

М. С. ТИХОВ, Ю. С. РОМЕН, А. В. БЕЛОУСОВ (Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Россия)

## ВЫБОР МЕСТ УСТАНОВКИ ПРИБОРОВ И КОЛИЧЕСТВА ЗАЕЗДОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ПУТЬ

Проведено аналіз існуючих підходів визначення місць установлення приладів та кількості заїздів для отримання достатньої інформації під час проведення випробувань рухомого складу для визначення сил та напруги в елементах рейкової колії.

Наведено метод коректування числа заїздів, вибору місць установлення приладів на дослідній ділянці.

Проведен анализ существующих подходов определения мест установки приборов и количества заездов для получения достаточной информации во время проведения испытаний подвижного состава для определения сил и напряжения в элементах рельсовой колееи.

Приведен метод корективировки числа заездов, выбора мест установки приборов на опытном участке.

An analysis of existing approaches to defining the sites of installation of measuring devices and the number of runs for getting reliable information in rolling stock track impact tests has been performed.

A method of correction of the number of runs and selection of the sites for installation of measuring devices on the tested track section has been offered.

Современная методика испытаний по воздействию на путь [1] включает в себя непосредственное измерение следующих показателей: напряжений в наружной и внутренней кромках подошвы рельсов, горизонтальных и вертикальных нагрузок, передаваемых колесами на рельсы, и передаваемых шпалой на подкладку, отжатий и просадок рельсов. Обычно исходя из условий проведения испытаний подобные измерения выполняются на протяжении 2–3 рельсовых звеньев длиной 25 м в 8...16 сечениях пути.

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 испытываемого экипажа. Объединяются данные, полученные во всех опытных заездах, проведенных в одном направлении и при одной скорости движения. По скорости разброс 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 среднеквадратическо-

го отклонения. Из двух распределений выбирается то, которое 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 при движении в кривой радиусом 350 м. Опытные поездки производились со скоростями 40, 60 и 80 км/ч методом челнока в двух направлениях движения на перегоне Ханская-Майкоп.

Во всех вариантах 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, 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.

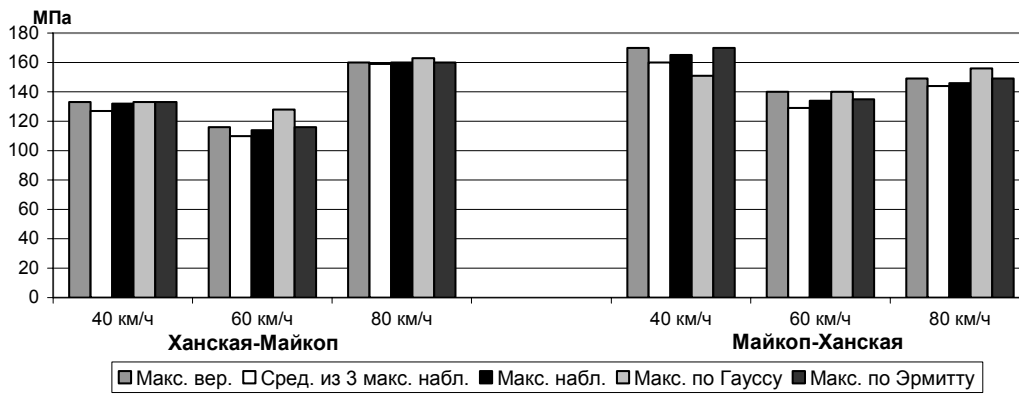


Рис. 1. Максимальные вероятные и наблюдаемые значения напряжений в кромках подошвы рельсов под грузовым полувагоном в кривой радиусом 350 м

