

УДК 625.033.3/ 625.04

ВКГ ОКП

№ госрегистрации

Инв. № _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор – Генеральный
конструктор ОАО «НПК Юницкого»
академик РАЕН



А.Э. Юницкий

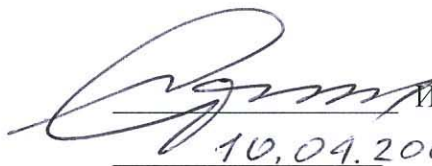
« 22 » апреля 2002 г.

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ОТ СТАУ С-1.2-2002-05-20**

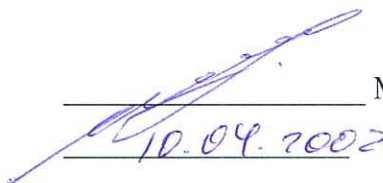
Создание стенда для испытаний путевой структуры струнной транспортной системы.
Исследование параметров состояния конструкции

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ
В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОГО, ВНЕШНЕГО СИЛОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ И ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ**

Заместитель Генерального директора –
Генерального конструктора
ОАО «НПК Юницкого»
кандидат технических наук, профессор

 И.С. Степанов
10.04.2002

Технический директор
ОАО «НПК Юницкого»
кандидат технических наук

 М.В. Иванов
10.04.2002.

Руководитель департамента
путевой структуры
ОАО «НПК Юницкого»
кандидат технических наук

 И.П. Дубатовка
10.04.2002 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Главный инженер ООО "Юниэкспро"
(разделы 1, 2, 3, 5)

С.В. Трофимович

Начальник производственного отдела
ООО "Юниэкспро"
(разделы 2 и 3)

И.Ю. Аниканов

Главный конструктор проекта
ООО "Автолет"
(разделы 3 и 4)

Ю.С. Павлов

Ведущий инженер ООО "Юниракурс"
(разделы 3 и 4)

М.В. Зеленицкий

Инженер- конструктор 1 категории
ООО "Юниракурс"
(разделы 3, 4, 5)

М.В. Некрасов

Начальник ОС СН ОАО «НПК Юницкого»

Б.З. Брод

Нормоконтролер

Н.Г. Карпова

РЕФЕРАТ

Отчет: 43 стр., 1 кн., 21 рис., 9 табл., 5 источников

ОПЫТНЫЙ УЧАСТОК. ПУТЕВАЯ СТРУКТУРА. СТРУННАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА. ТРАНСПОРТНЫЙ МОДУЛЬ. ИЗМЕРЕНИЯ, ДЕФОРМАЦИЯ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.

Объектом исследования является опытный участок путевой структуры струнной транспортной системы.

Цель работы – доказательство жизнеспособности струнных транспортных систем, разработка методики измерения геометрических параметров путевой структуры и параметров взаимодействия путевой структуры с транспортным модулем, исследование поведения путевой структуры при внешнем силовом воздействии и воздействии факторов времени.

В процессе исследования измерялись геометрические параметры путевой структуры, величины деформаций путевой структуры при воздействии на нее транспортного модуля, параметры взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой. Были отработаны методики измерения параметров в полевых условиях.

В ходе исследований полностью подтверждена правильность расчетных методов, использованных при проектировании опытного участка. Доказана стабильность напряженного состояния конструкций в течение 6 месяцев. Показано, что при проектировании струнных систем перспективным является использование пучка параллельных проволок, определены допуски на геометрические параметры путевой структуры, определены оптимальные соотношения размеров колеса транспортного модуля и головки рельса путевой структуры.

Полученные результаты будут использованы при проектировании полномасштабных струнных транспортных систем.

СОДЕРЖАНИЕ

Лист

1.	Введение.....	5
1.1.	Объект испытаний.....	5
1.2.	Исследуемые параметры.....	8
1.3.	Цели и задачи испытаний.....	9
2.	Методика проведения испытаний.....	10
2.1.	Методика измерения параметров состояния путевой структуры.....	10
2.1.1.	Измерение деформаций путевой структуры при статическом нагружении.....	10
2.1.2.	Измерение времени затухания колебаний путевой структуры.....	10
2.2.	Методика измерения геометрических параметров путевой структуры.....	13
2.2.1.	Измерение неровности рельсов на участке.....	13
2.2.2.	Измерение ширины колеи путевой структуры	18
2.2.3.	Измерение перепада высот между правым и левым рельсом.....	20
2.3.	Методика проведения испытаний по определению параметров взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой.....	21
2.3.1.	Измерение ширины полосы качения и износа головки рельса.....	21
2.3.2.	Измерение относительной твердости материала головки рельса в полосе качения.....	21
2.3.3.	Измерение тягового усилия качения транспортного модуля по путевой структуре.....	23
2.3.4.	Исследование параметров взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой.....	23
3.	Результаты испытаний.....	24
3.1.	Результаты измерения параметров состояния путевой структуры.....	24
3.2.	Результаты измерения геометрических параметров путевой структуры.....	24
3.3.	Результаты исследования параметров взаимодействия транспортного модуля с головкой путевой структуры.....	32
3.4.	Результаты тестовых проверок и внешних наблюдений за поведением элементов и узлов опытного участка	37
4.	Анализ результатов испытаний. Выводы.....	38
5.	Заключение.....	42
6.	Список использованных источников.....	43

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Объект испытаний

Опытный участок "Путевая структура" является впервые в мире реализованным полномасштабным фрагментом одного из вариантов реальной струнной транспортной системы протяженностью 150 м. Научно-техническая основа, принципы построения и перспективы использования струнных транспортных систем в различных областях жизнедеятельности человека подробно приведены в фундаментальной литературе [1,2]. Основное назначение опытного участка – с помощью натурных испытаний доказать принципиальную работоспособность подобных технических систем и получить экспериментальные данные, необходимые для дальнейшего проектирования полномасштабных струнных трасс, проверить правильность использованных алгоритмов технических расчетов конструкции.

Опытный участок (рис. 1.1.) был построен в октябре 2001 г. С этого момента ведется планомерное наблюдение за его поведением и исследование основных деталей и узлов конструкции как в ненагруженном состоянии, так и при внешнем силовом воздействии.



Рис. 1.1. Опытный участок путевой структуры

Опытный участок представляет собой однопутный стэнд с колеей 2,0 м и уклоном пути 1:10 в виде стальной предварительно напряженной канатно-балочной структуры на железобетонных фундаментах общим пролетом в осях 120 м (12+24+36+48 м).

Основными его элементами являются:

- свайные фундаменты и ростверки с применением буроинъекционных предварительно напряженных анкеров и буронабивных свай;
- анкерные опоры, расположенные в начале и конце стэнда;

- анкерные устройства на анкерных опорах;
- промежуточные опоры, расположенные с шагом 12...48 м;
- поддерживающие канаты, предварительно натянутые на анкерные опоры с суммарным усилием 2400 кН;
- растяжки поддерживающих канатов;
- стойки рельсов, расположенные на поддерживающих канатах;
- рельсы-струны, предварительно натянутые на анкерные опоры с суммарным усилием 1500 кН;
- жесткие поперечные перемычки, связывающие стойки рельсов с шагом 6,0 м;
- въездная и остановочная площадки, обеспечивающие переход пути из наклонного положения в горизонтальное.

Рельсы-струны, поддерживающие канаты, перемычки и стойки образуют путевую структуру.

При проектировании опытного участка в каждом из его элементов и узлов были использованы технические решения, эффективность которых должна была быть проверена в процессе испытаний опытного участка с тем, чтобы их можно было использовать в дальнейших разработках.

Фундаменты выполнены в свайном варианте. Сваи объединены монолитными железобетонными ростверками и представляют собой буроинъекционные предварительно напряженные наклонные анкера, работающие на растяжение (выдергивание) и буронабивные наклонные и вертикальные, работающие на сжатие.

Ростверки, объединяющие сваи, обеспечивают необходимую анкеровку свай и закладных изделий для крепления анкерных опор и стоек промежуточных опор.

На участке смонтированы две анкерные опоры, которые вместе с фундаментами являются основными силовыми элементами конструкции опытного участка.

Низкая анкерная опора - это выступающие из тела ростверка закладные детали из усиленных прокатных двутавров.

Высокая анкерная опора представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из наклонных основных стоек (труба $\Phi 820 \times 14$), вертикальных, наклонных и горизонтальных продольных связей (труба $\Phi 273 \times 9$), поперечных решетчатых связей (труба $\Phi 273 \times 9$), горизонтального ригеля (трубы $\Phi 820 \times 14$), объединенные в поперечном направлении трубами ($\Phi 530 \times 9$) с упорами для крепления анкерных устройств.

Промежуточные опоры - стойки (труба $\Phi 203 \times 6$), объединенные в поперечном направлении решетчатыми связями (труба $\Phi 83 \times 6$).

На анкерных и промежуточных опорах смонтирована путевая структура участка.

На анкерных опорах размещены анкерные устройства, которые спроектированы исходя из условий заделки канатов (необходимость горизонтальной и вертикальной разводки канатов на опоре) и передачи усилия предварительного напряжения на анкерные опоры. Анкерные устройства выполнены из сварных листов.

Для формирования поддерживающей системы использованы серийно выпускаемые промышленностью оцинкованные канаты двойной свивки ГОСТ3064-80 диаметром 27 мм. Поддерживающая система образована под каждым рельсом путевой структуры из трех уложенных в ряд таких канатов. На промежуточных опорах поддерживающие канаты располагаются на специальных ложементах, обеспечивающих возможность их поворота.

Растяжки поддерживающих канатов выполнены из проката круглого сечения диаметром от 16 до 42 мм. Приопорные растяжки снабжены замкнутыми талрепами, обеспечивающими возможность натяжения с усилием до 20,0 тс. На каждом из четырех пролетов опытного участка с помощью растяжек были реализованы разные силовые схемы

нагрузки путевой структуры, что давало возможность проверить на практике их эффективность и использовать при проектировании новых струнных трасс.

Рельсы-струны – это серийно выпускаемые цельнотянутые трубы 102 х 8 – 12Х18Н10Т ГОСТ 9940-72, сваренные в единую "нитку". Внутри труб проложены несущие канаты-струны, а пространство между внутренней стенкой труб и канатами заполнено специальным связующим на основе модифицированного бетона. Трубы и проложенные внутри них канаты натянуты с заданным усилием между двух анкерных опор и закреплены в натянутом состоянии на анкерных устройствах.

Рельсы-трубы через телескопические стойки опираются на поддерживающие канаты. Стойки снабжены седловидными опорами для крепления к поддерживающим канатам. Шаг стоек - 1,2 м. Между рельсами с шагом 6,0 м закреплены жесткие перемычки, обеспечивающие заданный размер колеи.

Более подробно технические характеристики и особенности конструкции опытного участка приведены в / 3 /.

В качестве имитатора транспортного модуля (далее по тексту транспортный модуль) был использован грузовой полноприводной автомобиль модели ЗиЛ-131 (рис.1.2), специально переоборудованный в соответствии с технической документацией, разработанной конструкторскими подразделениями ОАО "НПК Юницкого" / 4 /.



Рис 1.2. Транспортный модуль

Транспортный модуль был оснащен специально разработанными двухребордными колесами (рис. 1.3.) с профилем рабочей поверхности, соответствующей профилю головки рельса (рис. 1.4.) В конструкции колес было предусмотрено обеспечение боковой податливости в целях компенсации возможных боковых колебаний транспортного модуля при движении по путевой структуре.

