

**Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта**

**КОНСПЕКТ**

**лекций по дисциплине «Железнодорожный путь»  
для магистрантов специальности 5А580205 -  
«Строительство железных дорог,  
путь и путевое хозяйство»  
(часть 1)**

**Составители: доц. Овчинников А.Н.  
доц. Расулев А.Ф.**

**Ташкент 2010**

УДК 625.1

Овчинников А.Н, Расулев А.Ф. Конспект лекций по дисциплине «Железнодорожный путь», раздел «Взаимодействие пути и подвижного состава» – Ташкент: ТашИИТ, 2010. – 84 с.

В настоящем конспекте лекций приведены материалы, обобщающие многолетний опыт изучения взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава. Даны теоретические основы и практические методы расчёта пути на прочность и устойчивость. Лекции предназначены для магистрантов специальности 5А580205 - Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ЛЕКЦИЯ 1: ВВОДНАЯ ЧАСТЬ: ИСТОРИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА СРЕДНЕАЗИАТСКОГО РЕГИОНА. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ И ТИПЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА</b> .....	5
1.1 ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА .....	5
1.2 СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ.....	8
1.3 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ СО ШПАЛАМИ ВF 70 И СКРЕПЛЕНИЯМИ «PANDROL FASTCLIP».....	11
1.4 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА.....	12
<b>ЛЕКЦИЯ 2: ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА</b> .....	16
2.1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ХАРАКТЕР ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.....	16
2.2 ОСНОВНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ПУТИ.....	21
2.3 НЕРОВНОСТИ НА КОЛЕСАХ И НА ПУТИ.....	22
2.4 КОЛЕБАНИЯ КУЗОВА.....	24
<b>ЛЕКЦИЯ 3: КОЛЕБАНИЯ КОЛЕС И ПУТИ</b> .....	26
3.1 СИЛЫ ИНЕРЦИИ КОЛЕБАНИЯ КОЛЕСА И ПУТИ.....	26
3.2 СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМ.....	26
3.3 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМЫ КОЛЕСО-ПУТЬ.....	28
<b>ЛЕКЦИЯ 4: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ</b> .....	30
4.1 РАСЧЁТНАЯ СХЕМА.....	30
4.2 ЗАВИСИМОСТЬ ПРОГИБА И ЛИНЕЙНОГО ОТПОРА.....	30
4.3 МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ.....	31
4.4 ОБЩИЙ МОДУЛЬ УПРУГОСТИ.....	32
4.5 ЖЁСТКОСТЬ УЗЛА СКРЕПЛЕНИЯ.....	36
<b>ЛЕКЦИЯ 5: СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗОК НА ПУТЬ</b> .....	42
5.1 РАСЧЁТНАЯ СХЕМА.....	42
5.2 ЛИНЕЙНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА.....	42
5.3 КОЭФФИЦИЕНТ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ.....	43
5.4 ПОЛНЫЙ ИНТЕГРАЛ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ.....	44
5.5 ИЗГИБАЮЩИЙ МОМЕНТ И ПОПЕРЕЧНАЯ СИЛА.....	44

<b>ЛЕКЦИЯ 6: РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ</b> .....	47
6.1 ЦЕЛЬ РАСЧЕТОВ.....	47
6.2 ПРЕДПОСЫЛКИ И ДОПУЩЕНИЯ.....	48
6.3 НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ.....	49
<b>ЛЕКЦИЯ 7: РАСЧЕТНЫЕ И ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ</b> .....	54
7.1 РАСЧЁТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ.....	54
7.2 ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ.....	58
<b>ЛЕКЦИЯ 8: НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВНОЙ ПЛОЩАДКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА</b> .....	61
<b>ЛЕКЦИЯ 9: ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТОВ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ</b> .....	65
9.1 ДОПУСКАЕМЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛЕТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ РЕЛЬСА .....	65
9.2 ДОПУСКАЕМЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛЕТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ПО УСЛОВИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ .....	67
<b>ЛЕКЦИЯ 10: УСЛОВИЯ УКЛАДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ</b> .....	69
10.1 УКЛАДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ БЕССТЫКОВОГО БЕЗ СЕЗОННЫХ РАЗРЯДОК НАПРЯЖЕНИЙ .....	69
10.2 КОМПЛЕКСНЫЙ РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ.....	70
10.3 РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ.....	73
10.4 ДОПУСКАЕМЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУР РЕЛЬСОВ.....	75
10.5 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ БЕССТЫКОВЫХ ПЛЕТЕЙ.....	77
<b>ЛЕКЦИЯ 11. ДИАГРАММА ТЕМПЕРАТУРНОЙ РАБОТЫ ПЛЕТЕЙ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ</b> .....	79
<b>ЛЕКЦИЯ 12: УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЕСА НА РЕЛЬСЕ</b> .....	82
12.1 РАСЧЕТНАЯ СХЕМА.....	82
12.2 УСЛОВИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ.....	82
13.3 КОЭФФИЦИЕНТ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВПОЛЗАНИЯ ГРЕБНЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС.....	84

## **ЛЕКЦИЯ 1. ИСТОРИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА СРЕДНЕАЗИАТСКОГО РЕГИОНА. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ И ТИПЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

### **1.1 ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

История развития железных дорог на территории Средней Азии берет свое начало с 1874 года, когда специальная комиссия признала необходимый постройку железнодорожной ветки Оренбург-Ташкент. Однако позже, исходя из стратегических интересов, решение было изменено — первая стальная магистраль должна была соединить Ташкент с восточным побережьем Каспийского моря.

Строительство Закаспийской военной железной дороги было начато в ноябре 1880 года. Через пять лет, строители достигли Асхабада, а в 1886 году — Чарджоу. В мае 1888 года, когда был возведен деревянный мост через Амударью, открылось движение до Самарканда. В 1899 году дорога достигла Ташкента. Одновременно был построен и участок от станции Урсатьевская в Ферганскую долину. Железнодорожно-морская паромная переправа Красноводск — Баку обеспечила кратчайшую бесперевалочную связь дороги с Азербайджанской ж.д..

В конце позапрошлого столетия вновь встал вопрос о строительстве дороги от Ташкента до Оренбурга, к сооружению которой приступили осенью 1900 года одновременно из обоих концов. В январе 1906 дорога Ташкент-Оренбург вступила в строй, открыв для Средней Азии прямой выход в Центральную Россию. Таким образом после постройки Оренбургско-Ташкентской железной дороги Среднеазиатская железная дорога соединилась со всей сетью железных дорог России.

Среднеазиатская железная дорога — образовалась путем соединения Закаспийской военной железной дороги и Самарканд-Андижанской железной дороги (с ветвями на Ташкент и Маргелан), открытой для движения с 1 мая 1899 года. С 1 марта 1901 года открыта Мургабская ветвь (Мерв — Кушка). Общее протяжение Среднеазиатской железной дороги по состоянию на 1 января 1905 года — 2382 верст., в том числе: главная линия Красноводск — Ташкент — 1749 верст., Черняево — Андижан — 306 верст., Мерв — Кушка — 295 верст., Каган — Бухара — 11 верст., Горчаково — Маргелан — 8 верст., ветвей общего пользования — 12 верст.

В годы советской власти Среднеазиатская железная дорога объединяла сеть железных дорог Узбекской ССР, Туркменской ССР, Таджикской ССР, частично Киргизской ССР и Казахской ССР. Эксплуатационная длина 6199 км, или 4,4 % протяженности всей сети железных дорог СССР (1975). Управление в Ташкенте. Имеет 9 отделений: Ташкентское, Хавастское,

Ферганское, Бухарское, Душанбинское, Чарджоуское, Марыйское, Ашхабадское и Каракалпакское. Граничала с Казахской железной дорогой по станциям Ченгельды и Бейнеу.

