максимальными значениями и большим разбросом случайных величин.

На рис. 3 приведены зависимости характеристик напряжений в кромках подошвы рельсов по всем приборам в зависимости от количества проведенных заездов. На рис. 4 – в зависимости от количества используемых приборов по всем заездам. На приведенных графиках в качестве границы взято 0,02 значения ожидаемого показателя.

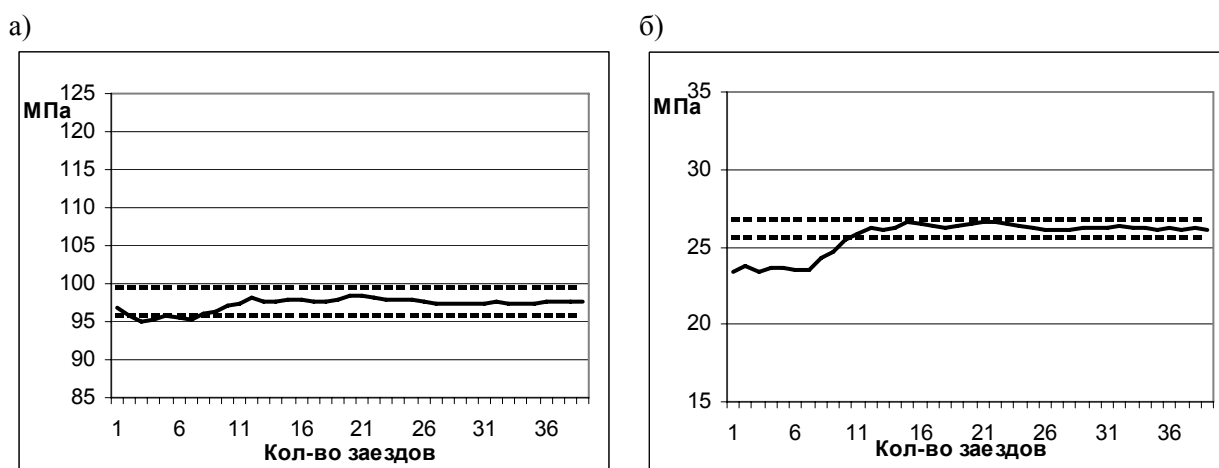


Рис. 3 - Напряжения в кромках подошвы рельсов в зависимости от количества заездов
а) среднее значение б) среднеквадратическое отклонение

Как видно из рисунка 3 по заездам в рассматриваемом случае наблюдается достаточно хорошая повторяемость экспериментальных

данных. После 11 заездов и среднее значение, и среднеквадратическое отклонение не выходят за границы выделенной области. Проведение всех последующих заездов дает уточнение не превышающее 4 %. Это обусловлено тем, что движение происходит по одному участку пути.