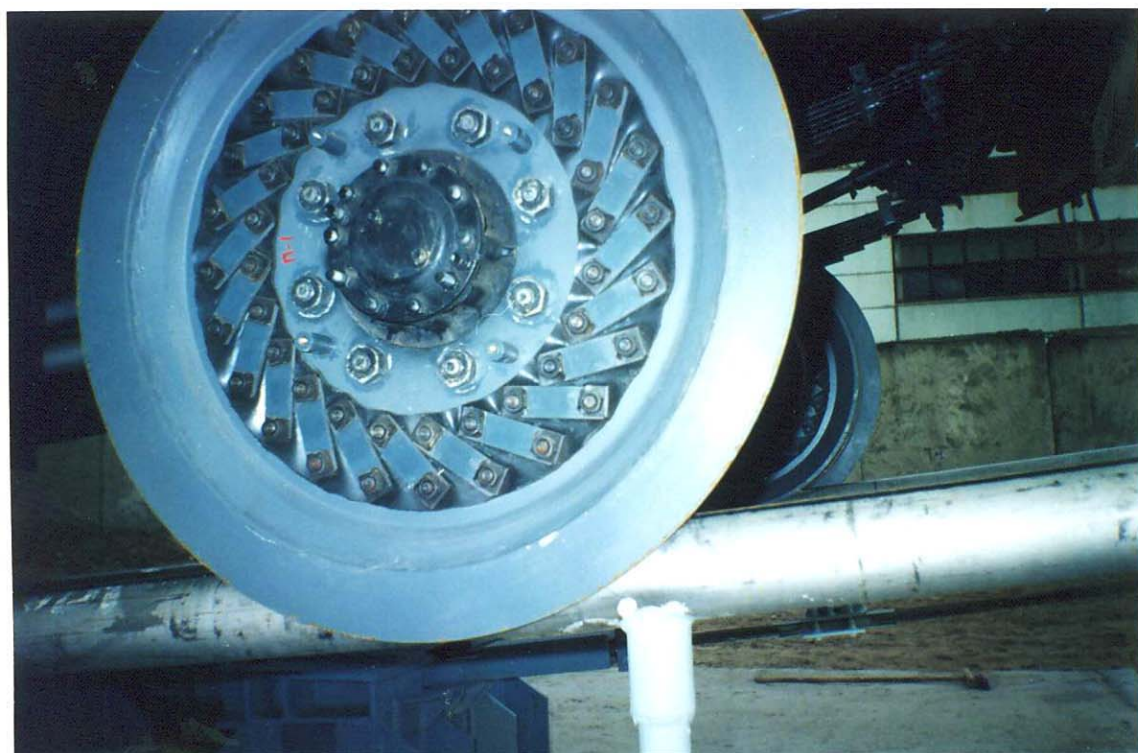
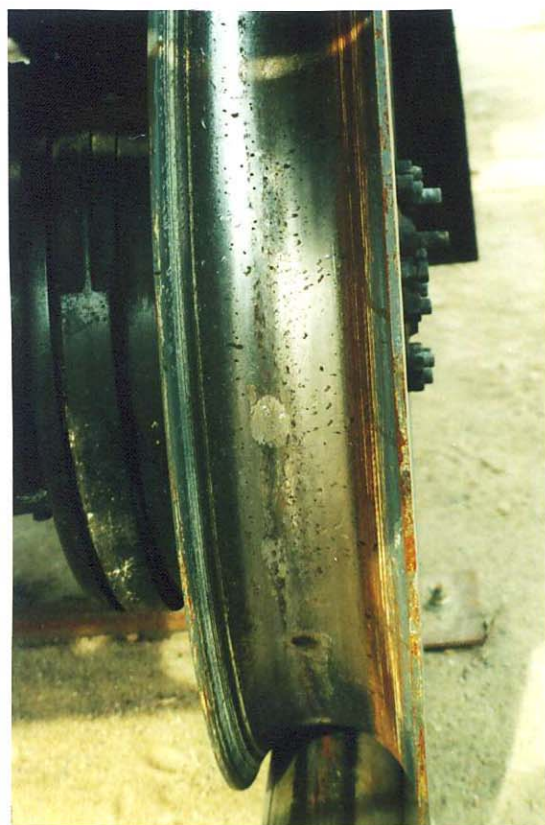


Рис. 1.3. Колесо транспортного модуля.

1.2. Исследуемые параметры.



Параметры, измеряемые или контролируемые в ходе проведения испытаний, можно разбить на две группы. Первая группа – это параметры, отвечающие за работоспособность системы и характеризующие состояние путевой структуры в зависимости от фактора времени и внешних силовых нагрузок. Вторая группа – это параметры, характеризующие взаимодействие транспортного модуля с рельсами путевой структуры. В рамках первой группы исследовались

- стабильность во времени напряженного состояния элементов путевой структуры;
- абсолютная величина деформации путевой структуры в контрольных точках при статическом нагружении усилием заданной величины;
- состояние узлов, в которых осуществлено крепление концов натянутых тросов поддерживающей системы и несущей систем труб;

Рис.1.4. Рабочая поверхность колеса - состояние фундаментов анкерных опор;
- состояние металлоконструкций анкерных опор и поведение.

В рамках второй группы исследовались:

- особенности динамики взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой при различных режимах его движения;
- характер взаимодействия колеса транспортного модуля с головкой рельсов путевой структуры при различных атмосферных явлениях;
- характер взаимодействия колеса с головкой рельса при экстремальных условиях;
- характер взаимодействия колеса с головкой рельса при различной энерговооруженности транспортного модуля.

1.3. Цели и задачи испытаний

Строительство опытного участка "Путевая структура" было предпринято с целью решения многих вопросов, связанных с развитием струнных транспортных систем (СТС). Эти вопросы применительно к первому опыту строительства струнной транспортной системы можно конкретизировать следующим образом:

- доказательство жизнеспособности струнных транспортных систем;
- отработка конструкции и технологии монтажа элементов путевой структуры СТС;
- исследование свойств путевой структуры СТС при различных нагрузках ее транспортным средством, а также при климатических воздействиях и воздействиях факторов времени;
- исследование процессов, происходящих при взаимодействии колес транспортного средства и рельсов-струн путевой структуры.

Учитывая тот факт, что подобная техническая система реализуется в натуре впервые, при проведении работ была поставлена еще одна цель: разработать и провести опытную апробацию методик контроля и измерения параметров конструкции как во время монтажа, так и в процессе эксплуатации.

Для достижения поставленных целей при осуществлении испытаний были поставлены следующие задачи:

- произвести опытную отработку методик измерения и исследования параметров, приведенных в разделе 1.2;
- произвести в течение контрольного отрезка времени измерение параметров работоспособности системы;
- произвести исследование параметров взаимодействия колеса транспортного модуля с головкой рельса путевой структуры при различных условиях силового и внешнего взаимодействия;
- на основании полученных экспериментальных данных выработать технические предложения для использования их при конструировании и при монтаже СТС различных сфер применения.

В настоящем отчете приводятся результаты опытно-экспериментальных исследований работоспособности путевой структуры, проведенных в течение шести месяцев, а также результаты сопоставления опытных данных с результатами инженерных расчетов, выполненных на стадии конструирования участка.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

2.1. Методика измерения параметров состояния путевой структуры

2.1.1. Измерение деформаций путевой структуры при статическом нагружении

Экспериментальное исследование параметров путевой структуры заключалась в проведении цикла статических и динамических испытаний при внешнем воздействии заданным усилием.

В качестве источника внешнего силового воздействия использовался транспортный модуль.

Методика проведения статических испытаний заключалась в следующем. Транспортный модуль, являясь в данном случае контрольным грузом массой 6750 кг, перемещался по путевой структуре и фиксировался последовательно в контрольных точках, расположенных в пролетах между анкерными и промежуточными опорами. Всего было выбрано 16 контрольных точек (рис. 2.1.1). Фиксация транспортного модуля осуществлялась по совмещению колеса второй по ходу оси с контрольной точкой. После остановки модуля в каждой точке осуществлялась выдержка системы в течение 1 – 2 минуты для ее успокоения. Измерения величины деформации путевой структуры в каждой контрольной точке проводились для пары рельсов путем измерения смещения контрольной метки на вертикальном отвесе относительно нулевой линии (рис. 2.1.2). В каждой контрольной точке к поддерживающим канатам укреплялась стальная струна с грузом, выполнявшим роль отвеса. Отвесы устанавливались как под левым, так и под правым рельсами. Между отвесами на стойках, вбитых в землю, натягивалась горизонтальная струна, служившая линией относительного нуля для данной контрольной точки. В ненагруженном состоянии в месте пересечения отвеса с нулевой линией на первом укреплялся контрольный флажок. При появлении деформации в контрольной точке флажок смещался относительно нулевой линии. Величина этого смещения и являлась мерой деформации. Измерения смещения флажка производились металлической линейкой ГОСТ 427-75 с ценой деления 1 мм. Оцененная погрешность измерения в данном случае составляла + 3 мм и складывалась из погрешности шкалы линейки, погрешности позиционирования при считывании показаний, конечности толщины линии относительного нуля. В целях максимального исключения влияния внешних факторов на результаты измерений и повышения их достоверности, испытания проводились в безветренную погоду при шестикратном повторении цикла нагружений. В качестве результатов измерений принимались среднеарифметические значения результатов шести измерений в каждой точке. Расчет значений производился по формуле / 5 /:

$$X = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6) / 6, \quad (2.1.1.)$$

где: X_1 - X_6 – результаты единичных измерений.

2.1.2. Измерение времени затухания колебаний путевой структуры

Затухание колебаний линейной системы, натянутой между двумя точками, вызванных кратковременным внешним силовым воздействием в контрольной точке, служит косвенным показателем ее жесткости. На этапе исследований стабильности путевой структуры во времени этот показатель может служить дополнительным параметром к данным, полученным методом статического нагружения.

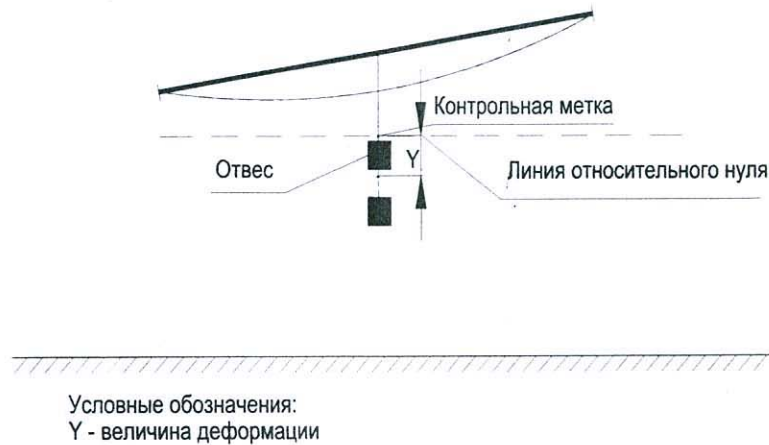


Рис. 2.1.2 Схема измерения прогибов путевой структуры.

С этой целью была разработана простая методика измерения времени затухания колебаний путевой структуры. Суть методики заключается в следующем: транспортный модуль, стартуя с исходной позиции, набирает заданную скорость и по команде резко тормозит до полной остановки в контрольной точке. При этом часть энергии движения, которую имел модуль при подходе к контрольной точке, по нормали к плоскости колеи передается путевой структуре. Это резкое силовое воздействие приводит к тому, что на заданном пролете инициируются колебания путевой структуры в направлении, перпендикулярном плоскости колеи. Эти колебания затухают во времени до полного успокоения системы. В процессе проведения испытаний производится измерение времени затухания инициированных колебаний. Эксперимент проводится по следующей схеме: на струнах отвесов, используемых для проведения измерений деформаций путевой структуры, описанных в п. 2.1.1, в точках КТ 1,2,4,6,8,11,13,15 контрольные флажки совмещаются с линией нулевого уровня. После этого осуществляется движение транспортного модуля из исходного положения до заданной контрольной точки с резким торможением и полной остановкой. При этом совмещается ось среднего моста модуля с контрольной точкой. По штатному спидометру транспортного модуля фиксируется его скорость в момент, предшествующий торможению. С помощью секундомера, обеспечивающего точность измерения не хуже 0.1 секунды, измеряется время полного затухания инициированных резкой остановкой транспортного модуля колебаний путевой структуры. Периодом затухания считается время от момента полной остановки транспортного модуля, определенного визуально, до момента прекращения колебаний. Моментом прекращения колебаний считается момент времени, когда амплитуда колебаний контрольного флажка отвеса визуально не будет превышать 1 мм. Амплитуда колебаний в завершающей стадии контролируется с помощью металлической линейки, ГОСТ 427-75 с ценой деления 1 мм.

Измерения времени затухания проводятся одновременно на правом и левом рельсах.

Разработанная методика не является в общетехническом плане достаточно точной и зависит во многом от индивидуальной реакции испытателя, производящего измерения.

Но, являясь, простой в реализации, она может с успехом применяться в качестве источника дополнительной информации о состоянии напряженной системы. Проведенные оценки и специальные тесты показали, что реальная точность измерения времени затухания колебаний по приведенной выше методике составляет 1.5 – 2 секунды.

Для повышения достоверности получаемых данных и максимального исключения случайных факторов, влияющих на точность, измерения в каждой контрольной точке проводятся не менее трех раз, а обработка результатов измерений проводится по соотношению, аналогичному формуле 2.1.1.