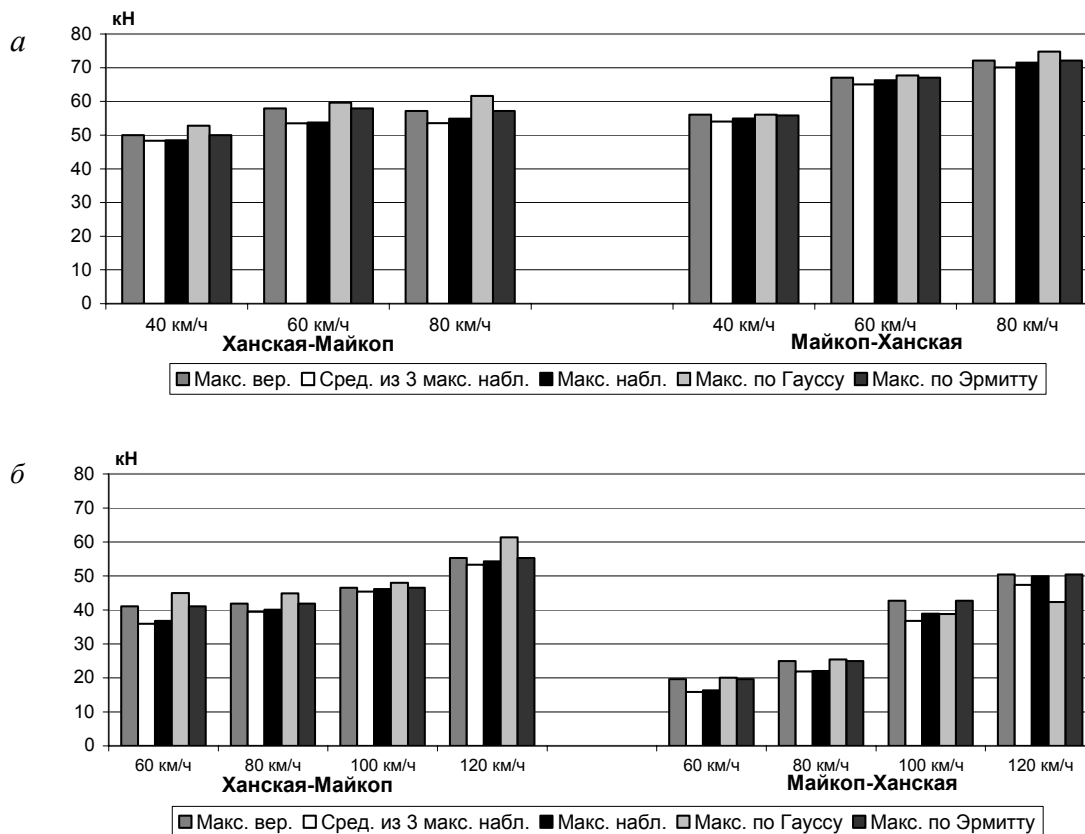


Рис. 2. Максимальные вероятные и наблюдаемые значения боковых сил под грузовым полувагоном: а – в кривой радиусом 350 м; б – в кривой радиусом 650 м

Для получения максимально достоверных данных по максимальным измеренным величинам на опытном участке необходимо определить не только количество заездов, но и приборов, а также места их расположения. Выбор мест установки датчиков в пределах определенного опытного участка представляет собой отдельную задачу. 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, то другой серьезной проблемой 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 средне-

квадратических 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.

Существующие 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 доста-

точности полученной экспериментальной информации во время проведения эксперимента.

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

На рис. 3 приведен пример обработки записи боковых нагрузок при испытаниях грузовых вагонов в кривой радиусом 350 метров. Опытный поезд состоял из трех опытных полувагонов, полувагона-эталона, двух локомотивов и вагон-лаборатории.