За годы Советской власти было построено много новых железнодорожных линий, в частности: Амударьинская — Душанбе (441 км), Ташкент — Ангрен (118 км), Чарджоу — Кунград (627 км), Навои — Учкудук (290 км), Джизак — Мехнат (133 км), а также ряд ответвлений от основной магистрали. В 1972 завершено строительство новой линии Кунград — Бейнеу (408 км), открывшей второй выход в центральные районы страны. С 1970 эксплуатируется железнодорожная линия Самарканд — Карши (157 км), с 1974 — Термез — Курган-Тюбе (218 км), с 1975 — Тахиаташ — Нукус (12 км).

1 февраля 2001 года введена в эксплуатацию железнодорожная ветка Шалкар-Мискин. 23 декабря 2008 года - Ташгузар-Кумкурман. В настоящее время (2009 год) железнодорожная сеть Узбекистана — это Государственно-акционерная железнодорожная компания «Узбекистон темир йуллари», образованная 7 ноября 1994 года на базе бывшей Среднеазиатской железной дороги, расположенной на территории Республики Узбекистан. Общая развернутая длина главных путей компании составляет в настоящее время около 4 тыс. км (рис. 1).

В настоящее время железнодорожный транспорт Республики Узбекистан играет важнейшую роль в обеспечении стабильного функционирования экономики страны и осуществлении плановых перевозок пассажиров. Достаточно сказать, что его доля в общем грузообороте страны составляет около 80%, а в пассажирообороте - около 40%.

Железнодорожный путь, являясь одним из основных технических средств железнодорожного транспорта, должен соответствовать требованиям, обеспечивающим надежный, безопасный и своевременный пропуск по нему пассажирских и грузовых поездов с установленными скоростями. При этом совершенствование конструкции железнодорожного пути и системы ведения путевого хозяйства на основании внедрения прогрессивных конструкций и современных технологий является существенным резервом повышения эффективности работы железнодорожного транспорта в целом.

Эти положения полностью отвечают действующему на ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» приказу № 70 Н от 09.11.95 г. «О переходе на новую систему ведения путевого хозяйства на основе повышения технологического уровня и внедрения ресурсосберегающих технологий» и Постановлению Президента Республики Узбекистан № ПП-598 от 7.03.2007 г. «О мерах по обеспечению своевременной модернизации и капитального ремонта железнодорожных путей с использованием современных технологий».



Рис. 1 Схема железных дорог ГАЖК «Узбекистон темир йуллари»

В рамках программы по модернизации железнодорожного транспорта Республики Узбекистан ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» в настоящее время проводит реконструкцию существующих и строительство новых железнодорожных линий, электрификацию железных дорог, приобретение более совершенного подвижного состава, совершенствование конструкции пути и системы ведения путевого хозяйства. Указанное позволит перевести общую инфраструктуру железнодорожного транспорта суверенного государства Узбекистан на более высокий уровень, соответствующий мировым стандартам.

В рамках выполнения этой программы в части, касающейся модернизации существующих и строительства новых железнодорожных линий, ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» в настоящее время выполняет:

- реконструкцию железнодорожных линий с укладкой новых современных железобетонных шпал типа BF 70, изготавливаемых местным производителем по Евростандарту. Эксплуатируются шпалы BF 70 с упругими (эластичными) рельсовыми скреплениями типа «Pandrol Fastclip» (Англия);

- строительство новых железнодорожных линии (например, в 2009 г. завершено строительство железной дороги по направлению Ташгузар - Байсун – Кумкурган);

- реконструкция участка железной дороги Термез-Галаба с выходом на Афганистан, где ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» с 2010 г. начнет строительство новой железной дороги в направлении Мазари - Шарифа;

- подготовка к реконструкции и новому строительству для введения высокоскоростного движения на направлении Ташкент – Самарканд;

- обновление железнодорожных путей в плановом порядке на участках, требующих замены верхнего строения, а также ряд других проектов.

Основной частью этих проектов является модернизация конструкции железнодорожного пути с целью приведения его к нормам, соответствующим мировым стандартам по скоростям движения поездов и осевым нагрузкам от подвижного состава.

## 1.2 СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ

С 50-х годов прошлого столетия на железных дорогах бывшего Советского Союза начался переход на укладку и эксплуатацию бесстыкового пути с железобетонными шпалами типа С-56-2 (с 1980 года – ШС-1). Они предназначались для эксплуатации с жесткими клеммно – болтовыми скреплениями типа КБ, которые позволяют поездам двигаться со скоростью до 140 км/час и выдерживать осевые нагрузки до 23 тонн.

После полувековой эксплуатации этой конструкции пути становится очевидной необходимость перехода на более совершенную. При нынешнем

росте скоростей движения и осевых нагрузок от подвижного состава шпалы ШС-1 перестали соответствовать современным требованиям, предъявляемым к подрельсовому основанию по критериям прочности, надежности и ремонтпригодности.

К их основным недостаткам следует отнести значительные затраты труда при сборке путевой решетки, текущем содержании пути, а также нестабильность прижимного усилия скрепления и, как следствие, - угон и возможность выброса пути. При этом технология изготовления шпал ШС-1 на заводах, построенных десятки лет назад, также имеет ряд существенных недостатков. К ним относятся - отсутствие точного дозирования компонентов бетонной смеси и низкая передаточная прочность бетона; неравномерность натяжения преднапряженной арматуры; наличие изнашиваемых закладных деталей внутри шпалы, сокращающих срок ее службы. и т.д. Другими словами, шпала типа ШС-1 сегодня морально устарела.

В большинстве стран мира в последние годы при внедрении прогрессивных конструкций железнодорожного пути используются хорошо зарекомендовавшие себя современные типы эластичных рельсовых скреплений. Это напрямую связано с необходимостью применения новых, более современных железобетонных шпал и скреплений. Таковыми на ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» в настоящее время приняты шпалы ВF 70 со скреплениями «Pandrol Fastclip», характеристики которых приведены ниже.

В настоящее время в Узбекистане, как и во всех странах СНГ и Прибалтики эксплуатируются следующие четыре основные конструкции верхнего строения железнодорожного пути, приведенные ниже (рис. 2).

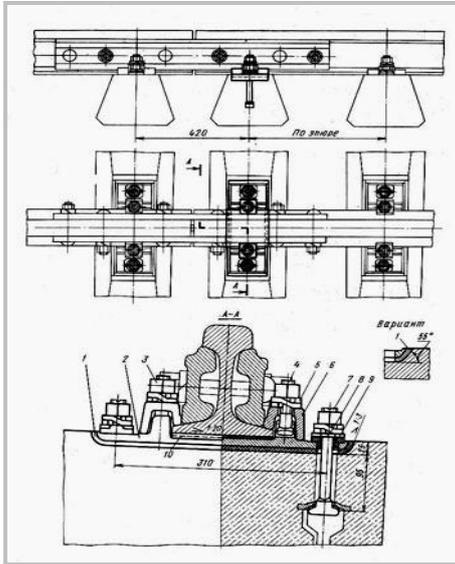
Особо следует отметить, что в большинстве стран мира в последние годы при внедрении прогрессивных конструкций железнодорожного пути используются хорошо зарекомендовавшие себя современные типы рельсовых скреплений с упругими клеммами.

Анализ данных многолетней эксплуатации различных типов эластичных рельсовых скреплений, обобщенный опыт их применения на различных дорогах мира дает основание говорить о преимуществе их по сравнению с жестким скреплением типа КБ. Они имеют ряд конструктивных преимуществ, более экономичны, просты в эксплуатации и ремонте.