2.2. Методика измерения геометрических параметров путевой структуры

2.2.1. Измерение неровности рельсов на участке

Показатель неровности рельсового пути применительно к путевой структуре опытного участка - это отклонение координат реальной контрольной точки, от координат точки, расположенной на расчетной образующей головки рельса. Показатели неровности характеризуют степень обеспечения точности геометрических размеров элементов путевой структуры и определяются как геометрическими параметрами используемых материалов, так и возможностями технологических приспособлений, применяемых при монтаже. Достаточно отметить, что отклонение диаметра используемых в качестве рельсов труб от номинального значения на длине 6 – 7 метров составляло в отдельных случаях до 3 мм, а "саблевидность" в состоянии поставки доходила до 50 мм. Измерения параметров неровности позволяют в совокупности с результатами исследований взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой сделать вывод об уровне требований к точности обеспечения основных геометрических размеров путевой структуры и уровне требований к используемым материалам, закладываемых в конструкцию путевой структуры.

Анализ особенностей организации путевой структуры и технических возможностей для проведения измерений на высоте до 15 м при протяженности контрольного участка до 100 м показал, что наиболее предпочтительными методами измерения параметров неровностей являются бесконтактные методы. На стадии осуществления поисковых работ была проработана возможность использования для проведения измерений луча лазера (для создания идеальной визирной линии). При этом система измерения, построенная на основе лазерного визира, могла бы быть достаточно простой и информативной. Но при технической проработке этого способа организации измерений разработчики методики столкнулись с тем фактом, что у доступных по цене лазеров расходимость светового луча такова, что контрольное пятно на расстоянии до 30 м может иметь размеры в самом лучшем случае до 50 мм. Это делает практически невозможным использование такого лазера для измерений. Имеющиеся в продаже геодезические приборы (например лазерные тахеометры), в составе которых использован лазер, могли бы быть использованы для измерений, но слишком высокая цена этих приборов (до 15000 \$) делает их использование при проведении испытаний опытного участка нецелесообразным.

При разработке методики измерения параметров неровности путевой структуры был заложен принцип простоты реализации, достаточной точности, информативности и дешевизны. В результате были разработаны две методики измерения с использованием обычного теодолита, который используется при проведении специальных и общестроительных работ.

Методика 1. Измерение неровности рельсов методом пересчета полярных координат в прямоугольные

Основа этой методики заключается в проведении измерений координат контрольной точки относительно ее проектного положения. Измерения производятся на локальных участках путевой структуры. При проведении испытаний измеряются углы отклонения: в горизонтальной плоскости - β и вертикальной плоскости - α , а также расстояние L от точки начала отсчета до контрольной точки (рис 2.2.1.).



Рис. 2.2.1. Схема измерения полярных координат контрольной точки.

Расчет координат отклонения контрольной точки на выбранном участке производится по следующим формулам:

$$X_i \cong L_i \sin \beta_i \quad (2.2.1.),$$

$$Y_i \cong L_i \sin (\alpha_i - \alpha_n) \quad (2.2.2.),$$

где: X – координата горизонтального отклонения контрольной точки;
 Y – координата вертикального отклонения контрольной точки;
 L – расстояние от места установки измерительного прибора до места установки мишени на измерительном приспособлении;
 α – угол между визирной осью и ее проекцией на горизонтальной плоскости;
 β – угол между проекциями нулевой и визирной оси на горизонтальной плоскости.

Для реализации этой методики были использованы: теодолит модели ЗТ2КП (точность отсчета углов – 2"); рулетка модели Р100УЗК (100 метров, цена деления – 1 мм, класс точности – 3); уровень брусковый (база – 500 мм, точность пузырькового указателя – 15 "/ деление); линейка металлическая (длина 500 мм, ГОСТ 427-75); плита разметочная размером 400 x 600 мм.

Для использования теодолита в измерительной схеме непосредственно на путевой структуре был сконструирован и изготовлен специальный кронштейн, позволяющий устанавливать теодолит на рельсе (рис.2.2.2). Были сконструированы и изготовлены два измерительных приспособления (рис.2.2.3), которые представляют собой изогнутую стойку, закрепленную на призме. На конце стойки закрепляется отвес, на струне которого закреплена мишень.



Рис. 2.2.2. Система крепления теодолита к головке рельса



Рис. 2.2.3. Измерительное приспособление

Перед проведением измерений на путевой структуре в лабораторных условиях производится настройка измерительного приспособления. Суть этой операции заключается в том, что приспособление устанавливается на разметочную плиту, предварительно выставленную с помощью уровня в горизонтальное положение. После этого, путем поворота стойки приспособления относительно своей оси, добиваются совмещения острия груза подвеса с ребром призмы (рис.2.2.4). В таком положении стойка надежно фиксируется на призме. В процессе проведения измерений положение стойки меняется.

После операции настройки измерительного приспособления производится настройка измерительной системы в целом (рис 2.2.5). Работы производятся в следующей последовательности:

- первое измерительное приспособление устанавливается на правый рельс в первой контрольной точке исследуемого участка;
- второе измерительное приспособление устанавливается на правом рельсе в последней контрольной точке исследуемого участка;
- кронштейн крепления теодолита устанавливается на расстоянии 2-3 м от первого измерительного приспособления;

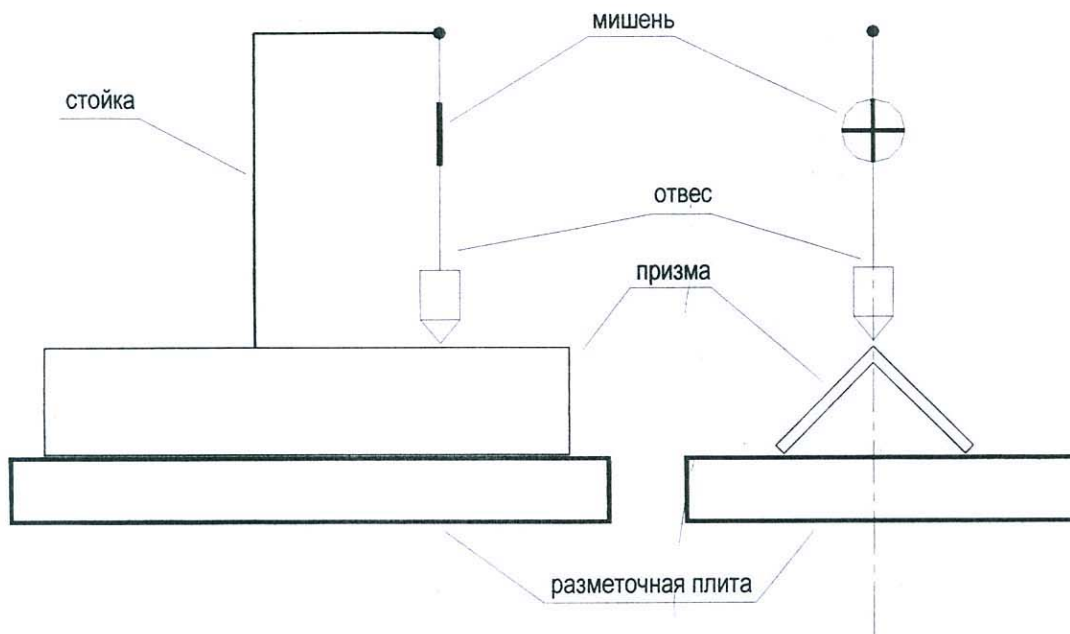


Рис. 2.2.4. Схема настройки измерительного приспособления

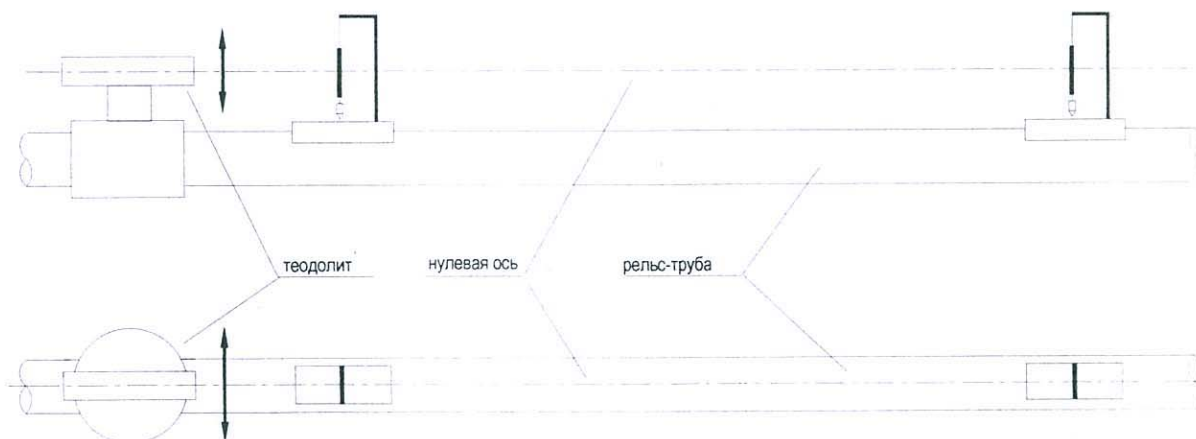


Рис. 2.2.5 Схема настройки измерительной системы.

- регулировочными гайками переходная плита кронштейна выводится в горизонтальное положение;
- теодолит устанавливается на переходную плиту кронштейна, платформа теодолита выводится в горизонтальное положение;
- оба измерительных приспособления устанавливаются на рельсе так, чтобы острие груза отвеса совпало бы с ребром опорной призмы;
- измеряется расстояние от визирной оси теодолита до поверхности рельса;
- мишени измерительных приспособлений устанавливаются таким образом, чтобы точки перекрестия находились на расстоянии от поверхности рельса, равном измеренному ранее расстоянию от визирной оси теодолита от поверхности рельса;

- снимается первое измерительное приспособление, после чего визирная труба теодолита наводится на перекрестье мишени второго измерительного приспособления и фиксируется положение теодолита;

- первое измерительное приспособление устанавливается на прежнее место и фокусируется перекрестье теодолита мишени измерительного приспособления;

- в случае появления отклонения перекрестья теодолита от перекрестья первой мишени (наличия "невязки"), теодолит перемещается по горизонтали и вертикали в сторону уменьшения "невязки", после чего его платформа приводится в горизонтальное положение;

- операция настройки повторяется несколько раз до полного совмещения визирной оси теодолита и нулевой линии, проходящей через перекрестья мишеней обеих измерительных приспособлений (рис. 2.2.5).

После проведения настроечных операций производятся измерения. Измерительное приспособление последовательно устанавливается в контрольных точках на выбранном участке, труба теодолита наводится и фокусируется на перекрестье мишени приспособления и производятся измерения вертикальных и горизонтальных углов для каждой контрольной точки. При этом измеряется расстояния L от точки установки теодолита до точки установки измерительного приспособления. Измерения по описанной выше методике производятся для каждой контрольной точки не менее трех раз. В качестве результата измерения принимается среднее значение величины рассчитанное по соотношению аналогичному (2.1.1). Подобным же способом производятся измерения для левого рельса.

Для обработки результатов измерений используются формулы (2.2.1., 2.2.2.), по которым вычисляются координаты отклонения контрольной точки от ее проектного положения.

Методика 2. Прямые измерение неровности рельсов

Эта методика основана на использовании тех же технических средств и процедуры настройки, что и вышеописанная. Вся разница заключается в том, что положение зрительной трубы теодолита в ходе измерений не изменяется, координаты отклонения контрольной точки отсчитываются непосредственно по размерной шкале мишени измерительного приспособления, от ее центра, до перекрестья зрительной трубы теодолита.

Сравнительный анализ результатов использования приведенных выше двух методик показал, что первая методика, более сложна в обработке результатов и трудоемка при проведении измерений, но позволяет получить данные для криволинейных участков путевой структуры перспективных трасс СТС. Проведенные оценки и анализ составляющих погрешности измерений показал, что сильное влияние на точность результата оказывает расстояние от теодолита до измерительного приспособления. Результаты с точностью до 2 мм при проведении измерения с помощью первой методики можно получить на участке 20 – 30 м. По второй методике результаты с точностью до 2 мм можно получить на расстоянии между теодолитом и измерительным приспособлением 40 – 50 м. Поэтому, в качестве рабочей для проведения измерений, была применена вторая методика.

2.2.2. Измерение ширины колеи путевой структуры

Для измерения ширины колеи путевой структуры были разработаны и апробированы две методики.

Первая методика базируется на использовании измерительных приспособлений, применяемых для измерения неровностей рельсов. Их описание и способы настройки приведены в разделе 2.2.1. При проведении измерений приспособления устанавливаются в контрольной точке одновременно на правый и левый рельс. После установки каждое приспособление настраивается таким образом, чтобы острое груза отвеса совпало бы с ребром призмы. После этого с помощью рулетки производится измерение расстояние между ребрами призм обоих приспособлений (рис. 2.2.6.)