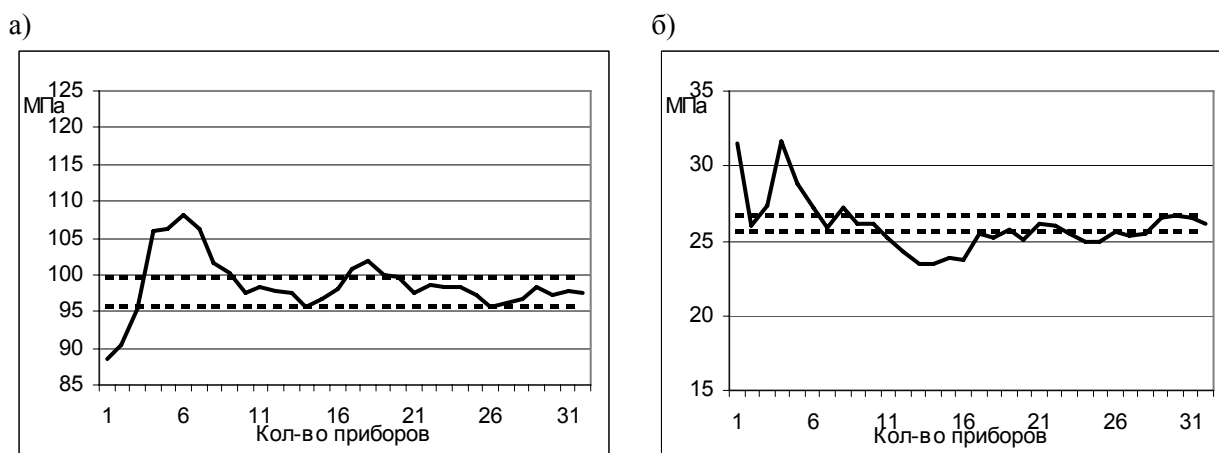


Рис. 4 - Напряжения в кромках подошвы рельсов в зависимости от количества приборов
а) среднее значение б) среднеквадратическое отклонение

Из рисунка 4 видно, что разброс по данным отдельных приборов может оказываться более значительным. Движение вагона в общем случае является сложной нелинейной колебательной системой [3,4]. Возникающие при наличии колебаний перемещения центра необрессоренных масс тележки поперек рельсовой колеи приводят к значительным изменениям воздействия вагона на путь в горизонтальной плоскости. Сечения пути также различаются по жесткостным параметрам.

Разница показателей воздействия в разных сечениях пути приводит к тому, что среднее значение напряжений в кромках подошвы рельсов (рис. 4) оказывается в пределах заданной области только после включения в совокупность 18 приборов, а среднеквадратическое значение лишь при рассмотрении практически всей экспериментальной информации. Наличие достаточно резких скачков свидетельствует о появлении в выборке приборов, показания по которым значительно отличаются от основной совокупности.

Полученные результаты свидетельствуют, что после проведения определенного количества заездов, наблюдаются только незначительные

изменения характеристик случайных величин и дальнейшее накопление экспериментальных данных не целесообразно. Таким образом, проведение подобного анализа во время испытаний позволит установить необходимое количество заездов для получения достоверной информации с определенной точностью.

Алгоритм определения достаточного количества заездов во время проведения испытаний должен включать следующие шаги:

- задание желаемой точности до проведения опытных поездок;
- проведение цикла поездок на одной скорости;
- обработка экспериментальных данных по каждому прибору с выделением воздействия от всех осей опытных экипажей;
- вычисление характеристик рассматриваемых случайных величин в зависимости от количества заездов в выборке (рисунки 3 и 4);
- принятие решение о достаточности полученной информации в том случае, если по всем рассматриваемым показателям, изменение характеристик происходит в рамках заданной точности, в противном случае – продолжение опытных поездок.

Более сложным является вопрос определения количества измерительных сечений, которое затруднительно увеличивать при проведении испытаний. Полученные результаты показывают, что добавление в выборку дополнительного прибора, установленного в районе слабых скреплений и плохо подбитых шпал, может привести к резким изменениям среднего значения и среднеквадратического отклонения до 5 и 10 % соответственно в зависимости от места установки, причем уточнение может быть много меньше увеличения параметров разброса.

Уменьшить разброс значений и тем самым количество необходимых измерительных сечений в известной мере можно, используя предварительную статическую калибровку датчиков. Однако, этот метод не приемлем для выбора сечений определения кромочных напряжений, так как в этом случае применяется электрическая калибровка.

Предварительная оценка необходимого количества заездов и приборов до заездов производится по методике описанной в [5]. Для получения максимальной вероятной величины с заданной точностью Δ количество значений N данных как по заездам, так и по приборам, в выборке должно быть не менее чем:

$$N \geq \frac{9.375 * S^2}{\Delta}$$

здесь S – ожидаемое среднеквадратическое отклонение, определяемое по предыдущим испытаниям подвижного состава близкого по конструкции к испытываемому.

При таком методе определения исходного объема информации обеспечивается вероятность достоверности 0,994.