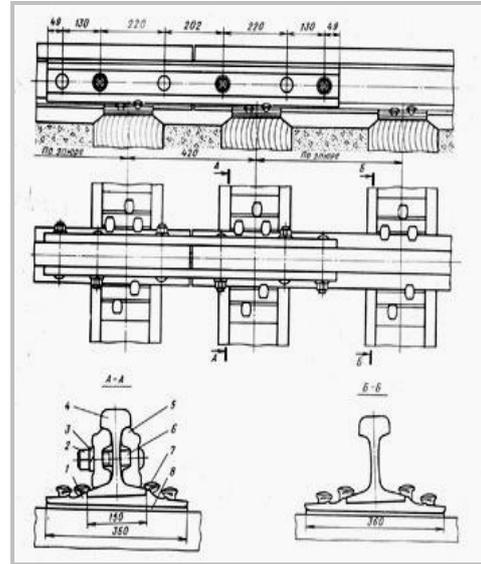
Приведенные скрепления объединяет наличие в их составе упругих клемм. В Узбекистане в настоящее время в массовом порядке укладывается и эксплуатируется путь со шпалам ВF 70 и упругими скреплениями типа «Pandrol Fastclip» (Англия), которые рассматриваются как наиболее перспективные.

**ТИПЫ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ СТРАН СНГ**

**а) с неупругими элементами**



**1. Скрепление КБ на железобетонных шпалах**



**2. Костыльное скрепление на деревянных шпалах**

**б) с упругими клеммами**



**3. Скрепление типа «Pandrol Fastclip» на железобетонных шпалах**



**4. Скрепление типа «Vossloh» на железобетонных шпалах**

Рисунок 2 Конструкции железнодорожного пути

### 1.3 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ СО ШПАЛАМИ BF 70 И СКРЕПЛЕНИЯМИ «PANDROL FASTCLIP»

1. Изготовлены по Европейскому стандарту EN 13230-1,2:2002 (O'z DSt EN 13230-1,2:2003)
2. Количество шпал на 1 км.....1680-1720 шт.  
*Конструкция шпалы предусматривает ее укладку на пути с эяурой 1680 - 1720 шт./км (для ШС-1 этот параметр равен 1840 шт./км, экономия составляет 120 – 160 шт./км).*
3. Ширина рельсовой колеи для шпал BF 70.....1520 мм
4. Ширина рельсовой колеи для шпал BF 70S.....1535 мм  
*Является универсальной для стран СНГ. По желанию заказчика этот параметр может быть изменен в сторону увеличения или уменьшения, например – 1435 мм (стандартная ширина колеи в странах Европы).*
5. Тип рельса.....P65,P75, UIC60  
*Шпалы BF70 могут эксплуатироваться с наиболее распространенными типами рельсов, например, P65 и P75 (страны СНГ) и UIC 60 (страны Европы) или любым другим с шириной подошвы рельса 150 мм.*
6. Уклон подрельсовых площадок.....1/20  
*Эта величина является универсальной для большинства стран мира.*
7. Длина шпалы.....2700 мм
8. Площадь опирания.....0,72 м<sup>2</sup>
9. Скорости движения пассажирских поездов.....до 250 км/ч
10. Скорости движения грузовых поездов.....до 100 км/ч
11. Максимальная осевая нагрузка.....до 25 т/ось  
*По желанию заказчика скорости движения и осевые нагрузки могут быть увеличены (за счет увеличения количества проволок, без изменения геометрии шпалы)*
12. Класс бетона/марка бетона.....не ниже В45/М600
13. Передаточная прочность бетона.....не ниже 40 МПа
14. Марка бетона по морозостойкости.....F200
15. Эластичные крепления.....Pandrol Fastclip / Vossloh W14/АРС  
*Шпалы производятся с эластичными креплениями типов «Pandrol Fastclip» (Великобритания) и Vossloh W14 (Германия). Технология изготовления позволяет в кратчайшие сроки модифицировать производственную линию для выпуска шпал с любым типом креплений.*
16. Расчетный срок службы шпал BF 70 и BF7S.....не менее 50 лет



Рис. 3 Шпалы BF 70 и узлы скрепления «Pandrol Fastclip» и «Vossloh W14»

#### 1.4 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Ниже в таблице 1 приведены основные параметры подвижного состава, влияющие на характер взаимодействия подвижного состава и пути, а в таблице 2 приведены их примеры для различных типов локомотивов и вагонов.

Приведенные выше параметры пути и подвижного состава принимаются в качестве исходных при расчетах напряженно – деформированного состояния системы «колесо - путь» и установлении оптимальных характеристик тягового подвижного состава для его внедрения и последующей эксплуатации на железных дорогах.

Перечисленные в таблице типы локомотивов были созданы в СССР или ближайшие годы постсоветского времени. Некоторые из этих типов локомотивов приведены ниже на рисунке. Как видно, многообразие существующих локомотивов вызывает определенные трудности при установлении их оптимальных параметров и ещё раз доказывает необходимость детального рассмотрения всех аспектов взаимодействия системы «подвижной состав - путь». Особое внимание следует уделять современным типам локомотивов.

К примеру, в России началось производство новых грузовых электровозов модели "ЭС5К "Ермак". Локомотив "2ЭС5К" предназначен для вождения грузовых поездов на железных дорогах колеи шириной 1 520 мм, электрифицированных на однофазном переменном токе промышленной частоты 50 Гц с номинальным напряжением 25 тыс. вольт. Максимальная скорость в эксплуатации - 110 км/час. Новый электровоз "2ЭС5К" заменяет в эксплуатации грузовые электровозы "ВЛ80" всех индексов.

Одним из современных типов электровозов, эксплуатируемых на ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» является, является электровоз "Узбекистан". Локомотив этой марки - первая поставка в рамках осуществления инвестиционного проекта ЕБРР "Развития и модернизации локомотивного хозяйства Узбекских железных дорог" - на ГАЖК работает в составе скоростного экспресса "Регистан", курсирующего на линии Ташкент-Самарканд.

Выиграв международный тендер, Чжучжоуский завод (Китай) получил заказ на изготовление 12 электровозов для Узбекистана. Локомотив с великолепным внешним и внутренним дизайном, с комфортными условиями для работы машиниста и помощника машиниста, грузо-пассажирский, мощностью 6000 киловатт, по заказу ГАЖК «Узбекистон темир йуллари» имеет конструктивную скорость 120 км/ч. Конструкционная скорость может корректироваться по требованию заказчика. Использование в конструкции рекуперативного торможения позволяет часть электроэнергии возвращать в контактную сеть.

Основные типы локомотивов приведены на рис. 4.

<b>ЭЛЕКТРОВОЗЫ СЕРИИ ВЛ</b>		
		
<b>ВЛ 4</b>	<b>ВЛ8; ВЛ8м</b>	<b>ВЛ10к</b>
		
<b>ВЛ11</b>	<b>ВЛ15</b>	<b>ВЛ23; 2ВЛ23</b>
		
<b>ВЛ40у</b>	<b>ВЛ60</b>	<b>ВЛ80к</b>



**ВЛ80р**



**ВЛ 80с**



**ВЛ80т**



**ВЛ80Тк**



**ВЛ81**



**ВЛ85**

**ТЕПЛОВОЗЫ СЕРИИ ТЭП**



**ТТЭП70**



**ТЭП70у**



**ТЭП70БС**

**ЭЛЕКТРОВОЗЫ СЕРИИ ЧС**



**ЧС2**



**ЧС2Т**



**ЧС4**



**ЧС6**



**ЧС7**



**ЧС8**

## ЛОКОМОТИВЫ ПОСЛЕДНЕГО ПОКОЛЕНИЯ

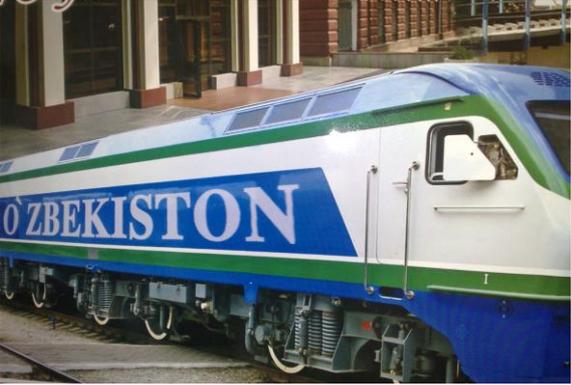
		
<b>2ЭС4к «Дончак»</b>	<b>2ЭС5к</b>	<b>2ТЭ25к «Пересвет»</b>
		
<b>Сапсан (Россия)</b>	<b>ЭП1; ЭП2к; Эп200</b>	<b>ЭС5к «Ермак»</b>
		
<b>Узбекистан – ГАЖК «УТЙ»</b>	<b>AVE (Talgo) – Испания для ГАЖК «УТЙ»</b>	

Рисунок 4.