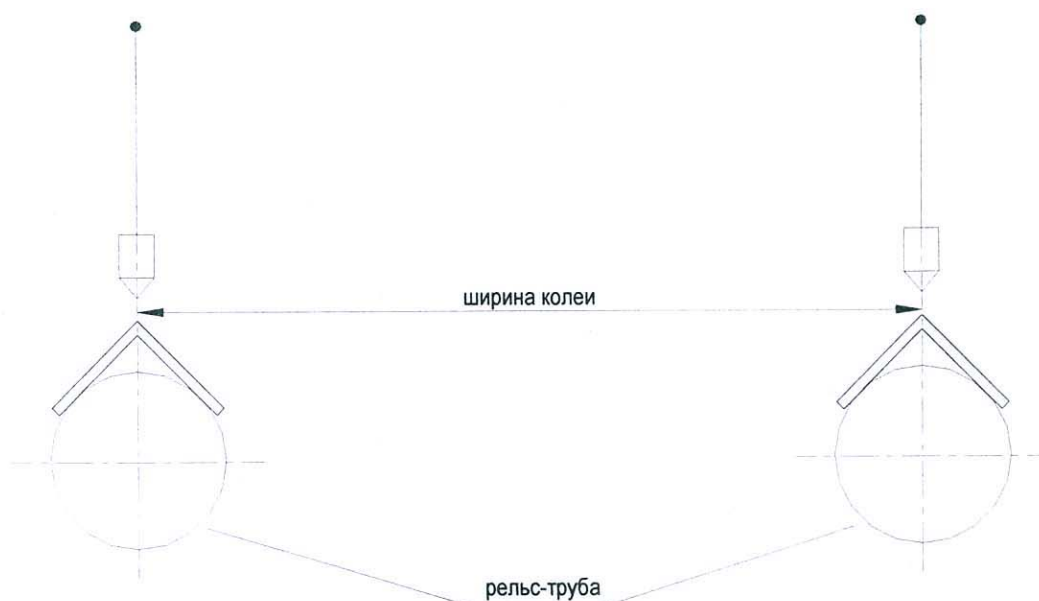


Рис. 2.2.6. Схема измерения ширины колеи

Этот метод измерения привлекателен тем, что позволяет получить непосредственно значение ширины колеи, измеренной между образующими головки рельсов. Но точность полученных таким методом результатов невелика, т.к. на базе в 2000 мм измерение рулеткой дает большую погрешность. При таком методе всегда присутствует еще и погрешность приведения, т.е. погрешность, вызванная возможным смещением одного измерительного приспособления относительно другого в контрольной точке.

Вторая методика позволяет производить прямые измерения ширины колеи с помощью специальной путеизмерительной линейки, разработанной на основе стандартной рейки, используемой при проведении геодезических измерений. Эта рейка имеет шкалу отсчета с ценой деления 1 мм и раздвигается на величину большую ширины колеи. Это позволяет установить при измерении жесткую связь между обеими рельсами и избежать погрешности отклонения от перпендикулярности измерительной линии.

Схема измерения ширины колеи линейкой приведена на рис 2.2.7, а внешний вид - на рис. 2.2.8. Точность измерения ширины колеи линейкой составляет 1.5–2 мм.

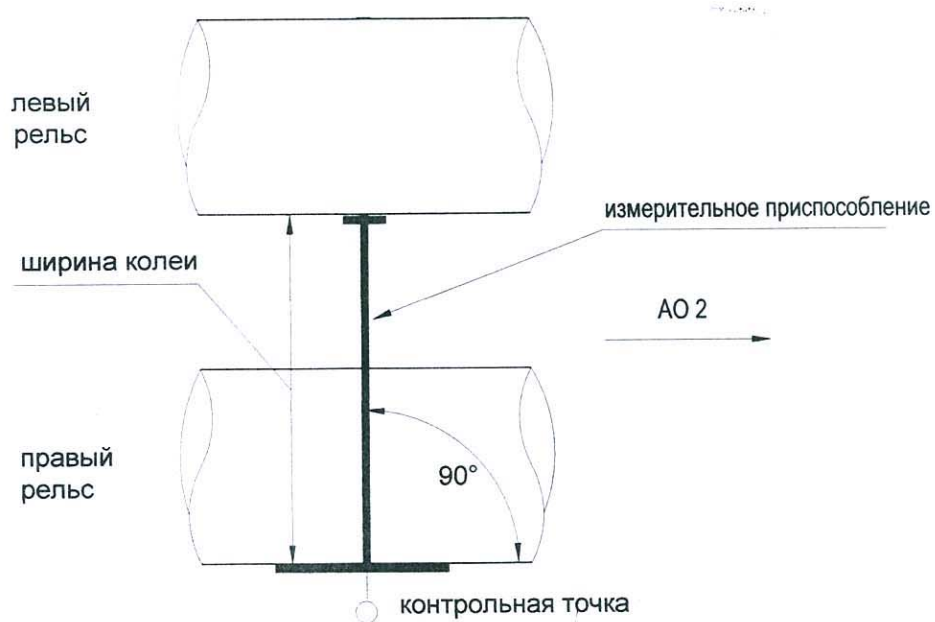


Рис. 2.2.7. Схема измерения ширины колеи линейкой.



Рис. 2.2.8 Измерительная линейка.

2.2.3. Измерение перепада высот между правым и левым рельсом

При проведении испытаний производится определение перепада высот между точками пересечения вертикальных осей симметрии левого и правого рельса с их поверхностями, измеренное в плоскости, перпендикулярной проектной плоскости рельсовой колеи.

Для проведения измерений используются два измерительных приспособления, описанные в разделе 2.2.1., и теодолит.

При проведении измерений теодолит, закрепленный на штатном штативе, устанавливается на въездной площадке в трех метрах от контрольной точки на равном удалении от левого и правого рельсов. Платформа теодолита выставляется в горизонтальное положение. Производится настройка измерительных приспособлений описанным выше способом и установка их на головки рельсов в контрольной точке перпендикулярно проектной оси колеи.

Теодолит наводится на перекрестье мишени на правом рельсе, после чего, не меняя угол наклона зрительной трубы, теодолит наводится на вертикальную линию перекрестья мишени на левом рельсе. По миллиметровой разметке на вертикальной линии перекрестья мишени считывается значение перепада высот (рис.2.2.9.).

Описанные выше операции производятся не менее трех раз для каждой контрольной точки.

Точность измерения превышения описанным методом составляет 1 – 1.5 мм

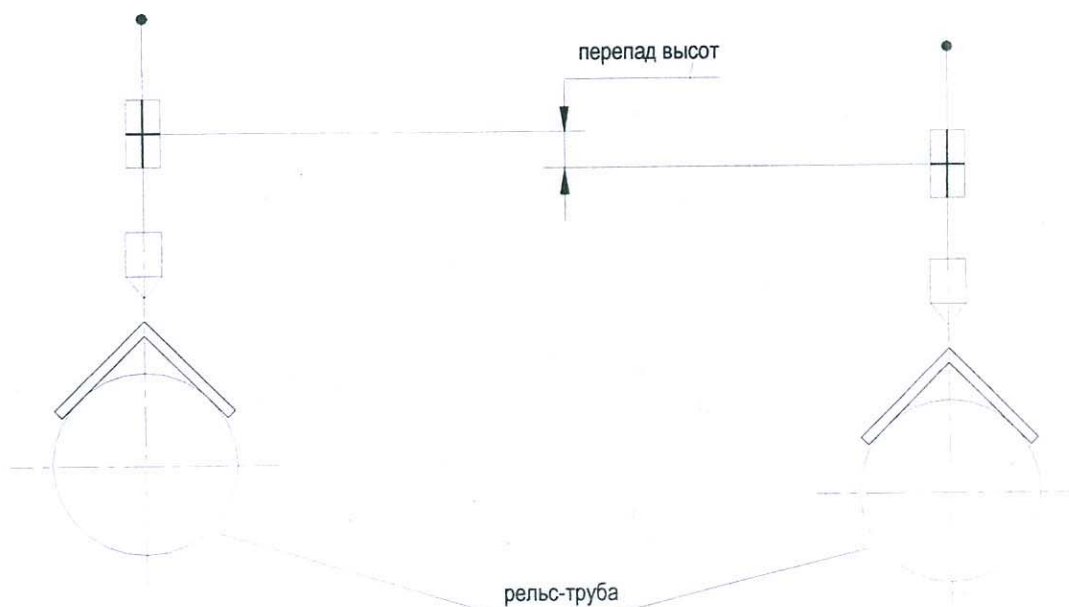


Рис. 2.2.9 Схема измерения превышения одного рельса над другим

2.3. Методика проведения испытаний по определению параметров взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой

2.3.1. Измерение ширины полосы качения и износа головки рельса

При осуществлении прогонов транспортного модуля по путевой структуре его колеса взаимодействуют с головками рельсов. Учитывая особенности конструкции внутренней части колеса транспортного модуля, не трудно предположить, что реальный контакт колеса с головкой рельса будет происходить по некоторой полосе конечных размеров. Причем ширина полосы и ее расположение на поверхности головки рельса и внутренней поверхности колеса будут зависеть от соотношения механических свойств металлов, из которых изготовлены колесо и рельс, а также от величины удельной нагрузки со стороны транспортного модуля на рельс.

В процессе проведения испытаний на опытном участке производились периодические измерения ширины полосы качения на головках рельсов и измерение диаметра рельса в полосе качения относительно невозмущенной зоны. Измерения ширины полосы качения производились с помощью рулетки, с ценой деления 1 мм. Учитывая тот факт, что границы полосы качения на рельсах в значительной степени размыты, производилось усреднение экспериментально полученных значений для нескольких участков рельса. Диаметр рельса в полосе качения и невозмущенной зоне измерялся микрометром МК 125 с ценой деления 0.001 мм. По этим измерениям также проводилось усреднение.

2.3.2. Измерение относительной твердости материала головки рельса в полосе качения

При взаимодействии колеса транспортного модуля с поверхностью рельсов может наблюдаться явление наклепа как на поверхности рельса, так и на поверхности колеса. Наклеп проявляется в увеличении твердости поверхностного слоя взаимодействующих объектов. Данные о возможном упрочнении материалов и количественных показателях, характеризующих этот процесс, имеют большое значение для оптимального выбора материалов для колеса и головки рельса.

При проведении испытаний опытного участка было апробировано измерение сравнительной твердости по Бринеллю методом ударного отпечатка / 5 /. Сущность метода заключается в том, что стальной шарик диаметром D внедряют одновременно в исследуемую поверхность и поверхность контрольного образца, изготовленного из того же материала. (Сравнение с эталоном). После завершения вдавливания шарик убирают и производят измерение диаметров отпечатков d_1 и d_2 , оставленных шариком на поверхности исследуемого и эталонного образцов.

Величину сравнительной твердости рассчитывают по формуле:

$$HB_1 / HB_2 = D - \sqrt{D^2 - d_1^2} / D - \sqrt{D^2 - d_2^2}, \quad (2.3.1)$$

Где: HB_1 / HB_2 – соотношение твердости поверхностей исследуемого и эталонного образцов.

Для измерения описанным выше методом непосредственно на путевой структуре было разработано специальное приспособление (рис. 2.3.1) состоящее из держателя со стальным шариком, диаметр которого составлял 9.5 мм, фрагмента трубы, использованной в качестве рельса путевой структуры, закрепленного на длинной ручке и измерительного микроскопа МБП-2.



Рис. 2.3.1. Приспособление для измерения сравнительной твердости

Испытания с помощью такого приспособления проводятся следующим образом: с помощью держателя шарик устанавливается на исследуемую поверхность рельса в полосе катания. На шарик выпуклой стороной с помощью ручки устанавливается контрольный образец, по которому наносится удар молотком. После этого образец и шарик снимаются с рельса, и с помощью микроскопа производится измерение диаметров отпечатков на образце и рельсе. Испытания повторяются не менее трех раз для зоны, после чего для усредненных данных по формуле 2.3.1. производится вычисление соотношения твердости материалов. Это соотношение и является по сути мерой упрочнения материалов при взаимодействии колеса с рельсом путевой структуры.

2.3.3. Измерение тягового усилия качения транспортного модуля по путевой структуре

Большое значение при проектировании подвижного состава имеет наличие экспериментальных данных о величине коэффициента трения качения колеса по рельсу путевой структуры. Поэтому при проведении испытаний опытного участка была отработана методика измерения тягового усилия, необходимого для равномерного перемещения транспортного модуля по горизонтальному участку путевой структуры. Методика сводится к следующему.