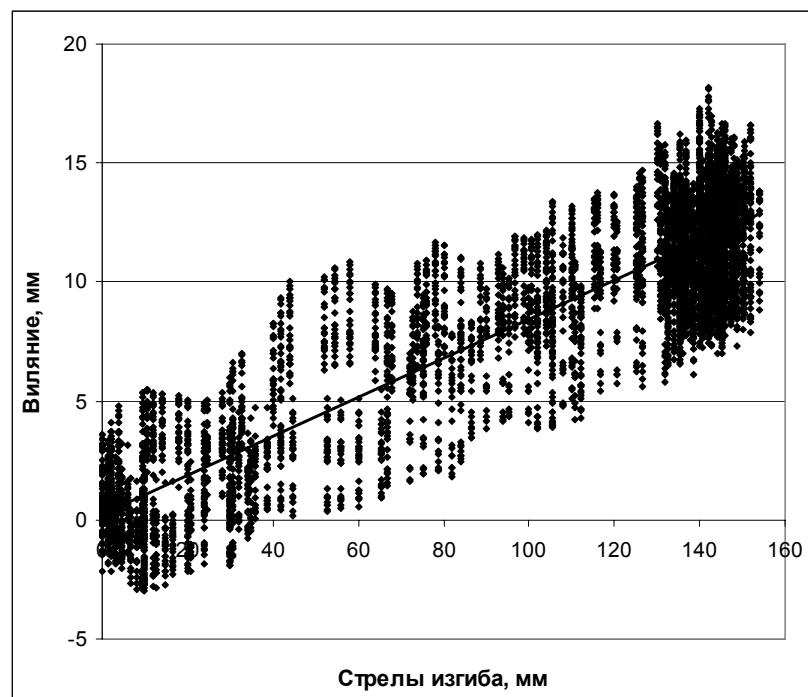
В рассматриваемых испытаниях при движении в кривой радиусом 350 метров со скоростью 80 км/ч для обеспечения точности измерения 5 МПа необходимо было провести 254 измерения (по прошлым испытаниям вагонов среднеквадратическое отклонение составило 26 МПа). Как видно из графиков для рассматриваемого вагона СКО оказалось несколько ниже ожидаемого, но при этом наблюдалось значительное изменение СКО от количества приборов, включенных в выборку.

Таким образом, различные варианты количества заездов и приборов могут давать принципиально разные результаты, что не учитывается используемой оценкой. Она может применяться только в тех случаях, когда количество приборов остается неизменным.

Обычно в качестве мест установки приборов выбирают участки с наибольшими отступлениями в плане и профиле пути. Также места размещения приборов определяются по результатам предварительных поездок опытного поезда с измерением рамных сил, которые принимаются в качестве основных индикаторов для выявления экстремальных мест. Обусловлено это тем, что максимальные силы взаимодействия далеко не всегда возникают в местах с максимальными отступлениями в пути.

Величина смещения определяется как параметрами самой неровности и участка пути, так и параметрами полувагона.

Были определены зависимости изменения угла поворота тележки относительно кузова вагона (влиянием) от стрел изгиба, измеренных от хорды длиной 20 метров в кривом участке пути (рис.5). Полученные результаты показали, что между стрелами изгиба и влиянием существует устойчивая связь, что свидетельствует о том, что влияние неровностей в плане пути на траекторию движения вагона, в частности на вписывание тележки в кривую, достаточно велико. Однако, прямая зависимость между вершинами неровностей и силовым горизонтальным воздействием тележки на путь, определяемым рамными силами, отсутствует. Поэтому для определения измерительных сечений пути лучшим индикатором являются показатели динамики экипажа.



Коэффициент корреляции 0.89

Рис. 5 – Зависимости угла поворота тележки относительно кузова вагона от стрел изгиба

Было проведено моделирование движения полувагона на тележках 18-100 в кривой радиусом 650 метров при одиночной горизонтальной неровности пути и движении со скоростью 80 км/ч. Результаты моделирования и очертания заданной неровности приведены на рис. 6.