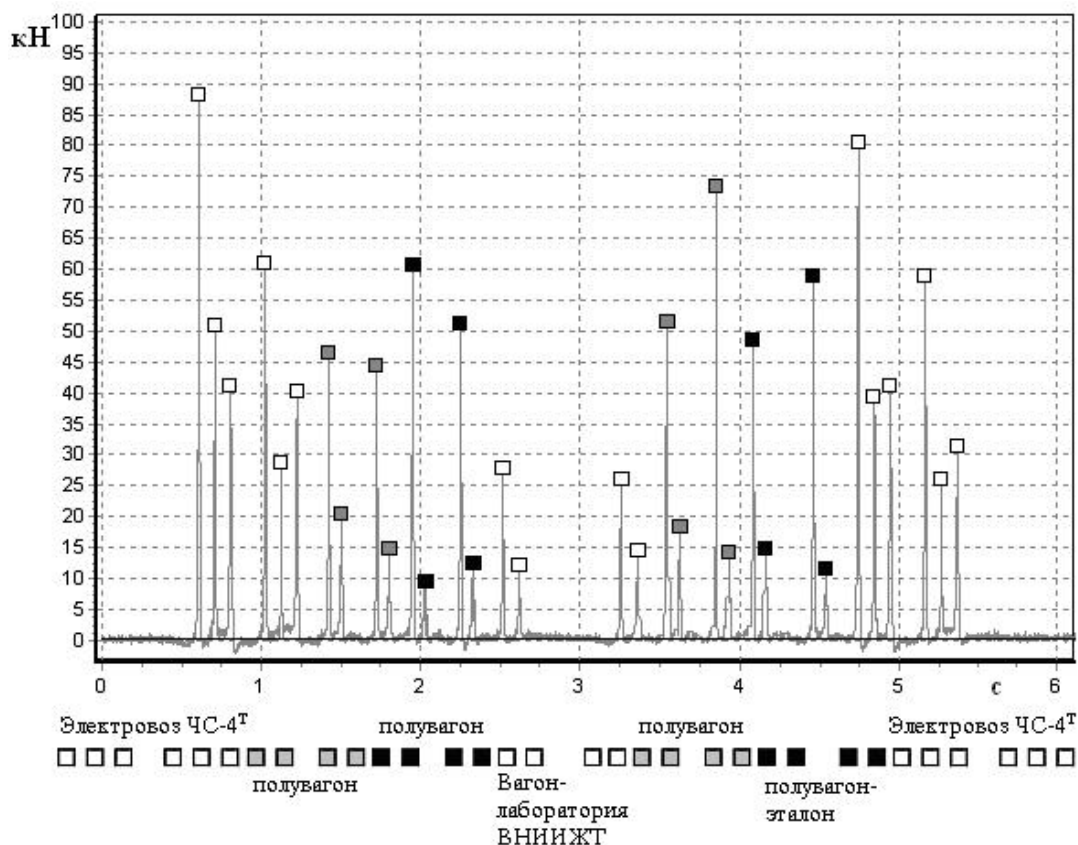


Рис. 3. Пример обработанной записи боковых сил

Запись каждого прибора в одном заезде представляет собой совокупность отдельных импульсов, соответствующих возникающим в одном и том же сечении пути напряжениям и нагрузкам под всеми осями опытного поезда. На приведенном рисунке хорошо видны величины боковых нагрузок на рельс в опытном сечении, возникающие при воздействии на него каждой колесной пары.

Следующим этапом обработки экспериментальных данных является объединение полученных значений по всем приборам одного типа, количество которых обычно составляет 12-16, согласно принятой методике в одну статистику. 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 (СКО) 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.

Для проведения анализа были выбраны варианты движения с максимальной скоростью в двух опытных участках, именно эти случаи характеризуются большим разбросом случайных величин, которыми в общем случае являются регистрируемые показатели взаимодействия.

На рис. 4 приведены зависимости характеристик напряжений в кромках подошвы рельсов по всем приборам в зависимости от количества проведенных заездов. На рис. 5 – в зависимости от количества используемых приборов по всем заездам. На приведенных графиках в качестве границы взято 0,02 значения ожидаемого показателя.

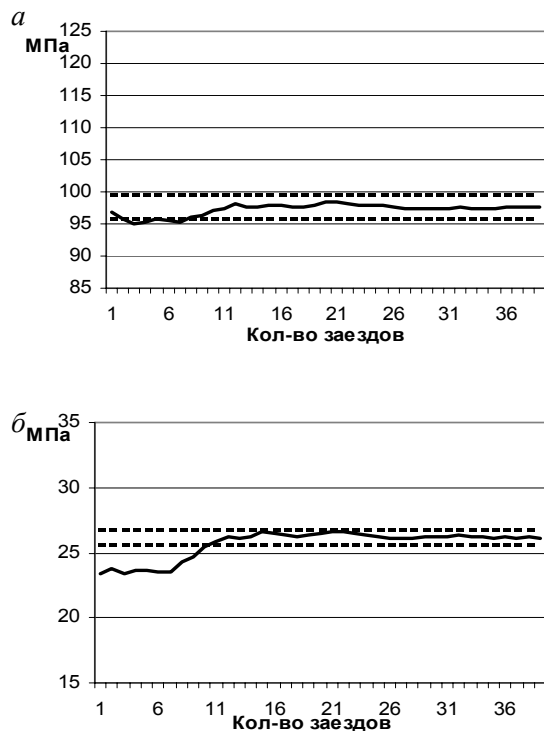


Рис. 4. Напряжения в кромках подошвы рельсов в кривой радиусом 350 м при скорости движения 80 км/ч в зависимости от количества заездов: а – среднее значение; б – среднеквадратическое отклонение

Как видно из рис. 4 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. Таким образом, проведение всех последующих заездов дает уточнение не превышающее 4 %.