### Контрольные вопросы

1. История возникновения железнодорожного транспорта Среднеазиатского региона
2. Современное состояние железнодорожного транспорта Республики Узбекистан
3. Современные конструкции пути
4. Основные характеристики железнодорожного пути со шпалами ВF 70 и скреплениями «Pandrol Fastclip»
5. Основные типы подвижного состава.
6. Подвижной состав последнего поколения.

## **ЛЕКЦИЯ 2. ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА.**

### **2.1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ХАРАКТЕР ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Оптимизация условий и улучшение качества взаимодействия подвижного состава и пути является важнейшим фактором, влияющим практически на все технико-экономические показатели работы железнодорожного транспорта в целом. Это относится, прежде всего, к:

- срокам службы всех элементов верхнего строения пути и подвижного состава;
- эксплуатационным показателям работы железных дорог (скоростям движения поездов, осевым нагрузкам, грузонапряженности эксплуатируемых линий и др.);
- перечню и периодичности выполнения работ по текущему содержанию и ремонтам пути и подвижного состава;
- комфортабельности перевозки пассажиров и сохранности грузов;
- безопасности движения поездов и др.

В связи с отмеченным вопросам взаимодействия пути и подвижного состава с момента возникновения железнодорожного транспорта в целом и до настоящего времени уделяется первостепенное значение. По мере изучения вопросов взаимодействия системы «колесо - путь» и разработки практических рекомендаций его улучшению, была выявлена очевидность совместного исследования взаимодействия и взаимного влияния друг на друга железнодорожного пути и подвижного состава. Именно в этом направлении в настоящее время ведется большинство научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по установлению оптимальных параметров пути и подвижного состава с позиций оптимизации их взаимодействия.

В процессе формирования, изучения и развития вопросов взаимодействия пути и подвижного состава наибольший вклад в эту область знаний внесли известные ученые:

- Ф. Энрольд: расчет взаимодействия подвижного состава и пути и расчет рельсов на изгибающую прочность;
- акад. Петров Н.П.: теория сил инерции и необрессоренных масс; применение теории вероятностей к вопросам взаимодействия подвижного состава и пути;
- проф. Годыцкий-Цвирко, Тимошенко С.П.: разработка теории взаимодействия, принятие расчетной схемы пути – как балки на сплошном упругом основании;
- Васютынский А.Л.: изучение расчетных параметров железнодорожного пути и подвижного состава;

- проф. Чернышев М.А. и Сергеев Б.Н.: практические методы расчетов; влияние тоннажа на накопление остаточных деформаций, связь эксплуатационных показателей и конструкции пути;

- Шахунянец Г.М., Вериго М.Ф., Амелин С.В., Коган А.Я., Смирнов М.П., Андреев Г.Е., Яковлева Т.Г., Виноградов В.В., Лазарян В.А., Фришман М.А., Чернышов М.А., Ершов О.П., Альбрехт В.Г., Яковлев В.Ф., Куценко С.М., Ковалев Н.А. и другие ученые – разработка и корректировка теории взаимодействия пути и подвижного состава и практических методов расчета железнодорожного пути под воздействием динамических нагрузок.

Для построения оптимальной модели взаимодействия пути и подвижного состава необходимо проанализировать и оптимизировать их параметры. Ниже приведены основные параметры железнодорожного пути (табл. 1) и подвижного состава (табл. 2), определяющие характер их взаимодействия.

Таблица 1 Основные расчетные характеристики железнодорожного пути

Наименование расчетной характеристики	Условное обозначение	Единица измерения
Модуль упругости подрельсового основания	$U$	кг/см <sup>2</sup>
Коэффициент относительной жесткости рельса и основания	$K$	см <sup>-1</sup>
Площадь поперечного сечения рельса	$F$	см <sup>2</sup>
Момент сопротивления рельса	$W$	см <sup>4</sup>
Момент инерции рельса	$J$	см <sup>3</sup>
Площадь подрельсовой подкладки;	$\omega$	см <sup>2</sup>
Опорная площадь полушпалы с учетом изгиба.	$\Omega_\alpha$	см <sup>2</sup>

Таблица 2 Основные расчетные характеристики подвижного состава

Наименование расчетной характеристики	Условное обозначение	Единица измерения
Тип и серия подвижного состава	–	–
Статическая нагрузка от колеса на рельс	$P_{cm}$	кг
Вес необрессоренных частей экипажа	$q$	кг
Жесткость рессорного подвешивания	$\mathcal{J}$	кг/мм
Статический прогиб рессор	$f_{cm}$	мм
Диаметр колеса по кругу катания	$d$	см
Количество осей тележки	$n$	шт
Колесная формула ( $L_i$ – расстояние между центрами колесных пар, $l_o$ – расстояние между последней осью первой тележки и первой осью второй тележки)	$L_i$	см
	$l_o$	см
Конструкционная скорость	$V_{констр}$	км/ч

Таблица 3. Характеристики верхнего строения пути

№ п/п	Характеристика конструкции пути	$U$ , МПа	$K$ , $\frac{1}{\text{м}}$	$F*10^{-4}$ , $\text{м}^2$	$I_r*10^{-8}$ , $\text{м}^4$	$I_B*10^{-8}$ , $\text{м}^4$	$W_0*10^{-6}$ , $\text{м}^3$	$W_6*10^{-6}$ , $\text{м}^3$	$\omega*10^{-4}$ , $\text{м}^2$	$\Omega a*10^{-4}$ , $\text{м}^2$
<i>Путь с железобетонными шпалами и типовыми рельсовыми прокладками</i>										
	P75(6)1840(ЖБ)Щ	150	1,438	88,74	643	4180	509	492	518	2975
1.	P75(6)2000(ЖБ)Щ	167	1,477	88,74	643	4180	509	492		
2.	P65(6)1840(ЖБ)Щ	150	1,536	78,24	550	3208	435	417		
3.	P65(6)2000(ЖБ)Щ	167	1,578	78,24	550	3208	435	417		
4.	P50(6)1840(ЖБ)Щ	150	1,772	61,73	359	1813	285	273		
5.	P50(6)2000(ЖБ)Щ	167	1,820	61,73	359	1813	285	273		
<i>Путь с железобетонными шпалами и рельсовыми прокладками повышенной упругости</i>										
6.	P75(6)1840(ЖБ)Щ	100	1,299	88,74	643	4180	509	492	518	2975
7.	P75(6)2000(ЖБ)Щ	110	1,330	88,74	643	4180	509	492		
8.	P65(6)1840(ЖБ)Щ	100	1,338	78,24	550	3208	435	417		
9.	P65(6)2000(ЖБ)Щ	110	1,421	78,24	550	3208	435	417		
10.	P50(6)1840(ЖБ)Щ	100	1,600	61,73	359	1813	285	273		
11.	P50(6)2000(ЖБ)Щ	110	1,638	61,73	359	1813	285	273		
<i>Путь с деревянными шпалами</i>										
12.	P75(6)1840(1)Щ	27	0,936	88,74	643	4180	509	492	612	2853
13.	P75(6)2000(1)Щ	29	0,957	88,74	643	4180	509	492		
14.	P65(6)1600(11)Щ	23	0,961	78,24	550	3208	435	417	612	2465