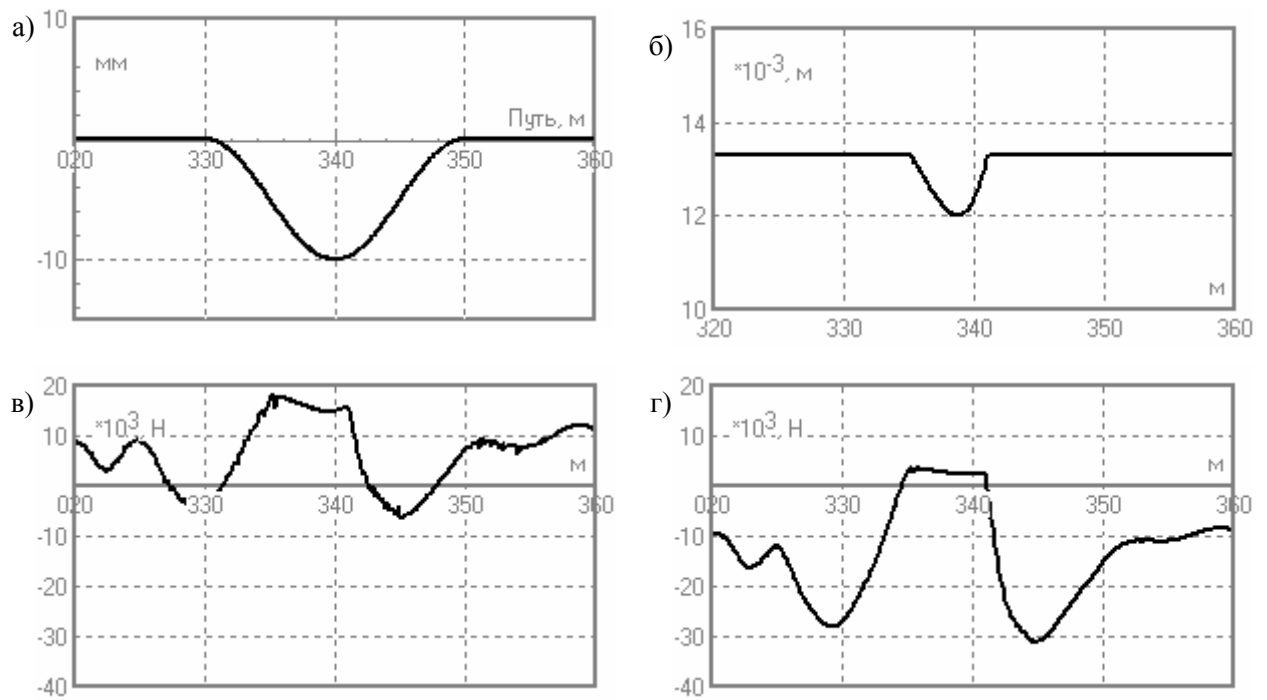


Рис. 6 – Моделирование движения полувагона в кривой радиусом 650 метров
 а) горизонтальная неровность б) боковое смещение колеса относительно рельса при скорости 80 км/ч
 в) рамные силы при скорости движения 80 км/ч г) боковые силы на наружной рельсовой нити при скорости движения 80 км/ч

Как видно из рисунка 6 между максимумом неровности и наибольшими силами взаимодействия пути и вагона наблюдается смещение, примерно равное 2-4 м.

Кроме того, на графике рамной силы видна область, в которой при скорости 80 км/ч рамная сила направлена в противоположную сторону. В этом случае набегания колеса не происходит (рис. 6б), и боковая сила на наружном рельсе может быть меньше, чем на внутреннем. Подобное явление вносит дополнительную неопределенность в корреляции рамных и боковых сил. Таким образом, делать выводы по одной рамной силе о местах максимального воздействия на наружную нить кривой можно только с определенными ограничениями.

Также определение мест установки приборов по рамной силе затруднительно в испытаниях, когда одновременно испытываются два и более объектов, так как для них возможны разные места возникновения максимальных рамных сил.

Поэтому при выборе мест установки приборов по совокупной информации о неровностях пути и сил взаимодействия, зарегистрированных на испытываемых экипажах на рассматриваемом участке пути целесообразно определить 2-3 зоны с максимальными отступлениями в геометрии пути. С учетом смещения максимума боковой силы от вершины неровности протяженность каждой зоны может составить 10-12 метров. В этих выбранных участках следует располагать приборы с равномерным шагом в 1-2 метра.