Из рис. 5 видно, что значение отдельных приборов может оказываться более значительным. Движение вагона в общем случае описывается сложной нелинейной колебательной системой [2; 3]. Возникающие при наличии колебаний перемещения центра необрессоренных

масс тележки поперек рельсовой колеи приводят к значительным изменениям воздействия вагона на путь в горизонтальной плоскости.

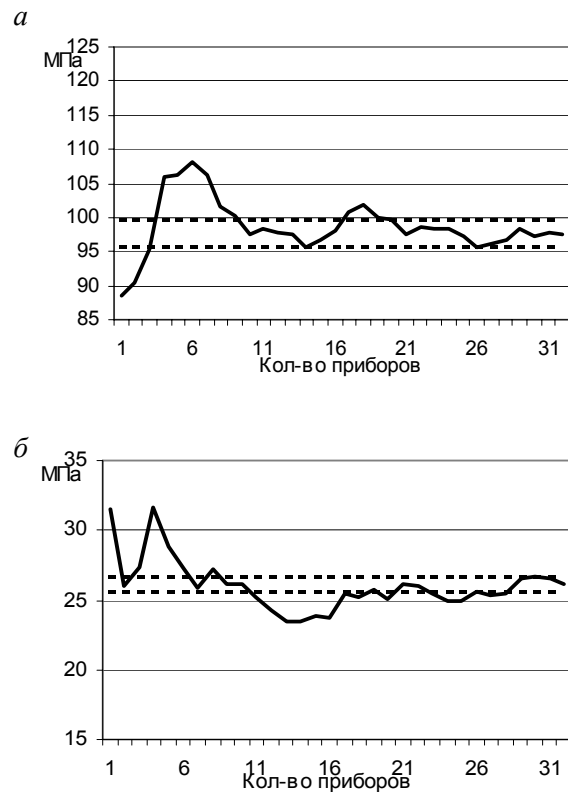


Рис. 5. Напряжения в кромках подошвы рельсов в кривой радиусом 350 м при скорости движения 80 км/ч в зависимости от количества приборов: а – среднее значение; б – среднеквадратическое отклонение

Разница в показателях воздействия в разных сечениях пути приводит к тому, что среднее значение напряжений в кромках подошвы рельсов (см. рис. 5) оказывается в пределах заданной области только после включения в совокупность 18 приборов, 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. 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 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 всей осей опытных экипажей (см. рис. 3);
- вычисление характеристик рассматриваемых случайных величин в зависимости от количества заездов в выборке (см. рис. 4 и 5);
- 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 приборов, которое затруднительно увеличивать при проведении испытаний. Полученные результаты показывают, что добавление в выборку дополнительного прибора может привести к резким изменениям среднего значения и среднеквадратического отклонения до 5 и 10 % соответственно в зависимости от места установки.

Оценка необходимого количества заездов и приборов до заездов производится по методике описанной в [4]. Для полученной максимальной вероятной величины с заданной точностью  $\Delta$  количество значений  $N$  данных как по заездам, так и по приборам, в выборке должно быть не менее чем:

$$N \geq \frac{9,375 \cdot S^2}{\Delta},$$

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

При таком методе обеспечивается вероятность 0,994.

В рассматриваемых испытаниях при движении в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч для обеспечения точности измерения 5 МПа необходимо было провести 254 измерения (по прошлым испытаниям 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. Но иногда 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.

Для анализа существующих подходов проведено сопоставление опытных записей по динамике вагонов и по воздействию на путь для вариантов движения с максимальной скоростью. Эти варианты были выбраны по двум основным причинам: на них было реализовано наибольшее количество опытных заездов, в них достигается максимальное непогашенное ускорение, при котором воздействие на наружную нить кривой является наибольшим.

Для каждого сечения пути, где были установлены приборы, были построены гистограммы распределения рамных сил, измеряемых на вагонах, и боковых сил, действующих на рельсы по всей совокупности заездов. Они были сведены в график (рис. 6) по координатам пути, где также приводятся ширина колеи и стрела изгиба по ручным промерам кривой, проведенным во время испытаний. Исследуемые сечения пути на графиках боковых и рамных сил разделены на две группы для лучшего отображения. Отдельно показаны нечетные и четные сечения пути.