15.	P65(6) 1840( 11 )Щ	26	0,991	78,24	550	3208	435	417		2561
16.	P65(6)2000(11)Щ	29	1,018	78,24	550	3208	435	417		
17.	P65(6)1600(11)Гр	18	0,904	78,24	550	3208	435	417		
18.	P65(6)1840(11)Гр	21	0,909	78,24	550	3208	435	417		
19.	P65(6)2000(11)Гр	23	0,961	78,24	550	3208	435	417		
20.	P50(6)1600(11)Щ	23	1,110	61,73	359	1813	285	273	527	2466
21.	P50(6)1840(11)Щ	21	1,145	61,73	359	1813	285	273		
22.	P50(6)2000(П)Щ	20	1,176	61,73	359	1813	285	273		
23.	P50(6)1600(11)Гр	10	1,044	61,73	359	1813	285	273		2562
24.	P50(6)1840(11)Гр	20	1,085	61,73	359	1813	285	273		
25.	P50(6)2000(11)Гр	20	1,110	61,73	359	1813	285	273		
26.	P50(6)1600(11)П	10	1,144	61,73	359	1813	285	273		
27.	P50(6)1840(11)П	20	1,085	61,73	359	1813	285	273		
28.	P50(6)2000(11)П	23	1,110	61,73	359	1813	285	273		2562
29.	P50(6)1440(11)П	16	1,097	—	—	—	217	204		2562
30.	P50(6)1600(11)П	18	1,114	—	—	—				
31.	P50(6)2000(11)П	23	1,202	—	—	—				

*Примечание. Для зимних условий эксплуатации модуль упругости  $U$  увеличивается в  $1,5 \div 2,0$  раза*

Таблица 4. Расчетные характеристики подвижного состава

Тип и серия подвижного состава	$P_{с\tau}$ кг	$q$ , кг	$\mathcal{K}$ кг/мм	$d$ , см	$n$ , шт.	$f_{с\tau}$ мм	$L_b$ см	$l_0$	$V_{констр}$ км/ч
Электровозы пассажирские									
ЧС2, ЧС2г	10250	1925	135	125	3	120	240-220	380	160
ЧС4, ЧС4г	10500	1850	87	125	3	140	230-230	500	160
ЧС7	10750	1750	125	125	2	169	320	470	160
ЧС8	10950	1750	184	125	2	169	295	505	160
ЧС200	9750	1625	91	125	2	197	320	480	200
Электровозы грузовые									
ВЛ8	11500	3170	118	120	2	70	320	380	80
ВЛ10	11500	3160	116	125	2	135	300	450	100
ВЛ10у, ВЛ12	12500	3055	152	125	2	155	300	450	100
ВЛ15	11500	3050	152	125	2	140	290	386	100
ВЛ22м	11000	3250	135	120	3	59	210-210	380	80
ВЛ23	11500	3170	142	120	3	59	220-220	380	100
ВЛ60кп	11500	3080	116	125	3	60	230-230	580	100
ВЛ80к,с,т,р	12000	2760	116	125	2	128	300	450	110
ВЛ85	11500	2760	152	125	2	156	290	386	110
Тепловозы пассажирские									
ТЭ7	10500	2330	131	105	3	62	210-210	440	140
ТЭП10	10750	2200	129	105	3	71	210-210	440	140
ТЭП60, 2ТЭП60	10750	1450	99	105	3	94	240-220	580	160
ТЭП70	11250	1380	164	122	3	187	215-215	765	160
ТЭП80	11250	1435	139	122	4	183	185-250-185	750	160
Тепловозы грузовые									
М62, 2М62, М62У, 2М62У	10500	2250	110	105	3	69	185-185	440	100
ТЭ3	10500	2330	140	105	3	57	210-210	440	100
ТЭ10	11400	2150	129	105	3	69	210-210	440	100
2ТЭ116, 2ТЭ10В, 2ТЭ10У, 2ТЭ10М	11500	2230	109	105	3	102	185-185	630	100
2ТЭ10УТ	11500	2200	112	105	3	102	210-210	630	120
ТЭМ2УМ	10000	2330	115	105	3	115	210-210	440	100
ТЭМ3	10600	2980	95	105	3	87	185-185	630	100
ТЭМ17	10550	2080	110	105	3	110	185-185	630	100
ЧМЭ3	10250	2100	166	105	3	166	200-200	400	95
Вагоны									
4-осные на тележках ЦНИИ-Х3	11000	995	200	95	2	48	185	675	120
6-осные на тележках УВ3-9М	10700	1070	195	95	3	50	175-175	694	100
8-осные на тележках ЦНИИ-Х3	10550	995	200	95	4	48	185-135-185	702	100

Узбекистан	11 500	2600	135,8	125	2	106	280	440	*
------------	--------	------	-------	-----	---	-----	-----	-----	---

Примечание. \* Конструкционная скорость для локомотивов серии «Узбекистан» устанавливается заказчиком.

## 2.2 ОСНОВНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ПУТИ

Основными характеристиками эксплуатационных условий обычно являются нагрузки от колесных пар подвижного состава на рельсы, скорости движения, грузонапряженность и прошедший по пути тоннаж; эти характеристики не одинаковы в различные моменты времени и для различных условий участков (сечений) пути. Важнейшими параметрами природно-климатических факторов являются метеорологическая обстановка и температурно-влажностные условия работы пути (переменные во времени и в пространстве).

Следует отметить, что напряжения в рельсах от воздействия подвижного состава, природных факторов и от собственных воздействий конструкции пути оказываются нередко одного порядка. К примеру, напряжения изгиба в рельсах типа Р65, лежащих на железобетонных шпалах на прямых участках пути, под пассажирским локомотивом ТЭП10, движущимся со скоростью 39 м/с, находятся в границах 85-95 Мпа. Температурные напряжения в рельсах при изменении температуры в неподвижной части бес стыковой плети по сравнению с нейтральной, например, на 40С° равны 100 Мпа. В результате неравномерности остывания рельса по его поперечному сечению после проката и после его правки в нем возникают остаточные напряжения около 50-100 Мпа и даже более. При укладке рельсов в кривые в них в результате искривления также возникают собственные напряжения. Так, в рельсах типа Р65 при укладке в кривую радиуса 1000 м напряжения составляют 15,5 Мпа, а кривую радиуса 250 м - 62 Мпа.

Путь должен быть устойчивым и прочным в каждом его сечении в любое время.

Расчет прочности пути и его элементов следует производить на выносливость и износостойкость. Иначе говоря, расчетами следует определять ресурс верхнего строения и его элементов, т.е. наработку (объем работы), которую конструкция может безопасно выдержать за срок службы. При этом расчете должны учитываться весь спектр воздействий от подвижного состава, природно-климатических факторов, собственные воздействия и условия их проявления. В число последних входят температурно-влажностный режим (например, температура бес стыковых рельсовых плетей, влажность древесины и балластного слоя, промороженность пути и т.п.), изношенность конструкции, качество ее содержания и т.п.

Следует также учитывать неровности, имеющие место, как на колесах подвижного состава, так и на железнодорожном пути (раздел 2.3)

## 2.3 НЕРОВНОСТИ НА КОЛЕСАХ И НА ПУТИ.

Неровности на новых колесах могут быть из-за неточностей очертаний их поверхностей катания, допущенных в изготовлении (так называемая овальность колёс  $\eta_k$ , рис. 5,а) а также возникшие в процессе эксплуатации (например, ползун, рис. 5,б).