Количество мест установки приборов одного типа можно увеличить также за счет уменьшения типов приборов, поскольку между измеряемыми параметрами напряженного состояния пути имеется корреляционная зависимость, обусловленная тем, что первопричиной возникновения сил взаимодействия и деформаций элементов конструкции пути являются силы его взаимодействия с проходящим подвижным составом.

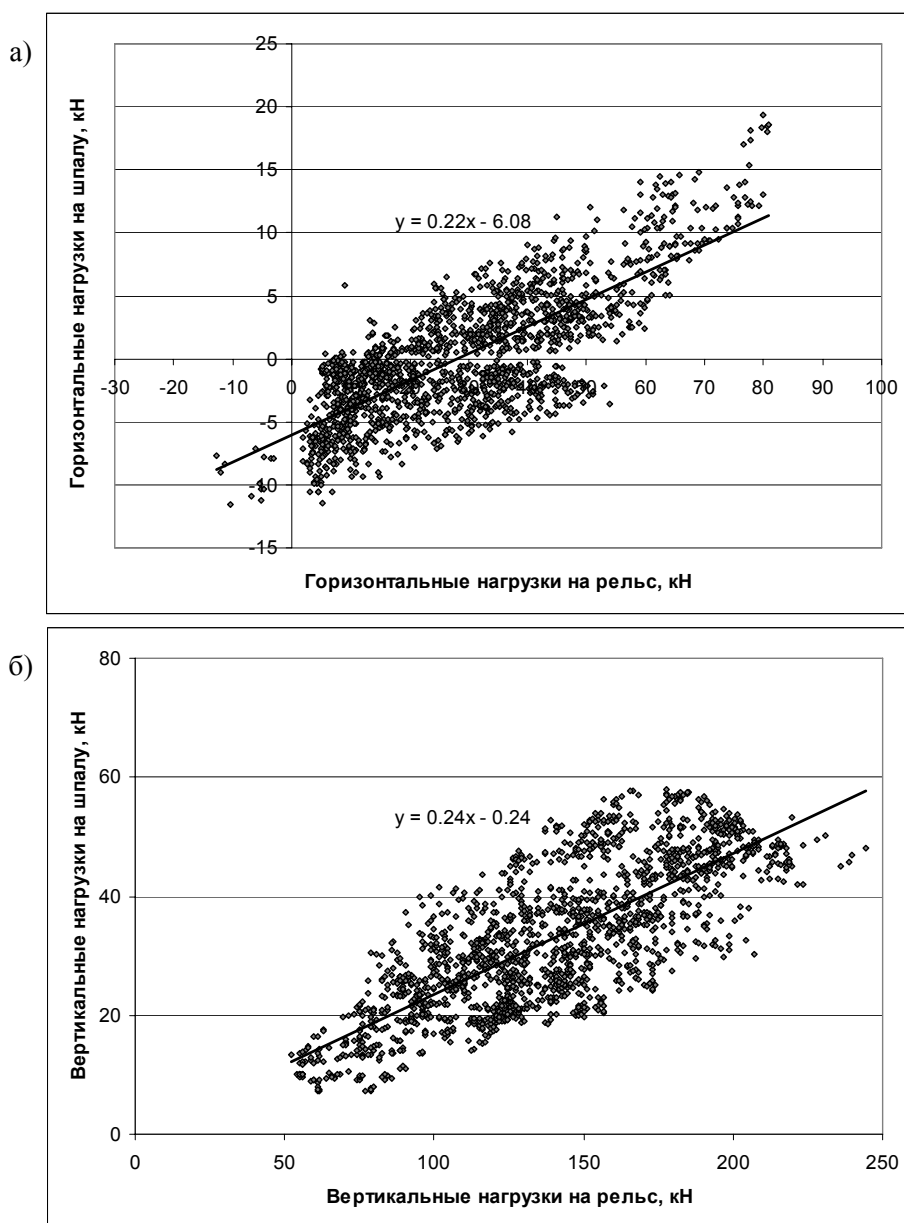
Установление зависимостей между различными показателями, определяющими воздействие на путь в вертикальном и горизонтальном направлении, позволяет отказаться от измерения трех различных типов характеристик напряженно-деформированного состояния пути и тем самым значительно увеличить количество исследуемых сечений. Однако, для этого необходимо определить измерение каких показателей может обеспечить полноту экспериментальной информации о напряженно-деформированном состоянии пути при сохранении достоверности получаемых экспериментальных данных.