На рис. 6 представлены данные, полученные при движении грузового полувагона в кривой радиусом 650 метров со скоростью 120 км/ч. Этот вариант был выбран, как характеризующийся наибольшим разбросом величин рамной силы на опытном участке.

Результаты сопоставления максимальных рамных сил на опытном участке, боковых нагрузок на рельсы и отступлений в геометрии рельсовой колеи показывают, что наибольшие силы взаимодействия могут быть смещены относительно наибольших отступлений (рис. 6).

Рамная сила может быть определена, как сумма боковых нагрузок от колесной пары на две рельсовые нити. При скорости движения 120 км/ч реализуется непогашенное ускорение  $0,7 \text{ м/с}^2$  и происходит почти постоянное набегание первой колесной пары на наружную нить кривой. При скорости движения 80 км/ч, близкой к равновесной для данной кривой, положение колесной пары в кривой меняется в больших пределах. При этом боковая нагрузка на внутренний рельс кривой, определяемая силой трения, может оказывать большее влияние на изменение рамной силы в круговой части кривой.

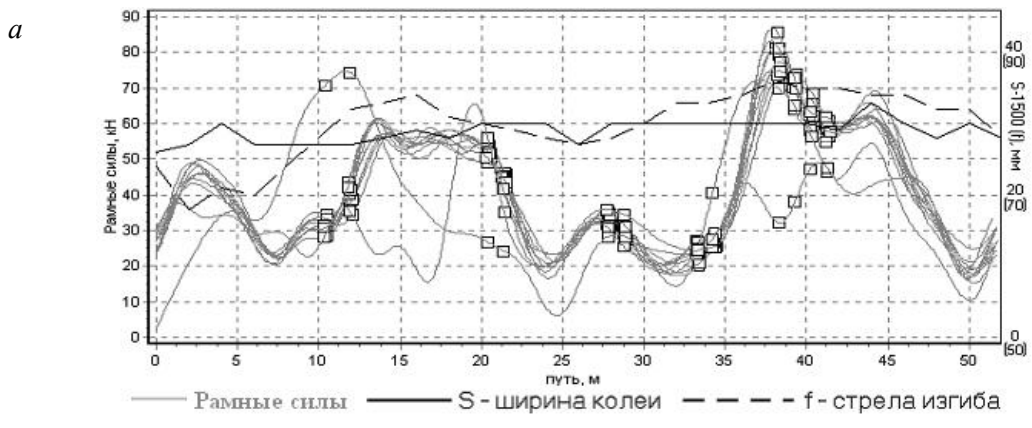


Рис. 6. Рамные силы 1-й оси полувагона и боковые силы на рельсах при воздействии на путь этой оси при движении в кривой 650 м при скорости движения 120 км/ч в направлении Майкоп-Ханская:  
 а – рамные силы на опытном участке, ширина колеи и стрела изгиба по данным ручных промеров;  
 б – гистограммы распределения рамных сил в сечениях пути, соответствующих приборам;  
 в – гистограммы распределения боковых сил на опытном участке (см. стр. .)