Осуществляется демонтаж левых и правых полуосей среднего и заднего мостов, фланцев левой и правой ступиц переднего моста. Эта операция проводится с целью максимально исключить влияние трансмиссии автомобиля при его буксировке. В этом варианте влияние на усилие буксировки, кроме трения качения, будут оказывать только подшипниковые узлы ступиц колес.

За штатные крюки транспортного модуля закрепляются петли буксировочных строп, на другой конец которых устанавливается динамометр с пределом измерения усилия 2.0 кН. За второй крюк динамометра укрепляется петля буксировочного троса, присоединенного к прицепному устройству тягача МТЗ – 80Л. По команде, тягач, плавно натянув буксировочный трос, осуществляет равномерное перемещение транспортного модуля по горизонтальному участку въездной площадки, обеспечивая скорость перемещения в пределах 1 – 2 км/час. В процессе перемещения транспортного модуля измеряется время перемещения, протяженность контрольного участка, показания динамометра. Измерения производятся не менее трех раз. Как при движении в прямом направлении, так и в обратном.

2.3.4. Исследование параметров взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой

Так как полномасштабный транспортный модуль впервые выводился на реальную путевую структуру, большой интерес при проведении испытательных работ на опытном участке представляло получение экспериментальной информации о характере и особенностях взаимодействия модуля с путевой структурой при различных режимах их взаимодействия. К таким параметрам относятся данные о возможности эффективного торможения модуля и фиксации его на путевой структуре штатной автомобильной тормозной системой при угле наклона пути $6 - 7^{\circ}$, динамика взаимодействия модуля с путевой структурой при различных скоростных режимах его движения и различной энерговооруженности, обеспечение различных параметров разгона модуля, взаимодействие модуля с путевой структурой при различных погодных условиях и различном состоянии поверхности рельсов.

Методика проведения этой группы исследований заключалась в систематических прогонах транспортного модуля по путевой структуре, измерения с помощью штатных автомобильных приборов параметров движения модуля, контроля атмосферных условий, осуществлении визуальных наблюдений, систематизации полученной информации и оперативной корректировки режимов испытаний.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Результаты измерения параметров состояния путевой структуры

Измерения деформации путевой структуры под воздействием статической нагрузки в контрольных точках проводились в период с ноября 2001 г. по март 2002 г. Измерения проводились один раз в месяц по методике, приведенной в разделе 2.1.1. При этом фиксировались климатические условия проведения испытаний. Всего было произведено четыре цикла измерений. Результаты измерений и условия проведения испытаний приведены в таблицах 3.1 – 3.4.

По данным, приведенным в таблицах, построены диаграммы изменения величины деформации путевой структуры при статическом нагружении за контрольный период. Диаграммы представлены на рис. 3.1, 3.2.

Была проведена опытная отработка методики измерения времени затухания инициированных колебаний путевой структуры. Колебания инициировались резкой остановкой транспортного модуля последовательно в 8 контрольных точках (КТ1, КТ2, КТ4, КТ7, КТ9, КТ11, КТ13, КТ15, см. рис. 2.1.1.). Точки выбирались по принципу приложения усилия в середине характерных участков путевой структуры. Скорость транспортного модуля непосредственно перед резким торможением в контрольных точках была во всех случаях одинаковой и составляла 30 км/час. Усредненные по циклу из трех измерений значения времени затухания колебаний в контрольных точках приведены в таблице 3.5

Таблица 3.5.

Время затухания колебаний путевой структуры в контрольных точках

Контрольная точка	КТ1	КТ2	КТ4	КТ7	КТ9	КТ11	КТ13	КТ15
Время затухания колебаний, сек.	8.0	9.0	27.0	19.0	21.0	25.0	16.0	19.0

3.2. Результаты измерения геометрических параметров путевой структуры.

Геометрические параметры путевой структуры являются параметрами, характеризующими технологическую точность монтажа путевой структуры. В ходе проведения испытаний опытного участка были проведены серии измерений неровности каждого рельса на участке между первой анкерной опорой и второй промежуточной опорой, ширина колеи по всей длине участка, превышение уровня одного рельса над другим. При каждой серии измерений было проведено не менее трех единичных измерений параметров. Результаты измерений приведены в таблице 3.6. По данным, приведенным в таблице, были построены диаграммы отклонений геометрических параметров путевой структуры от проектных значений. При проведении испытаний измерение параметров неровности на каждом рельсе проводилось независимо друг от друга, и проектная линия пробивалась индивидуально для каждого рельса. При этом анализ данных показал, что левый и правый рельс не лежат в проектной плоскости колеи

Таблица 3.1.

Точка приложения силы	Величина деформации путевой структуры в контрольных точках, мм															
	КТ 1	КТ 2	КТ 3	КТ 4	КТ 5	КТ 6	КТ 7	КТ 8	КТ 9	КТ 10	КТ 11	КТ 12	КТ 13	КТ 14	КТ 15	КТ 16
КТ 1	27	0														
КТ 2	2	32	0													
КТ 3			0	14	0											
КТ 4			0	39	0											
КТ 5				0	49	32	10	-8	0							
КТ 6				0	27	44	27	-10	-7	0						
КТ 7				0	-6	11	43	8	3	0						
КТ 8				0	-9	-13	6	19	21	0						
КТ 9				0	-6	-8	0	13	44	0						
КТ 10									0	12	14	6	0	-3	-3	0
КТ 11									0	6	42	26	0	-10	-13	-5
КТ 12									0	2	20	47	21	-5	-14	-10
КТ 13									0	-1	-3	13	41	20	-3	-7
КТ 14									0	-4	-15	-9	12	47	27	4
КТ 15										0	-10	-10	-2	19	41	6
КТ 16										0	-2	-2	0	3	8	6

- Примечание:
1. Нулевые значения вне зон деформаций путевой структуры не проставляются.
 2. Дата, время проведения испытаний: 21.12.01 с 14.00 до 16.30 часов мск. времени.
 3. Условия проведения испытаний:
 - температура воздуха – 13 °С
 - ветер – северо-западный 7-10 м/с
 - осадки – осадков нет
 - давление – 760 мм.рт.ст.
 - влажность воздуха – 70%

Таблица 3.2

Точка приложения силы	Величина деформации путевой структуры в контрольных точках, мм															
	КТ 1	КТ 2	КТ 3	КТ 4	КТ 5	КТ 6	КТ 7	КТ 8	КТ 9	КТ 10	КТ 11	КТ 12	КТ 13	КТ 14	КТ 15	КТ 16
КТ 1	31	0														
КТ 2	2	34	1	-1	0											
КТ 3	0	3	1	13	0											
КТ 4		-1	1	44	0											
КТ 5				0	54	37	11	-9	-7	0						
КТ 6				0	33	51	27	-10	-7	0						
КТ 7				0	-6	14	46	8	4	0						
КТ 8				0	-9	-14	7	19	23	0						
КТ 9				0	-7	-11	0	12	50	0						
КТ 10									0	18	19	7	0	-3	-4	-2
КТ 11									0	7	48	26	1	-12	-16	-12
КТ 12									0	3	22	50	24	-5	-17	-15
КТ 13									0	-4	-4	15	46	21	-3	-9
КТ 14									0	-7	-17	-8	16	50	37	1
КТ 15									0	-5	-15	-10	-1	21	46	7
КТ 16									0	-1	-2	-3	0	3	8	9

- Примечание:
1. Нулевые значения вне зон деформаций путевой структуры не проставляются.
 2. Дата, время проведения испытаний: 16.01.02 с 13.00 до 16.30 часов мск. времени.
 3. Условия проведения испытаний:
 - температура воздуха + 1 °С
 - ветер – северо-западный 1 м/с
 - осадки – временами снег
 - давление – 755 мм.рт.ст.
 - влажность воздуха – 75%

Таблица 3.3.

Точка приложения силы	Величина деформации путевой структуры в контрольных точках, мм															
	КТ 1	КТ 2	КТ 3	КТ 4	КТ 5	КТ 6	КТ 7	КТ 8	КТ 9	КТ 10	КТ 11	КТ 12	КТ 13	КТ 14	КТ 15	КТ 16
КТ 1	33	0														
КТ 2	0	34	0	-2	0											
КТ 3	0	2	0	11	0											
КТ 4			0	41	0											
КТ 5			0	-1	54	37	11	-10	-5	0						
КТ 6			0	-1	30	52	27	-9	-8	0						
КТ 7				0	-6	17	46	9	2	0						
КТ 8				0	-7	-15	6	22	23	0						
КТ 9				0	-7	-12	-1	13	48	0						
КТ 10						0	-1	-2	0	15	16	7	0	-3	-5	-2
КТ 11									0	4	47	25	2	-13	-18	-9
КТ 12										0	21	51	23	-6	-19	-15
КТ 13									0	-5	-5	15	47	24	-2	-9
КТ 14									0	-8	-17	-10	16	52	36	3
КТ 15									0	-5	-14	-11	0	20	46	8
КТ 16										0	-3	-4	0	2	6	11

- Примечание:
1. Нулевые значения вне зон деформаций путевой структуры не проставляются.
 2. Дата, время проведения испытаний: 21.02.02 с 12.00 до 14.30 часов мск. времени.
 3. Условия проведения испытаний:
 - температура воздуха 0 °С;
 - ветер – юго-западный 3 - 5 м/с;
 - осадки – мокрый снег;
 - давление – 750 мм рт.ст.;
 - влажность воздуха – 85%.

Таблица 3.4

Точка приложения силы	Величина деформации путевой структуры в контрольных точках, мм															
	КТ 1	КТ 2	КТ 3	КТ 4	КТ 5	КТ 6	КТ 7	КТ 8	КТ 9	КТ 10	КТ 11	КТ 12	КТ 13	КТ 14	КТ 15	КТ 16
КТ 1	35	0														
КТ 2	0	39	0	-2	0											
КТ 3	0	4	2	13	0											
КТ 4		0	2	45	0	-2	0									
КТ 5			0	-1	58	38	9	0								
КТ 6			0	-1	34	56	27	0	-3	0						
КТ 7				0	9	14	49	5	2	0						
КТ 8				0	-8	-10	7	19	25	0						
КТ 9				0	-5	-6	0	11	53	0						
КТ 10							0	-2	0	15	17	4	0	-1	-2	-1
КТ 11									0	5	52	35	2	-11	-19	-12
КТ 12										0	24	57	24	-4	-20	-17
КТ 13									0	-8	-7	18	48	31	0	-11
КТ 14									0	-13	-18	-14	17	55	32	2
КТ 15									0	-7	-14	-16	-2	23	50	9
КТ 16										0	-2	-5	-2	2	9	11

- Примечание:
1. Нулевые значения вне зон деформаций путевой структуры не проставляются.
 2. Дата, время проведения испытаний: 13.03.02 с 10.30 до 13.30 часов мск. времени.
 3. Условия проведения испытаний:
 - температура воздуха +10 °С;
 - ветер – штиль;
 - облачность - ясно;
 - давление – 763 мм рт.ст.;
 - влажность воздуха – 85%.