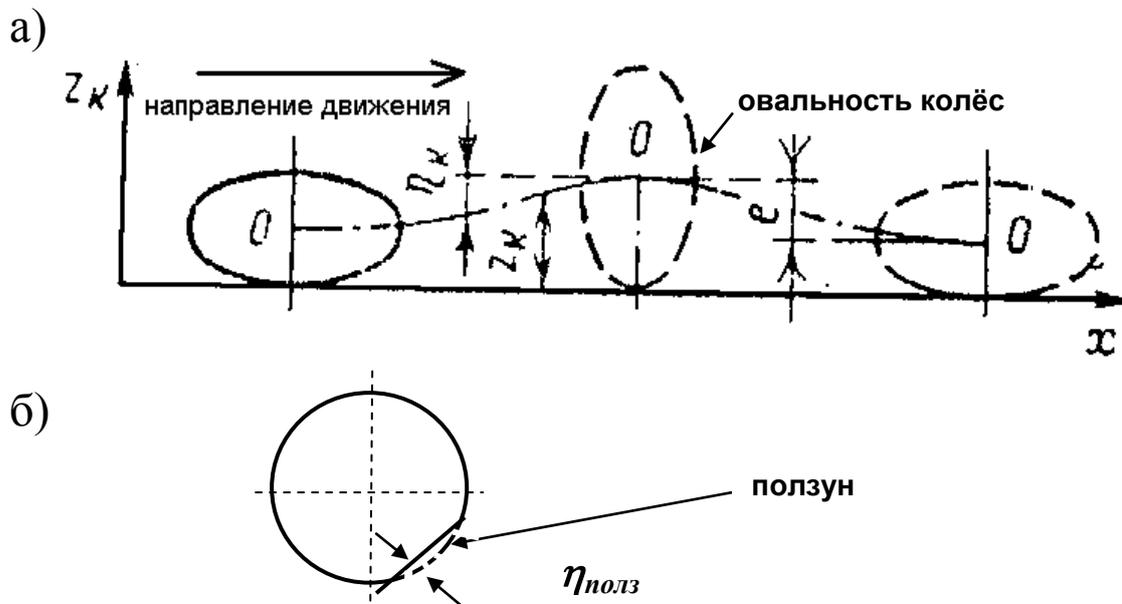


Рис. 5

Ординаты  $\eta_n$  неровностей на пути, измеренные по нормали к правильному положению рельсовых нитей, также могут достигать до значительных размеров (рис. 6).

Кроме явных геометрических неровностей, на пути могут быть неявные, потайные неровности, называемыми силовыми.

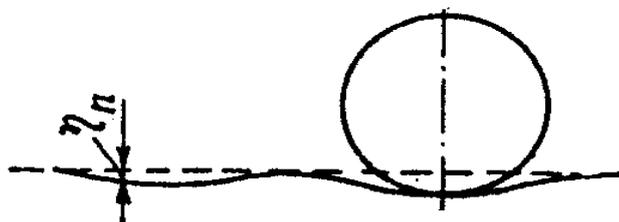


Рис. 6

Ординаты  $\eta_n$  неровностей на пути представляют суммы ординат геометрических и силовых неровностей.

Неровности на колесах можно также разделить на явные (геометрические) и неявные. Дисбаланс по своему эффекту является типичным представителем неявной неровности.

Таким образом, реальный путь и реальные колеса обладают несовершенствами в виде явных и неявных неровностей.

Суммарная неровность от колеса и пути в точке их контакта имеет ординату

$$\eta_n = \eta_n + \eta_k,$$

Если колесо то поднимается, то опускается на величину  $\eta_n$ , то

существует скорость  $\dot{\eta}_n$  и ускорение  $\ddot{\eta}_n$  этого перемещения. Возникающая при этом из-за неровности сила инерции

$$P_n = m_k \ddot{\eta}_n,$$

Дисбаланс колеса представляет собой неявную неровность, которая непрерывна и регулярна (рис. 7).

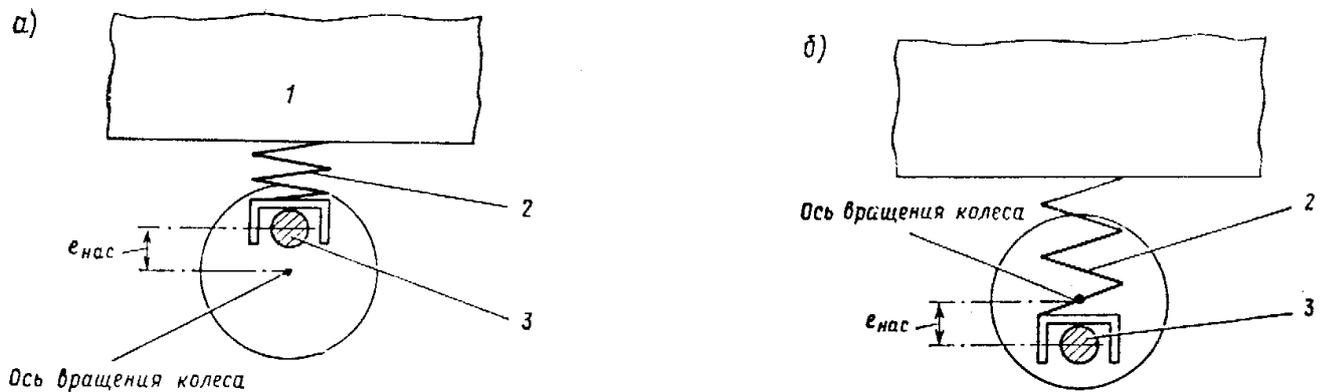


Рис 7

Значения ординат этой регулярной неровности (рис 7), вертикальные составляющие скорости и ускорения вертикального перемещения выражаются формулами; вертикальная составляющая силы инерции  $P_d$ , образуемая из-за дисбаланса, совпадает с силой инерции с учетом того, что вращающаяся масса  $m_{к-о}$  колеса составляет долю  $\alpha_d$  всей массы колеса  $m_k$ . Таким образом, вертикальная составляющая сила инерции может рассчитываться по общей формуле для определения вертикальных составляющих любых сил инерции. Поэтому в общем случае влияние явных и неявных неровностей определяется

возбуждаемыми силами инерции, равнодействующая вертикальных составляющих которых равна произведению соответствующей массы на ускорение.

## 2.4 КОЛЕБАНИЯ КУЗОВА.

При наличии неровностей на пути и на колесах последние при поступательном движении по этим неровностям то поднимаются, то опускаются и увлекают за собой рессорные комплекты, вызывая их колебания и находящихся на них обрессоренных масс. Колеблющаяся обрессоренная масса создает силы инерции, равные, как и обычно, произведению массы (в данном случае обрессоренной массы) на действующее на нее ускорение.

$$I_{об} = m_{об} \ddot{z}_{рес}$$

Обозначим  $m_{об}$  - обрессоренную массу приходящуюся на одно колесо,  $z_{рес}$  - ординату колебания этой массы на рессоре (на рессорном комплекте) относительно своего статического положения.

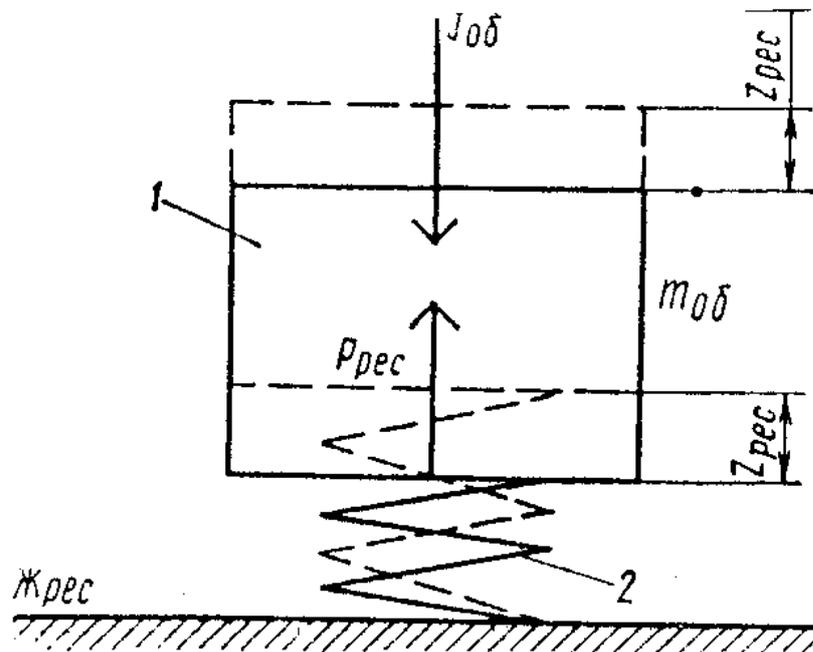


Рис 8

Сила инерции колеблющейся на рессоре массы возбуждает равную ей по значению и обратную по знаку реакцию рессоры  $P_{рес}$ . При незатухающих колебаниях эта реакция пропорциональна деформации (сжатия, разжатия) рессоры, равной уже ранее указанному значению  $z_{рес}$  и обратной ей по знаку. Таким образом

$$I_{об} = m_{об} \ddot{z}_{рес} = - P_{рес} = - \mathcal{J}_{рес} Z_{рес}$$

В последующем силу инерции колеблющегося кузова для простоты будем выражать через силу (реакцию) сжатия рессорного комплекта:

$$P_{рес} = \mathcal{J}_{рес} Z_{рес}$$

Здесь  $\mathcal{J}_{рес}$  - жесткость рессорного комплекта.