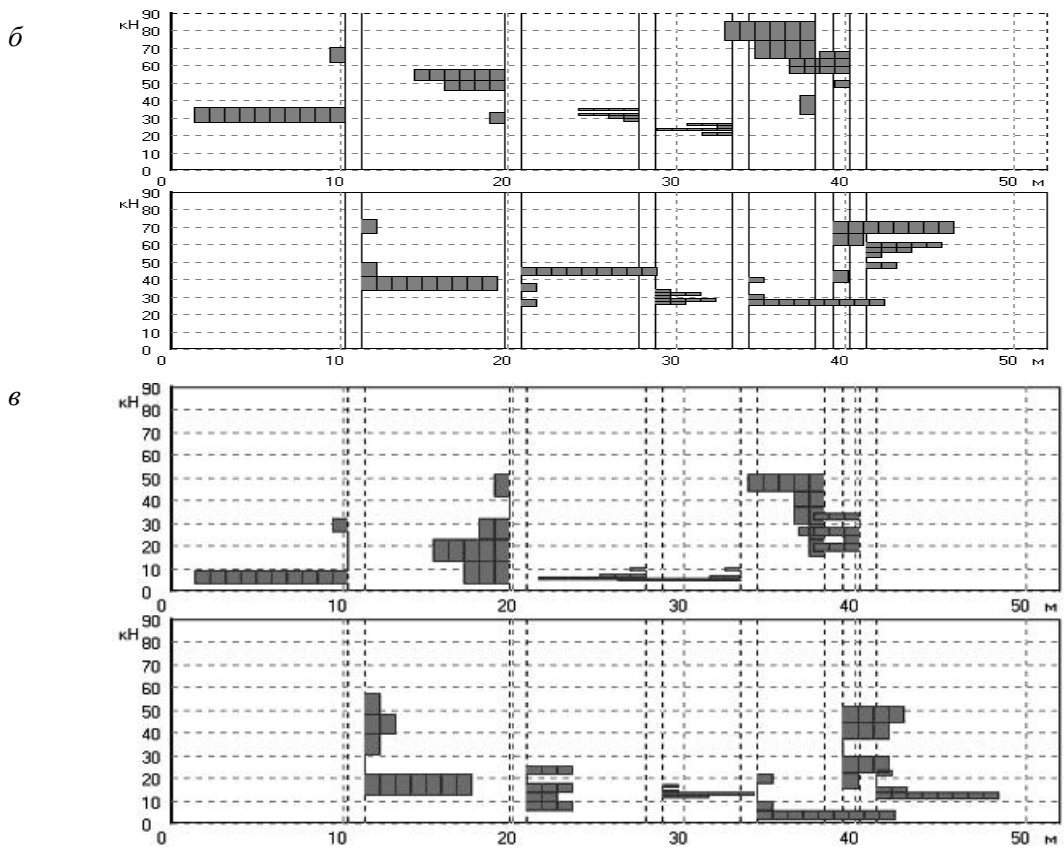


Рис. 6. Окончание

Рамная сила (см. рис. 6, а) на опытном участке имеет два выраженных максимума в районе участков с наибольшей кривизной. Почти во всех опытных поездках рамная сила достаточно хорошо воспроизводилась, разница составляла не более 10 кН. Однако в одном заезде произошло значительное изменение как по уровню, так и по характеру – сместился участок, где достигается максимальное значение.

Между рамными силами на вагоне и боковыми нагрузками на рельсы существует зависи-

мость (см. рис. 6, б и в). Она проявляется в одновременном достижении максимумов, значительном отличии одного заезда от остальных, меньшим разбросом значений в середине участка.

Как известно, в частности, из работ ВНИИЖТа [5; 6] максимальное боковое воздействие на путь в зоне горизонтальной неровности может не совпадать с максимумом неровности. Величина смещения определяется как параметрами самой неровности и участка пути, так и параметрами полувагона.

Было проведено моделирование движения полувагона на тележках 18-100 в кривой радиусом 650 м при одиночной горизонтальной неровности пути и движении со скоростями 80 и 120 км/ч. Целью данного исследования являлось определение влияния отступления в пути на места появления наибольших значений рамных и боковых сил. Результаты моделирования и заданная неровность приведены на рис. 7.