Измерение нагрузок на шпалы требует установки специальных силоизмерительных подкладок, при этом вносятся изменения в конструкцию пути на опытных участках, а точность измерения сильно зависит от жесткости подбивки шпал вблизи измерительных сечений, поэтому более целесообразным является измерение напряжений в рельсах методом тензометрирования, не требующим внесения изменений в конструкцию пути опытного участка, с последующим определением нагрузки на шпалу по

данным установленных корреляционных зависимостей. Измерение нагрузок на рельсы по методу Шлюмпфа [2,6] также производится на основе тензометрирования и проведения силовых калибровок измерительных сечений, поэтому целесообразно увеличить количество приборов для измерения нагрузок на рельсы за счет некоторого уменьшения количества остальных приборов. Увеличение количества сечений для определения остальных параметров можно получить, используя полученные корреляционные зависимости.

Были получены зависимости горизонтальных и вертикальных нагрузок на шпалы от соответствующих нагрузок на рельс, измеряемых в этом же сечении пути (рис. 7). В одну совокупность сведены нагрузки, возникающие при воздействии на путь всех осей локомотивов и вагонов. Как показывает анализ полученных зависимостей нагрузки, передаваемые от рельса на шпалу в одном сечении пути по обоим рельсовым нитям, могут быть с достаточной достоверностью определены по нагрузкам, возникающим в контакте колесо-рельс. Зависимости горизонтальных и вертикальных нагрузок на шпалы от нагрузок на рельсы для одного промежуточного скрепления характеризуются одинаковым рассеянием показателей, обусловленным стабильностью подрельсовой структуры: коэффициенты корреляции для наружной нити кривой составили 0,77, а по внутренней – 0,88. При определении корреляции для отдельных экипажей и осей величины коэффициентов еще выше. Аналогичный уровень взаимозависимости получен и при одновременном измерении вертикальных нагрузок на рельсы и железобетонные шпалы.

Для разных сечений зависимости нагрузок на шпалы от нагрузок на рельсы могут значительно отличаться, что объясняется неравноупругостью железнодорожного пути, как в вертикальном, так и горизонтальном поперечном направлении. Однако, максимальные величины нагрузок наблюдаются там, где жесткости и, следовательно, коэффициенты корреляции выше, а для определения прочности нужны именно эти данные.



Коэффициенты корреляции: а) 0,77 б) 0,77

Рис. 7 – Нагрузки на шпалы в зависимости от нагрузок на рельсы
 а) горизонтальные нагрузки б) вертикальные нагрузки

Проведенное исследование по результатам ряда испытаний по воздействию на путь, в которых одновременно регистрировались нагрузки на рельсы и напряжения в кромках, с целью определения взаимозависимостей полусумм напряжений и вертикальных нагрузок на рельсы, показало, что между этими экспериментально определяемыми показателями напряженно-деформированного состояния пути также существует устойчивая связь, обеспечивающая корреляцию выше 0,8 (рис. 8), а в большинстве случаев она находится в диапазоне от 0,9 до 0,95.