Отметим, что жесткость  $\mathcal{J}$  любой детали численно равна силе  $P$ , приложенной к детали и вызывающей упругую линейную деформацию  $Z$  в сечении под силой (в направлении действия силы), равную единице.

Жесткость  $\mathcal{J}_{рес}$  рессорного комплекта грузового вагона с современными тележками ЦНИИ-ХЗ равна 2 кН/мм, а с тележками типа МТ-50 - 5 кН/мм, у пассажирского вагона - от 0,6 до 0,8 кН/мм, у локомотивов - от 0,8 до 1,5 кН/мм.

Следует отметить, что жесткость стабилизированного пути  $\mathcal{J}_n$  в зависимости от его конструкции и состояния обычно находится в границах от 500 до 2000 кН/см (50-200 кН/мм), т.е. она во многом раз больше, чем жесткость рессорного подвешивания. Это дает возможность в пределах обычно требуемой точности рассматривать колебания кузова, не учитывая упругость пути.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник инженера-путейца. т. 1, М.: Транспорт, 1972 г.
2. Шахунян Г.М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987 г.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Основные параметры пути и подвижного состава, влияющие на характер их взаимодействия
2. Основные эксплуатационные характеристики.
3. Напряжения в рельсах от различных факторов.
4. Основа расчета пути на прочность и устойчивость.
5. Дисбаланс колес.
6. Неровности на колесе.
7. Неровности на пути.
8. Сила инерции из-за неровностей на колесе и пути.
9. Суммарная сила инерции с учетом дисбаланса колес.
10. Сила инерции от колебания рессор.
11. Сравнительная жесткость пути и подвижного состава.

## ЛЕКЦИЯ 3. КОЛЕБАНИЯ КОЛЕС И ПУТИ.

### 3.1 СИЛЫ ИНЕРЦИИ КОЛЕБАНИЯ КОЛЕСА И ПУТИ.

Силы инерции, возникающие из-за несовершенства пути и колес и колебаний обрессоренных масс, сами в свою очередь являются источником колебаний пути с движущимся колесом.

Это происходит из-за переменности нагрузки от колеса на рельс, так как переменны передаваемые им на рельс указанные выше силы инерции.

В связи с этим упругий прогиб  $y_o$  рельса под колесом также является переменным. Но если прогиб  $y_o$  переменный то, следовательно, существует:

•  
скорость  $\dot{y}_o$  (как первая производная упругого прогиба по времени)

••  
и ускорение этих перемещений  $\ddot{y}_o$  (как вторая производная).

Возникающая при этом сила инерции определяется по формуле:

$$P_{ин} = (m_k + m_n) \ddot{y}_o = m_k (1 + \alpha_n) \ddot{y}_o,$$
$$m_n = \alpha_n m_k,$$

где:  $m_k$  - необрессоренная масса колеса;

$m_n$  - масса пути, участвующая в взаимодействии (в практических расчетах ее принимают сосредоточенной в точке контакта колеса с рельсом).

В порядке первого приближения можно считать массу пути линейно пропорциональной необрессоренной массе колеса.

$\alpha_n$  - коэффициент пропорциональности (находится в пределах от 1,31 до 1,48 в зависимости от конструкции пути).

### 3.2 СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМ.

Кроме возникающих в системе колесо - путь сил инерции в пути действуют сопротивления его колебаниям - упругие и неупругие. Силы упругого отпора пропорциональны прогибу  $y_o$  и равны  $\mathcal{J}_n y_o$  (здесь  $\mathcal{J}_n$  - жесткость пути).

Силы *неупругого отпора* (диссипативные силы) могут проявляться различно.

К ним относятся *силы трения*, практически не зависящие от значений действующих нагрузок и вызываемых ими осадок  $y$ ; они направлены навстречу движению. Например, силы трения  $W_{ш}$  боковых поверхностей колеблющихся шпал в балластном слое зависят от давления

на шпалу  $E_{ш}$  призмы обрушения балластного слоя и от коэффициента трения балласта о боковую поверхность шпал и не зависят от нагрузок на рельс.

К диссипативным силам относятся и *силы, зависящие от действующих на рельс нагрузок* и вызываемых ими осадок  $y$ , которые так же, как все силы, противодействующие движению, направлены ему навстречу. Так, сила  $P$ , передаваемая на шпалу, создает давление на балласт интенсивностью  $p$  (рис 9).

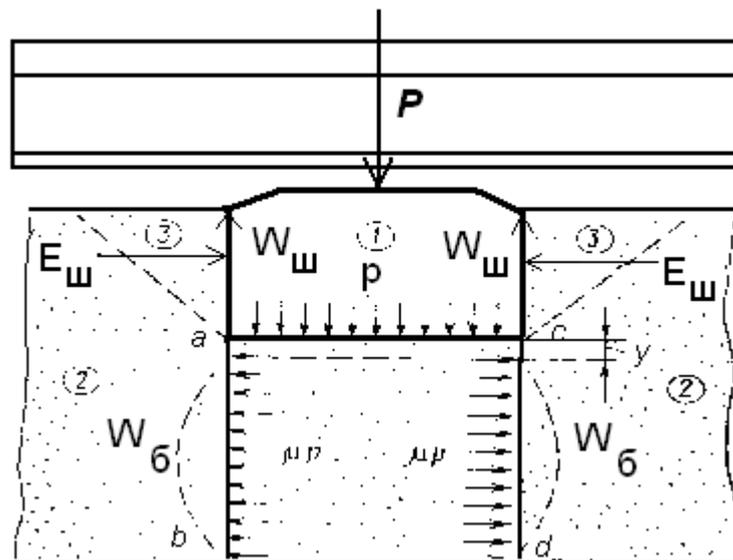


Рис 9

Под влиянием этого давления мысленно вырезанная в балластном слое полоса  $abcd$ , сжимаясь под нагрузкой, стремится выпучиться и принять бочкообразную форму. На вертикальных стенках  $ab$  и  $cd$  этой полосы образуется боковой распор  $\mu p$ , где  $\mu$  - коэффициент бокового распора. При колебаниях шпалы и балластной полосы появляются вертикальные силы трения

$$W_6 = \int_0^{h_6} f \mu p \, dh$$

Здесь  $f$  - коэффициент трения балласта о балласт;  
 $h_6$  - толщина полосы  $abcd$ .

Фактический процесс колебания балластного слоя (и земляного полотна) много сложнее, но из приведенных рассуждений очевидно

существование *диссипативных сил*, пропорциональных действующей силы  $P$  и вызываемой ею осадке  $y$ .

Диссипативные силы проявляются также в виде *сил вязкого трения*, пропорционального скорости перемещения  $y$ . В строительных конструкциях наибольшее влияние оказывают рассмотренные выше *силы сухого трения*, пропорциональные  $P$ . Однако математически задача решается проще при учете лишь вязкого трения.