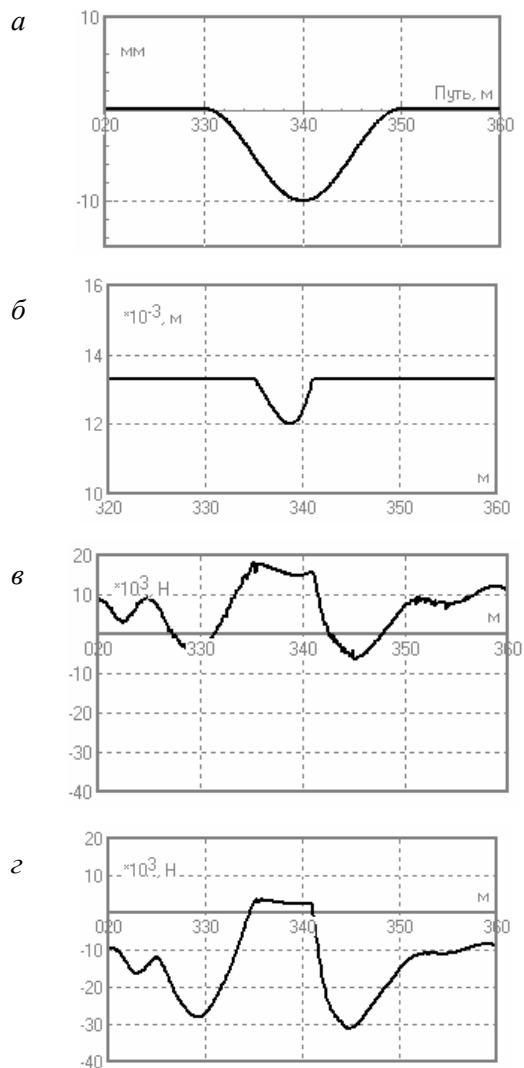


Рис. 7 – Моделирование движения полувагона на тележках 18-100 в кривой радиусом 650 м: а – горизонтальная неровность; б – боковое смещение колеса относительно рельса при скорости 80 км/ч; в – рамные силы при скорости движения 80 км/ч; г – боковые силы на наружной рельсовой нити при скорости движения 80 км/ч

Как видно из рис. 7 между максимумом неровности и наибольшими силами взаимодействия пути и вагона наблюдается смещение, примерно равное 2...4 м. Кроме того, на графике рамной силы при скорости 80 км/ч видна область, в которой рамная сила направлена в противоположную сторону. В этом случае набега-

ния колеса происходит (см. рис. 7, б), 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. Кроме того, определение мест установки приборов по рамной силе затруднительно в испытаниях, где одновременно испытываются два и более объектов, так как для них возможны разные места возникновения максимальных рамных сил.

Так как обычно, исходя из условий эксперимента возможно оборудование приборами 2–3 рельсовых звеньев длиной 25 м, то на этом участке следует 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 м. В этих выбранных участках следует располагать приборы с равномерным шагом в 1...2 м.

В том случае, если количество приборов превосходит измерительные возможности, возможно проведение установки дополнительных приборов и дополнительных заездов перед основным циклом испытаний с выявлением сечений пути, где показатели воздействия наибольшие. Для исключения лишних приборов имеет смысл применять предложенный ранее метод оценки среднего значения и СКО выборки. Кроме того, дополнительным индикатором может также являться и рамная сила с учетом неизвестной составляющей боковой силы на втором рельсе.

## Выводы

1. Применяемая оценка необходимого количества измерений не учитывает отдельно количество заездов и приборов и может использоваться только при одной и той же совокупности приборов.
2. Количество и места установки приборов могут значительно влиять на результаты испытаний даже на пути хорошего состояния.
3. Повторяемость результатов по заездам, по показателям динамики вагона и воздействия на путь достаточно велика.
4. Оценка по максимально вероятным величинам, определяемым с вероятностью 0,994, при обработке в большинстве случаев дают оценку сверху.

5. Между местами наибольших отступлений в пути и экстремальными значениями показателей взаимодействия пути и подвижного состава наблюдается смещение, зависящее от параметров участка пути и экипажа.

6. Сечения для установки приборов на пути должны определяться по отступлениям в геометрии пути; по результатам промеров пути следует выделять две-три зоны протяженностью 10...12 м, в которых равномерно размещаются приборы; возможно проведение вспомогательных заездов для выделения сечений, где воздействие на путь наибольшее.

7. Применение современных технических средств позволяет проводить оценку в реальном масштабе времени и корректировать необходимый объем данных для получения достоверных результатов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М., 1986.
2. Ромен Ю. С. О нелинейных колебаниях железнодорожного экипажа в кривых произвольного очертания // Сб. трудов ВНИИЖТ, – 1967. – Вып. 347, – С. 5–26.
3. Коган А. Я. Диссипативность в большом нелинейных колебаний четырехосного грузового вагона / А. Я. Коган, Ю. С. Ромен // Сб. трудов ВНИИЖТ, – 1967, – Вып. 347, – С. 27–32.
4. Вериго М. Ф. Методическое пособие по применению математической статистики в обработке опытных данных. – Новосибирск, 1964.
5. Чибизова Н. Г. Решение на АВМ частной задачи бокового воздействия полувагона на путь в кривой в зоне горизонтальной неровности // Сб. трудов ВНИИЖТ, – 1967, – Вып. 347. – С. 33–37.
6. Чибизова Н. Г. Исследование на АВМ воздействия грузового полувагона на путь в кривых с неровностями в плане // Сб. трудов ВНИИЖТ, – 1967, – Вып. 347, – С. 38–53.

Поступила в редколлегию 14.07.2006.