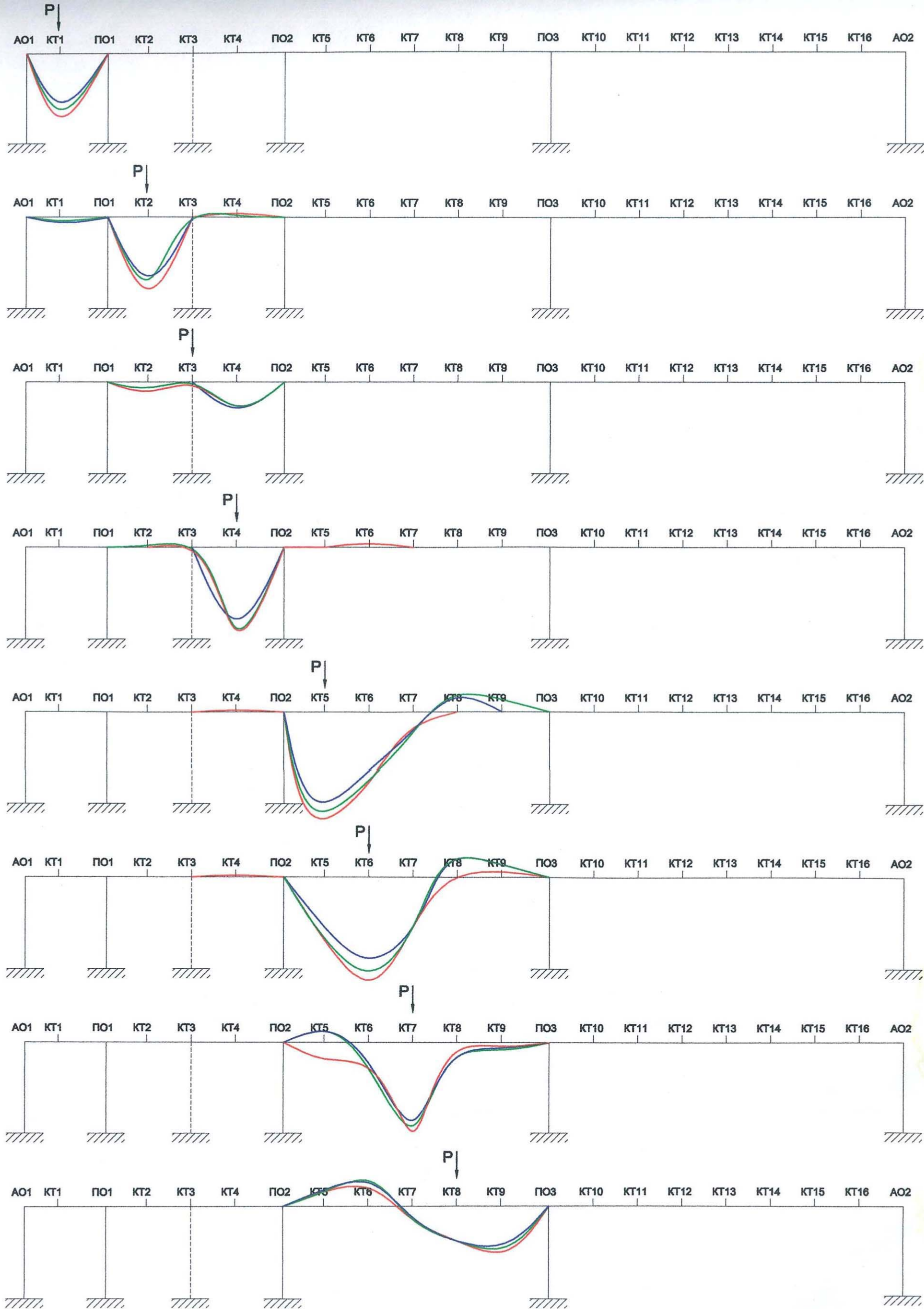


Рис.

Диаграмма изменения величины деформации ПС при статическом нагружении. Лист 1 (листов 2).

Примечание:

- дата испытаний - 21.12.01.; температура воздуха - 13 °C
- дата испытаний - 16.01.02.; температура воздуха + 1 °C
- дата испытаний - 13.03.02.; температура воздуха + 10 °C
- масштаб по вертикальной оси (мм)

0 10 20 30 40 50

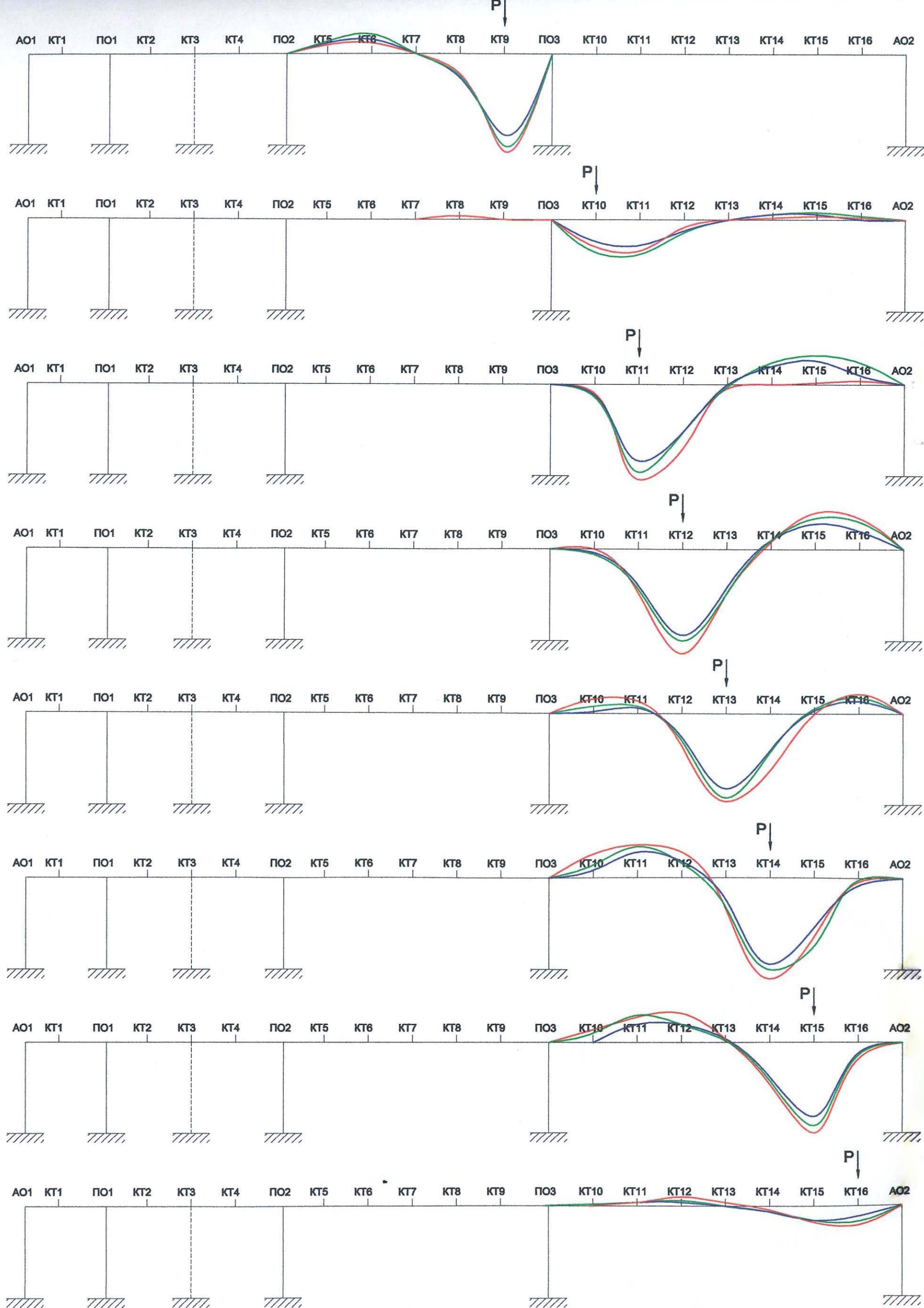


Рис.

Диаграмма изменения величины деформации ПС при статическом нагружении. Лист 1 (листов 2).

Примечание: — дата испытаний - 21.12.01.; температура воздуха - 13 °C

— дата испытаний - 16.01.02.; температура воздуха + 1 °C

— дата испытаний - 13.03.02.; температура воздуха + 10 °C

0 10 20 30 40 50 — масштаб по вертикальной оси (мм)

Сводные данные по измерениям геометрических параметров путевой структуры

Обозн. КТ	Левый рельс (Л)		Правый рельс (П)		Перепад высот Л отн. П, (мм)		Отклонение ширины колеи, (мм)		
	Откл. У, (мм)	Откл. Х, (мм)	Откл. У, (мм)	Откл. Х, (мм)	Изм. в КТ	Расч. с попр.	Изм. в КТ	Расч. с попр.	По дан. С-1-10
1 (АО1)	0	0	0	0	8	8	2	2	2
2	0	0	-2	3		10		5	4
3	-7	3	-8	3		8		2	3
4	-16	5	-14	8		5		5	3
5	-24	6	-18	7		1		3	1
6	-27	5	-21	4		1		1	1
7	-26	3	-17	2		-3		0	1
8	-25	2	-15	1		-4		0	1
9	-22	2	-11	1		-5		0	1
10	-17	1	-8	0	-3	-3	-1	0	1
11	-16	5	-6	-1		-5		-5	-5
12	-19	5	-6	-1		-8		-5	-6
13	-20	8	-10	-3		-5		-10	-10
14	-19	7	-11	-4		-4		-10	-10
15	-19	6	-11	-3		-4		-8	-8
16	-22	5	-11	-3		-7		-8	-7
17	-25	4	-14	-3		-7		-7	-7
18	-11	5	-7	-3		-1		-8	-5
19	-3	2	0	0		0		-2	-5
20	-3	1	2	-1	-2	-2	-1	-2	2
21	-9	0	-2	-1		-4		-1	1
22	-10	-1	-5	0		-3		1	-1
23	-9	0	-5	-1		-2		-1	-1
24	-8	0	-5	-2		-1		-2	-1
25	-7	0	-5	-1		0		-1	-1
26	-6	0	-4	-1		-1		-2	-1
27	-3	0	-1	-2		-1		-3	-2
28	-2	-1	0	-1		-1		-1	-1
29	-1	-1	1	0		1		0	-1
30	1	-2	1	-1		0		0	-1
К (ПО2)	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1

и не параллельны (в направлении оси Z). Это не дает возможности в чистом виде произвести сравнительный анализ геометрических характеристик обоих рельсов. Для обеспечения такой возможности при обработке результатов измерений было осуществлено приведение координат левого рельса к системе отсчета правого рельса, принятой за базовую.

Приведение координат осуществлялось по следующим зависимостям:

$$X_i(\text{лп}) = X_i(\text{л}) - X_k + ([X_k] + [X_n]) \times (L_y - L_i) / L_y, \quad (3.1)$$

Где:

$X_i(\text{лп})$ – отклонение левого рельса от проектной оси в плоскости колеи, приведенное в систему координат правого рельса;

$X_i(\text{л})$ – отклонение контрольной точки левого рельса относительно проектной оси в плоскости колеи в системе левого рельса;

X_k, X_n – отклонение ширины колеи в конце и начале контрольного участка;

$[X_k], [X_n]$ – модули отклонений колеи в начале и конце контрольного участка;

L_y – длина контрольного участка между начальной и конечной точкой;

L_i – расстояние от начальной до контрольной точки.

$$Y_i(\text{лп}) = Y_i(\text{л}) - Y_k + ([Y_n] + [Y_k]) \times (L_y - L_i) / L_y, \quad (3.2.)$$

Где:

$Y_i(\text{лп})$ – отклонение левого рельса от проектной оси в вертикальном направлении, приведенное в систему координат правого рельса;

$Y_i(\text{л})$ – отклонение контрольной точки левого рельса в вертикальном направлении в системе левого рельса;

Y_k – превышение левого рельса над правым в конечной точке контрольного участка;

Y_n – превышение левого рельса над правым в начальной точке контрольного участка.

На рис.3.3 представлены диаграммы отклонений геометрических параметров рельсовой колеи и самих рельсов от проектных значений, приведенные друг к другу с помощью соотношений 3.1, 3.2.

3.3. Результаты исследования параметров взаимодействия транспортного модуля с головкой путевой структуры.

Обследования головки рельсов, проведенные после 120 прогонов транспортного модуля по путевой структуре, показали следующее:

- Колесо транспортного модуля при движении его по рельсам путевой структуры взаимодействует по двум разделенным полосам (рис. 3.4.), расположенным по разные стороны относительно верхней образующей головки рельсов. Ширина полос качения изменяется по длине рельса в пределах 20 – 35 мм. При этом между контактными полосами на обоих рельсах хорошо выделена полоса шириной до 10 мм, на которой обнаружен слой металла колеса.

- Измерения сравнительной твердости материала головки рельса в полосе качения, результаты которых, рассчитанные с помощью зависимости 2.3.1., представлены в таблице 3.7, показали, что происходит существенное (в 1.5 – 1.7 раза) упрочнение металла рельса в зоне взаимодействия его с колесом. При этом, износ рельса в зоне качения, превышающий разброс значений диаметра рельса-трубы в контрольном сечении, $\pm 0,05$ мм, не отмечен.

Зафиксирован факт того, что в промежутке между полосами качения видимого увеличения твердости поверхности головки рельса не произошло.