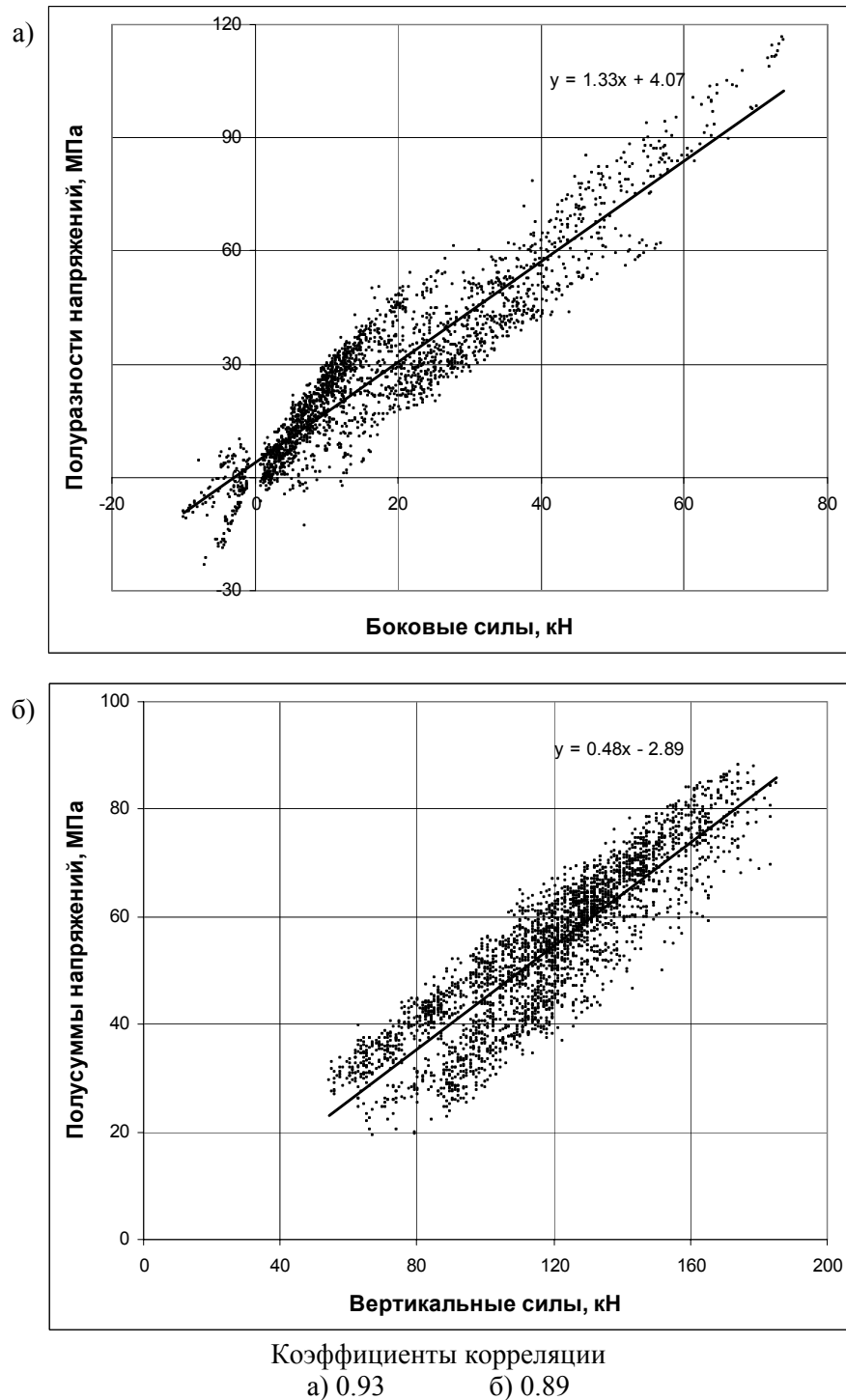
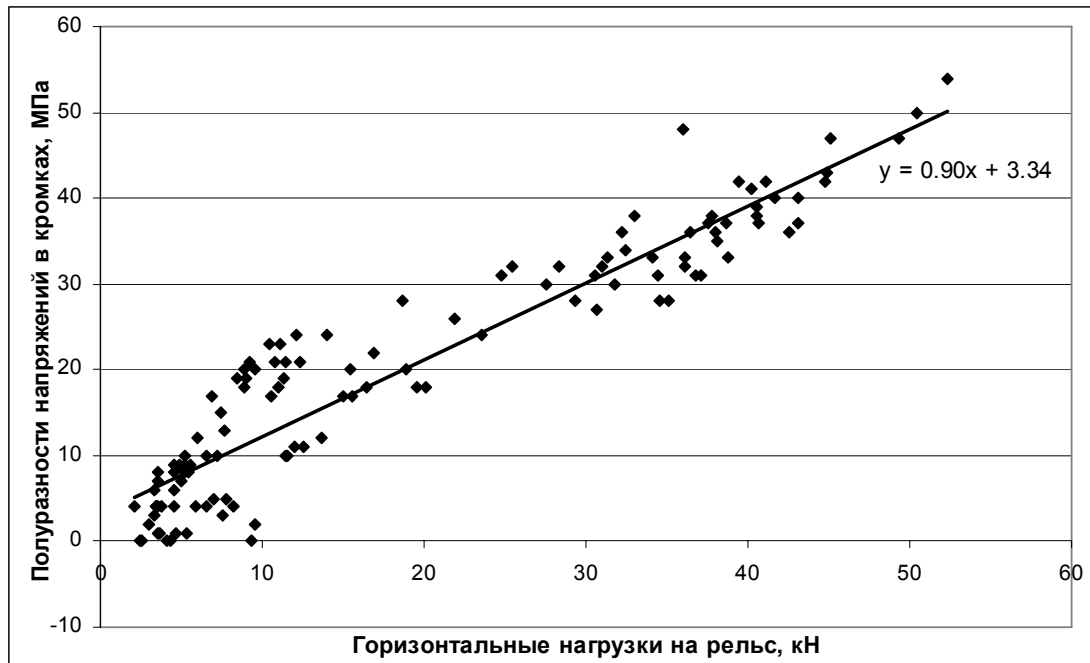