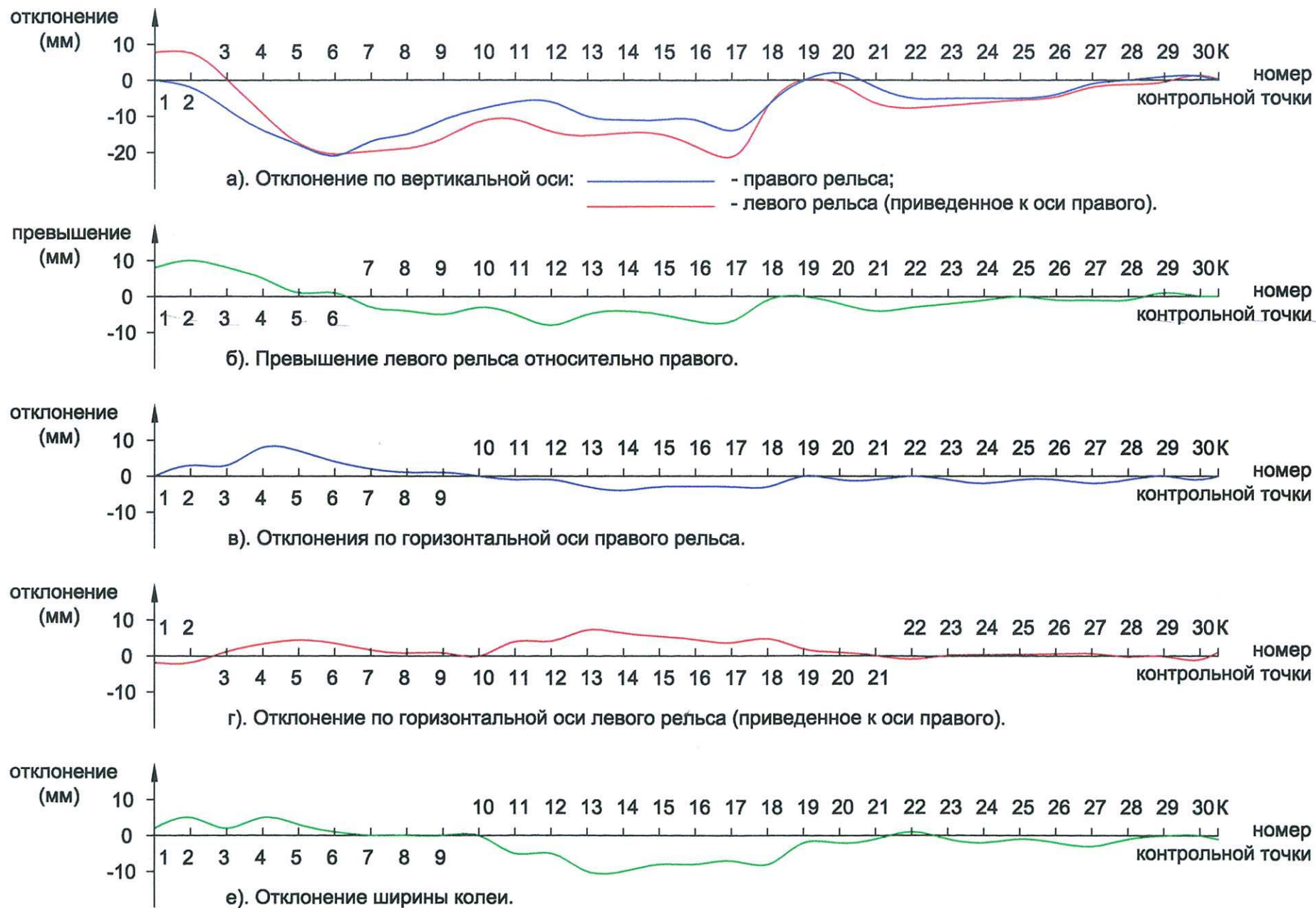


Рис. 3.3 Диаграмма отклонений геометрических параметров ПС от проектных.

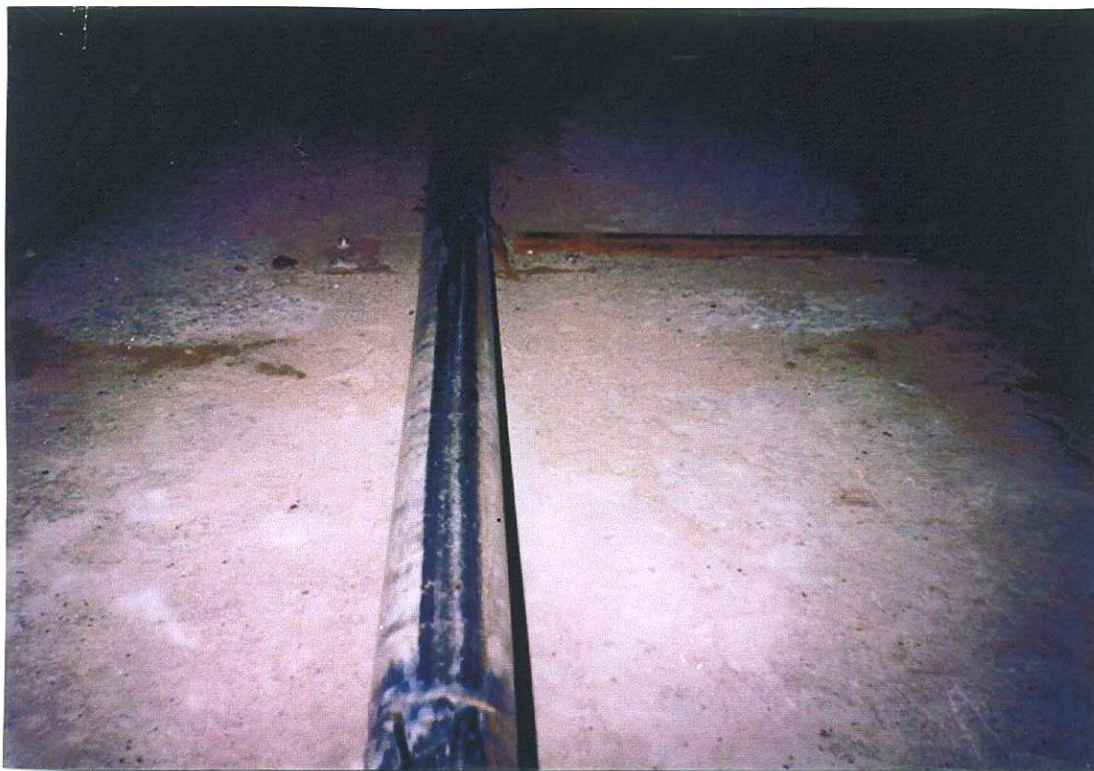


Рис.3.4 Контактная полоса взаимодействия колеса с головкой рельса.

Таблица 3.7.

Результаты измерения сравнительной твердости поверхности рельса
Путевой структуры в зоне качения колеса.

№ изме- рен.	Диаметр отпечатка вдавленного шарика, мм		Сравнительная твердость НВр / НВс
	В контрольном образце	В головке рельса	
1.	3.40	2.60	1.70
2.	3.35	2.80	1.43
3.	3.15	2.40	1.70
4.	3.60	2.50	2.07
5.	3.10	2.60	1.42
6.	3.40	2.10	2.62
7.	3.00	2.60	1.30

Были проведены измерения тягового усилия, необходимого для качения транспортного модуля с отключенной трансмиссией по горизонтальному участку путевой структуры. Измерения усилия производились динамометром марки ДПУ-0,2-2 ГОСТ 13837-79 с пределом измерения 2 кН. Буксировка производилась в сухую погоду при отсутствии на поверхности рельсов посторонних предметов и загрязнений. Ввиду отсутствия достаточно длинного горизонтального участка путевой структуры, испытания проводились на въездной площадке, при активном перемещении модуля в пределах 3 метров. Результаты испытаний приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8.

Результаты измерения тягового усилия, необходимого для перемещения транспортного модуля по горизонтальному участку путевой структуры.

№ изме- ре- ния	Расстояние, м	Время буксировки, с	Скорость Буксировки, м/с	Тяговое усилие, кН
Движение вперед				
1.	2.53	8.1	0.31	0.60
2.	2.53	8.1	0.31	0.62
3.	2.53	8.0	0.32	0.60
Движение назад				
1.	2.83	8.4	0.34	0.56
2.	2.83	8.5	0.33	0.54
3.	2.83	8.3	0.34	0.52

В процессе проведения испытаний опытного участка был проведен цикл работ по исследованию особенностей взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой. Результаты этих исследований приведены ниже.

**а) Экспериментальное исследование эффективности торможения
и фиксации транспортного модуля на путевой структуре**

Была проведена опытная проверка эффективности фиксации транспортного модуля на путевой структуре различными способами с использованием штатных автомобильных тормозных систем. При этом последовательно опробовались варианты удерживания модуля на путевой структуре в зафиксированном состоянии с помощью рабочей тормозной системы и стояночного тормоза. Учитывая тот факт, что уклон путевой структуры одинаков по всей ее длине, отработка режимов торможения и фиксации проводилась на участке между исходной позицией и второй промежуточной опорой.

В результате серии проведенных экспериментов установлено, что модуль надежно (без скатывания и юза) удерживается на наклонном участке путевой структуры как рабочей тормозной системой, так и стояночным тормозом.

Кроме проверки штатных режимов торможения были проведены эксперименты по применению экстренного торможения и проверке его эффективности. Работы проводились по следующей методике. Имитатор транспортного модуля, предварительно зафиксированный штатной тормозной системой в районе первой промежуточной опоры, начинал скатывание назад при нейтральном положении рукоятки переключения передач. При этом осуществлялся разгон модуля. При выходе на горизонтальный участок въездной площадки оператором стенда резко включалась штатная тормозная система, под действием которой модуль останавливался. Производились измерения длины тормозного следа на рельсах путевой структуры. Измерения показали, что длина тормозного следа в среднем составляла 1350 мм. При этом торможение осуществлялось плавно, без рывков, вибрации и «подскоков». На поверхности рельсов в зоне тормозного следа остались задиры глубиной до 0.2 мм.

б) Экспериментальное исследование динамики взаимодействия системы рельс – колесо

В целях изучения предельных параметров взаимодействия системы «рельс – колесо» были проведены испытания при различных режимах трогания с места и движения модуля по путевой структуре, а также варианты его разгона.

В ходе экспериментов осуществлялось движение с ограничением тяговых характеристик транспортного модуля (отключение первого и третьего ведущих мостов), а также определение максимального тягового усилия, при котором начинается пробуксовка колес модуля относительно рельсов в полноприводном варианте.

Изучение возможностей движения транспортного модуля в неполноприводном варианте показало, что отключение одного ведущего моста модуля существенного влияния на характер трогания с места и движения на наклонном участке путевой структуры не оказывает. Пробуксовка колес в этом случае незначительна (до $\frac{1}{4}$ оборота) и наблюдается только в момент трогания с места. Отключение двух ведущих мостов (I и III) приводит к значительной пробуксовке ведущих колес, при которой устойчивое движение модуля по путевой структуре невозможно.

Величина максимального тягового усилия, при котором начинается пробуксовка колес относительно рельсов, измерялась аттестованным динамометром с пределом измерения 50 кН. Транспортный модуль с помощью троса зацеплялся за массивную неподвижную опору. Динамометр устанавливался в месте крепления троса к переднему буксирному крюку модуля. Тяговая мощность модуля при включенной задней передаче увеличивалась с нулевого уровня до момента начала проскальзывания колес относительно рельсов. В момент начала проскальзывания фиксировались показания динамометра. По данным проведенных измерений среднее значение усилия начала проскальзывания составило 29 кН.

Путем экспериментального подбора вариантов разгона транспортного модуля по путевой структуре была достигнута максимально возможная в условиях ограниченного

участка скорость его движения. Она была измерена по штатному спидометру модуля и составила 55 км/час. Визуальные наблюдения за характером движения модуля по путевой структуре показали, что на отдельных участках трассы, где технологические отклонения геометрических параметров колеи от проектного значения достигали наибольшего значения, при движении со скоростью близкой к максимальной, возникали боковые колебания модуля. При этом наблюдения, проведенные снизу модуля при его движении, не обнаружили тенденций к сходу модуля с рельсов. Внутренняя часть всех колес при движении модуля своей рабочей частью надежно сцеплялась с головкой рельсов.

При возникновении боковых колебаний модуля, насколько это можно было зафиксировать визуально, их амплитуда в зоне колесной пары и в зоне рамы были одинаковыми.

в) Экспериментальное исследование влияния атмосферных явлений на динамику взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой

Исследование влияния климатических условий на характер движения имитатора транспортного модуля по путевой структуре производилось в осенне-зимний период при различной температуре воздуха и выпадении атмосферных осадков. Были проведены прогоны модуля по путевой структуре в условиях выпадения росы, мелкого морозящего дождя, проливного дождя, сухого и мокрого снега, обледенения головок рельсов. В результате проведенных работ было установлено:

1. Неблагоприятные погодные факторы в виде росы и выпадение дождя различной интенсивности, не оказывают влияния на динамику движения модуля по путевой структуре. За счет массы модуля и хорошего сцепления обода его колес с рельсами происходит выдавливание водяной пленки из зоны контакта. Это обеспечивает стабильность движения модуля.

2. При движении имитатора транспортного модуля по путевой структуре покрытой мокрым снегом толщиной до 60 мм (температура воздуха в районе 0 град.), происходит спрессовывание снежного покрова передними колесами в тонкую пленку, которая скатывается с головки рельсов и не оказывает никакого влияния на характер движения модуля.

3. Сухой снег, при температуре воздуха до -10 град и толщине снежного покрова на рельсах до 3 см при движении модуля сбрасывается с рельсов передними колесами без образования пленки и не влияет на характер движения модуля.

4. Наиболее сложным для движения модуля по путевой структуре является случай выпадения мокрого снега и резкого понижения вслед за этим температуры воздуха. Происходит образование ледовой корки под снегом толщиной до 2-3 мм и примерзание последнего к головкам рельсов. В этом случае при трогании с места может наблюдаться проскальзывание колес модуля относительно рельсов. Но при осуществлении предварительного разгона по горизонтальной площадке за счет массы модуля и инерции движения модуль устойчиво движется по обледенелым рельсам, раздавливая ледяную корку и сбрасывая ее.

3.4. Результаты тестовых проверок и внешних наблюдений за поведением элементов и узлов опытного участка

Регулярно проводимые в течение контрольного периода осмотры и внешние обследования основных составных частей опытного участка показали следующее:

- Узлы, в которых была осуществлена заделка концов несущих и

поддерживающих тросов, внешне не изменились. Не обнаружено следов выскальзывания тросов из анкерных приспособлений. Это свидетельствует о стабильности и надежности их работы и о правильности технических решений, использованных при их конструировании.

- Состояние металлоконструкций и крепежных узлов участка относительно исходного состояния практически не изменилось. Не обнаружено ослабления крепежных элементов стоек и узлов ложементов на промежуточных опорах, а также дефектов и нарушения целостности мест сварных соединений труб в рельсовую колею.

- Не обнаружена податливость промежуточных опор в направлении параллельно плоскости рельсовой колеи при прохождении транспортного модуля по путевой структуре, что подтверждает надежность фиксации тросов в ложементах, а оснований опор на анкерных болтах фундаментов.

- На видимых частях фундаментов анкерных опор не обнаружено трещин и других дефектов, которые имели бы развитие во времени и в ходе внешнего силового нагружения.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Обобщение экспериментальных данных, приведенных в разделе 3 позволило выстроить экспериментальные зависимости изменения величины вертикальной деформации в зависимости от времени и температуры. Результаты такого обобщения приведены в таблице 4.1., в которой даны экспериментальные и расчетные значения.

Анализ показал следующее:

1. С момента «замыкания» напряженных элементов стенда (канаты, рельс) за период с 07.10.2001 г. (+ 9°C) по 13.03.2002 г. (+ 10°C) произошло увеличение деформативности путевой структуры в среднем на 20%, что при равенстве температуры говорит о релаксации напряжений в поддерживающих канатах двойной свивки.
2. За период с 07.10.2001 г. (+ 9°C) по 21.12.2001 г. (-13°C) на момент испытаний деформативность путевой структуры осталась на прежнем, в сравнении с расчетом, уровне за счет компенсации падения усилий в канатах от релаксации увеличением жесткости конструкции при снижении температуры воздуха на 22°C, при этом на данный момент релаксация составила 8-10% (с учетом начальной предварительной вытяжки канатов при монтаже).
3. Деформативность путевой структуры за период с 21.02.2001 г. (-13°C) по 13.03.2002 г. (+10°C) увеличилась в среднем на 28-30%, что подтверждает выводы п.1 и п.2 о влиянии релаксации (20%) и температурных воздействий (8-10%) на напряженно-деформированное состояние стенда.
4. Полученные статистические данные свидетельствуют о хорошем совпадении с теоретическими расчетами (рис.4.1.), подтверждающими снижением жесткости путевой структуры по состоянию на 13.03.2002 г. в среднем на 20 %.
5. За период с 21.02.2002 г. ($\pm 0^\circ\text{C}$) по 13.03.2002 г. (+10°C) прогибы путевой структуры увеличились не более чем на 5%, при этом данное увеличение в основном произошло из-за колебаний температуры, что говорит о явно затухающем характере релаксации в поддерживающих канатах. Можно утверждать об окончании вытягивания канатов ввиду их двойной свивки и стабилизации растягивающих напряжений.
6. Для увеличения жесткости путевой структуры и в связи с завершением периода стабилизации усилий в поддерживающих канатах рекомендуется выполнить следующие мероприятия:
 - ослабить крепление поддерживающих канатов в узле 5.3 для их свободного

Таблица 4.1.

Величины деформации рельсового пути																	
Дата	T°,C	Kт1	Kт2	Kт3	Kт4	Kт5	Kт6	Kт7	Kт8	Kт9	Kт10	Kт11	Kт12	Kт13	Kт14	Kт15	Kт16
07.10.01	+9	37	33	1	39	50	55	49	25	46	13	44	42	35	43	42	8
21.12.01	-13	27	32	0	39	49	44	43	19	44	12	42	47	41	47	41	6
16.01.02	+1	31	34	1	44	54	51	46	19	50	18	48	50	46	50	46	9
21.02.02	0	33	34	0	41	54	52	46	22	48	15	47	51	47	52	46	11
13.03.02	+10	35	39	2	45	58	56	49	19	53	15	52	57	48	55	50	11

Примечание:

07.10.01 – указаны расчетные данные;

21.12.01, и т.д. – указаны данные полученные в ходе испытаний

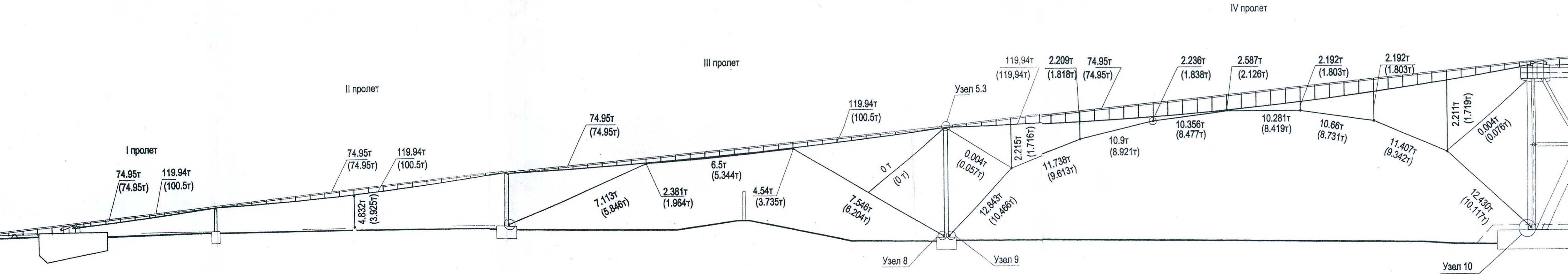


Рис. 4.1. Схема путевой структуры с расчетными величинами натяжений в конструкциях

- в узле 10 до упора завернуть талрепы;
 - на 20 мм подтянуть талрепы в узле 8;
 - в узле 9 завернуть талрепы на 30-40 мм (не более);
 - затянуть крепление поддерживающих канатов в узле 5.3.
7. Следует продолжить наблюдения за состоянием путевой структуры с периодичностью не реже 1 раза в месяц с осмотром сварных соединений элементов стенда и контроля анкеровки поддерживающих канатов.
 8. Остальные силовые и металлоконструкции опытного участка ведут себя стабильно.
 9. Экспериментальные данные о времени затухания иницированных колебаний на настоящем этапе не позволяют использовать их для анализа состояния путевой структуры ввиду малой статистики и недостаточной информативности. Для проведения углубленного анализа динамики системы необходимо дополнить экспериментальные данные количественными результатами, позволяющими построить кривые затухания свободных колебаний на участках путевой структуры. Для этого необходимо разработать и реализовать методику таких измерений. В настоящий же момент данные о времени затухания носят чисто методический характер и будут использованы для разработки вышеупомянутой методики.

Результаты измерения геометрических параметров путевой структуры показали, что разработанные методики измерений полностью работоспособны, обеспечивают необходимую точность и могут быть использованы при дальнейших измерениях на опытном участке и в технологическом цикле монтажа новых струнных трасс.

Величины отклонений основных геометрических параметров путевой структуры опытного участка от проектных значений в данном случае являются показателями конкретной реализации проекта. Использованные при монтаже трубы со значительными отклонениями геометрических размеров от паспортных значений и несовершенство технологии монтажа путевой структуры объясняют такой результат. При этом он никак не повлиял на достижение основных целей, преследуемых при создании стенда. При минимальных затратах был создан первый фрагмент полномасштабной струнной трассы, доказавший жизнеспособность проекта в целом. А данные о реальных геометрических характеристиках путевой структуры в совокупности с результатами исследований взаимодействия с ней транспортного модуля позволили сделать ценные выводы о требуемой точности монтажа путевых структур будущих систем и точности изготовления элементов рельсового пути.

Исследования динамики взаимодействия транспортного модуля с путевой структурой опытного участка позволили получить информацию о соотношении энерговооруженности транспортных модулей и особенностей конструкции путевой структуры, позволяющих обеспечить гарантированно устойчивое их движение по любым трассам.

Первый опыт использования двухребордных колес в составе транспортного модуля показал, что принятое соотношение формы внутренней части колеса и головки рельса обеспечивают самоцентрирование модуля на путевой структуре во время его движения. Это повышает безопасность движения по путевой структуре, исключает вероятность схода модуля с рельсов и существенно снижает требования к боковой податливости колес, что в свою очередь упрощает их конструкцию и уменьшает затраты на их изготовление.

Данные о взаимодействии транспортного модуля с поверхностью рельсов путевой структуры при различном их состоянии, имеют большую ценность, так как показывают независимость динамики движения транспортных модулей по струнным трассам от внешних климатических условий.

Результаты исследования взаимодействия колес модуля с головкой рельсов

имеют в большей степени методическое значение. Они показывают работоспособность измерительных методик, которые могут быть применены при проведении испытаний на новых трассах. А количественные показатели изменения состояния контактирующих поверхностей показывают лишь то, что выбранная пара материалов колеса и рельса не является оптимальной и не может быть использована для строительства реальных струнных трасс. Для демонстрационного стенда в целях снижения затрат на его строительство такой выбор был вполне оправдан.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных испытаний первого опытного участка путевой структуры и наблюдений в обозначенный период можно сделать следующие заключения:

1. Полностью подтверждена правильность расчетных методов и алгоритмов, использованных при проектировании конструкции опытного участка путевой структуры. Эти методы могут быть использованы для проведения расчетов будущих струнных трасс.
2. Конструкция опытного участка путевой структуры в течение 6 месяцев по основным своим показателям остается стабильной во времени независимо от внешних силовых и климатических условий.
3. Обнаруженная в ходе испытаний релаксация напряженного состояния системы вызвана завершением периода стабилизации состояния поддерживающих и несущих канатов. Этот эффект объясняется особенностью нагружения и работы витых канатов. С этой точки зрения их использование во вновь проектируемых струнных трассах не является перспективным. Более предпочтительным следует признать вариант использования пучка параллельных проволок.
4. Принятые принципы взаимодействия колеса транспортного модуля с рельсом путевой структуры, основные геометрические и силовые соотношения колеса и рельса позволяют реализовать простую и надежную конструкцию колеса, обеспечивающую устойчивое движение транспортного модуля по путевой структуре.
5. Определены основные допуски на геометрические размеры рельса и колеи путевой структуры, реально и дешево обеспечиваемые при ее монтаже.
6. Отработаны методики измерения параметров состояния путевой структуры, которые могут быть использованы при строительстве новых струнных трасс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Юницкий А.Э. "Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе"
Гомель, "Инфотрибо", 1995 г. – 337 с
2. Юницкий А.Э. "Струнная транспортная система (СТС) в вопросах, ответах и проектах"
Москва, "Центр ООН по населенным пунктам (Хабитат)
Исполнительное бюро Хабитат в Москве", 2000 г. – 75 с
3. "Стенд для статических и динамических испытаний путевой структуры СКЮ
"Юнитран". Рабочий проект.
4. Инструкция №1 на переоборудование имитатора транспортного модуля для
проведения предварительных испытаний на стенде "Путевая структура"
Утверждена 26.09.01 г.
5. Кондрашов А.П., Шестопалов Е.В. "Основы физического эксперимента и
Математическая обработка результатов измерений"б М., Атомиздат, 1977 г.
- 200 с.