Рис. 8 – Напряжения в кромках подошвы рельсов в зависимости от нагрузок на рельсы
а) полуразности напряжений в зависимости от горизонтальных нагрузок
б) полусуммы напряжений в зависимости от вертикальных нагрузок

Большее рассеивание величин характерно при испытаниях, когда в опытных поезд входят и локомотивы и вагоны, на испытаниях локомотивов достигаются более устойчивые взаимозависимости между напряжениями в кромках подошвы рельсов и нагрузками на рельс. Это объясняется тем, что данная зависимость определяется положением поверхности контакта между

колесом и рельсом, а именно ее смещением поперек оси пути. Для локомотивов в кривых участках характерно постоянное набегание первыми осями тележек гребнем на наружную нить, для грузовых вагонов этот эффект достигается только при положительном непогашенном ускорении. Таким образом, различные точки контакта между колесами локомотивов и вагонов и рельсами могут значительно влиять на характер устанавливаемой взаимосвязи.

При установлении корреляционных зависимостей между средними наблюдаемыми значениями показателей воздействия на путь на всем опытном участке только для вагонов были получены коэффициенты корреляции не ниже 0,9 (рисунок 9).



Коэффициент корреляции 0.94

Рис. 9 – Средние наблюдаемые полуразности напряжений в кромках подошвы рельсов в зависимости от нагрузок на рельсы

Учитывая полученные результаты при проведении испытаний по воздействию на путь следует максимальное количество сечений оборудовать датчиками для определения силовых нагрузок на рельсы. На основании достоверности полученных результатов определяется объем испытаний, который в этом случае может быть уменьшен. Измерение остальных параметров, определяющих напряженное состояние пути, может проводиться

в меньшем количестве сечений и дополнительный объем данных для их оценки получается за счет корреляционных зависимостей при максимальном силовом воздействии на путь. Такая методика может не только уменьшить расходы на проведение испытаний, но и увеличить достоверность получаемых результатов.

Литература

1. Приказ МПС России №41 от 12 ноября 2001 г. «Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524)мм федерального железнодорожного транспорта». М.: Транспорт, 2001.
2. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М., 1986.
3. Ю.С. Ромен. О нелинейных колебаниях железнодорожного экипажа в кривых произвольного очертания. Сб. трудов ВНИИЖТ, вып. 347, 1967, с. 5-26.
4. А.Я. Коган, Ю.С. Ромен. Диссипативность в больших нелинейных колебаниях четырехосного грузового вагона. Сб. трудов ВНИИЖТ, вып. 347, 1967, с. 27-32.
5. М.Ф. Вериго. Методическое пособие по применению математической статистики в обработке опытных данных. Новосибирск, 1964.
6. Н. Weber. Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene. Elektrische Bahnen, 1961, №5, Bern, 93-110.

(Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. Сборник научных статей. СПб.: ПГУПС, 2007. с. 87-94).