Поэтому в дифференциальном уравнении динамического равновесия механической системы колесо - путь силы неупругого сопротивления учитываются:

- в виде вязкого трения, равного  $f_o \dot{y}_o$ .

При этом  $f_o$  - параметр приведенного вязкого трения, к которому эквивалентно приводятся силы неупругого сопротивления, фактически действующего в пути. Для пути с деревянными шпалами согласно экспериментальным и теоретическим исследованиям этот коэффициент находится в пределах 110 - 350 кН с/м.

### 3.3 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМЫ КОЛЕСО - ПУТЬ.

При рассмотрении условий динамического равновесия системы колесо - путь внешними воздействиями на систему считаются силы земного притяжения, создающие весовую составляющую  $P_o$  и силы реакции рессор  $P_{рес}$  колеблющейся обрессоренной массы, передаваемой на колесо через рессорный комплект. Реактивными силами системы являются все рассмотренные выше силы инерции, в том числе возбуждаемые несовершенствами пути и колеса, а также силы упругого и неупругого отпора пути.

Согласно принципу Даламбера внешние силы должны в каждый момент времени уравновешиваться реактивными силами, в том числе силами инерции. Таким образом, основное дифференциальное уравнение динамического равновесия механической системы колесо - путь будет следующим:

$$\begin{aligned} & \ddot{(m_k + m_n)} y_o + f_o \dot{y}_o + \mathcal{H}_n y_o + \\ & + m_k (\ddot{\eta}_n + \ddot{\eta}_k + \alpha_D \ddot{\eta}) = P_o + P_{рес} \end{aligned}$$

Решение дифференциального уравнения колебания системы колесо - путь приведено в /1/. Изучение этого вопроса является составной частью самостоятельной работы студента.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь, 1985 г.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Источник колебаний системы путь - колесо.
2. Силы инерции колебаний колеса и пути.
3. Упругие силы сопротивления.
4. Неупругие силы сопротивления колебаниям.
5. Силы, учитываемые при взаимодействии колеса и пути.
6. Дифференциальное уравнение равновесия системы колесо - путь.

## ЛЕКЦИЯ 4: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ.

### 4.1 РАСЧЕТНАЯ СХЕМА.

Обычно рельс рассматривается как балка бесконечно большой длины неизменного сечения, лежащая на сплошном упругом однородном основании с двусторонними реакциями. При современных конструкциях пути разница в расчетах по сравнению с балкой на многих упругих точечных опорах не превышает 5-7 % (рис. 10).

Расчетная схема рельса как балки на сплошном упругом основании



Расчетная схема рельса как балки на многих точечных опорах



Рис. 10

Двусторонними упругими реакциями основания реальный путь не обладает, так как ни балласт, ни грунт на растяжение не работают; сопротивляется выгибу рельса вверх лишь его вес и вес опор, если рельс к ним плотно притянут.

Принятое допущение не вносит, однако, существенных неточностей в определение расчетных значений воздействий нагрузок на путь, так как в зонах действия расчетных максимальных изгибающих рельс моментов, давлений на опору и прогибов рельса происходит упругое сжатие основания.

### 4.2 ЗАВИСИМОСТЬ ПРОГИБА И ЛИНЕЙНОГО ОТПОРА.

Основной характеристикой для статического расчета является связь между упругим прогибом  $y$  в каждом сечении и погонным упругим отпором в том же сечении. При нелинейной зависимости эта связь выражается в виде

$$dq = - U d y$$

Знак минус поставлен потому, что направление упругого отпора всегда обратно упругому прогибу, его вызвавшему. Без учета знака

$$U = dq / dy$$

При линейной зависимости, которая обычно принимается в практических расчетах,

$$q = - U / y$$

при этом без учета знака

$$U = q / y$$

#### 4.3. МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ.

Обычно параметр  $U$  определяется экспериментально. Этот параметр является важнейшим в расчетах прочности. Он называется модулем упругости под рельсового основания и представляет собою погонный упругий отпор основания, отнесенный к единице прогиба.

На пути с деревянными шпалами в зависимости от рода древесины, типов и состояния шпал, материала, толщины и состояния балластного слоя, от характеристики земляного полотна и его состояния параметр  $U$  летом может быть в границах 15-50 МПа (обычно 25 - 27). На пути с железобетонными шпалами и деревянными прокладками или тонкими резиновыми прокладками (толщиной 5 - 7 мм) при хорошо подбитых шпалах летом  $U = 100 \div 200$  МПа. Зимой в районах с зимним промерзанием грунта  $U$  в 2 - 4 раза больше, чем летом.

Укладкой в путь упругих элементов можно достигнуть требуемого значения модуля. При этом обязательно размещение упругих элементов как можно ближе к рельсу, чтобы обрессоривать по возможности только его. Укладывают на шпальные упругие прокладки повышенной упругости толщиной 13-15 мм с развитой формой, например ребристые (рис. 3.2). Такие прокладки изготовляют из резинового регенерата (т.е. резины вторичного использования). Подрельсовые прокладки разной толщины применяют для обеспечения плотного прилегания рельсов к прокладкам, создания высоких фрикционных свойств и для регулировки положения рельсов по высоте.

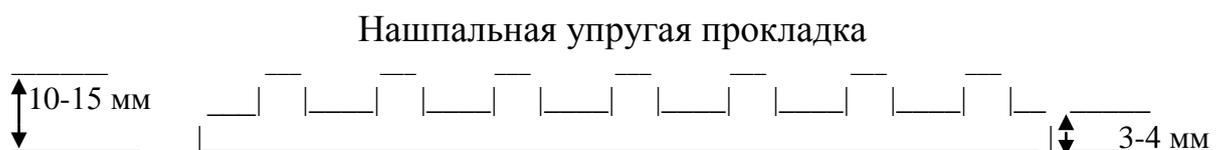


Рис. 11

#### 4.4 ОБЩИЙ МОДУЛЬ УПРУГОСТИ.

Модуль упругости подрельсового основания является одним из основных параметров, влияющим на формирование и качество взаимодействия подвижного состава и пути, а также практически на все технико-экономические показатели работы железнодорожного транспорта в целом. Это относится, прежде всего, к:

- срокам службы всех элементов верхнего строения пути и подвижного состава;

- эксплуатационным показателям работы железных дорог (скоростям движения поездов, осевым нагрузкам, грузонапряженности эксплуатируемых линий и др.);

- перечню и периодичности выполнения работ по текущему содержанию и ремонтам пути и подвижного состава;

- комфортабельности перевозки пассажиров и сохранности грузов;

- безопасности движения поездов и др.

Модуль упругости подрельсового основания формируется всеми составляющими элементами (промежуточное рельсовое скрепление, подрельсовое основание, балластный слой и земляное полотно), т.е. для исследования модуля упругости подрельсового основания следует иметь в виду, что подрельсовое основание является многослойным.

Влияние каждого слоя (под рельсовые прокладки, шпалы, балласт, земляное полотно) на модуль  $U$  может быть определено из следующего. Общий упругий прогиб всех слоев

$$y = \sum_{i=1}^{i-1} y_i$$

Здесь  $y_i$  - линейная упругая деформация каждого слоя, находящегося под воздействием упругого отпора. Составляющая  $U_i$  модуля упругости под рельсового основания  $U$

$$U_i = q / y_i$$

В соответствии с ранее приведенными формулами получим:

$$1/U = y/q = \sum y_i / q = \sum 1/U_i.$$

Таким образом, через составляющие  $U_i$  отдельных слоев можно получить общий модуль  $U$  всего основания:

$$1/U = \sum 1/U_i$$

## Связь деформации рельса и модуля упругости подрельсового основания

Деформация рельсов в вертикальной плоскости происходит за счет узла промежуточного скрепления, деформации и прогиба шпалы, деформации балласта и земляного полотна.

Схема формирования модуля упругости подрельсового основания и принцип его определения приведены на рисунках 12 и 13.

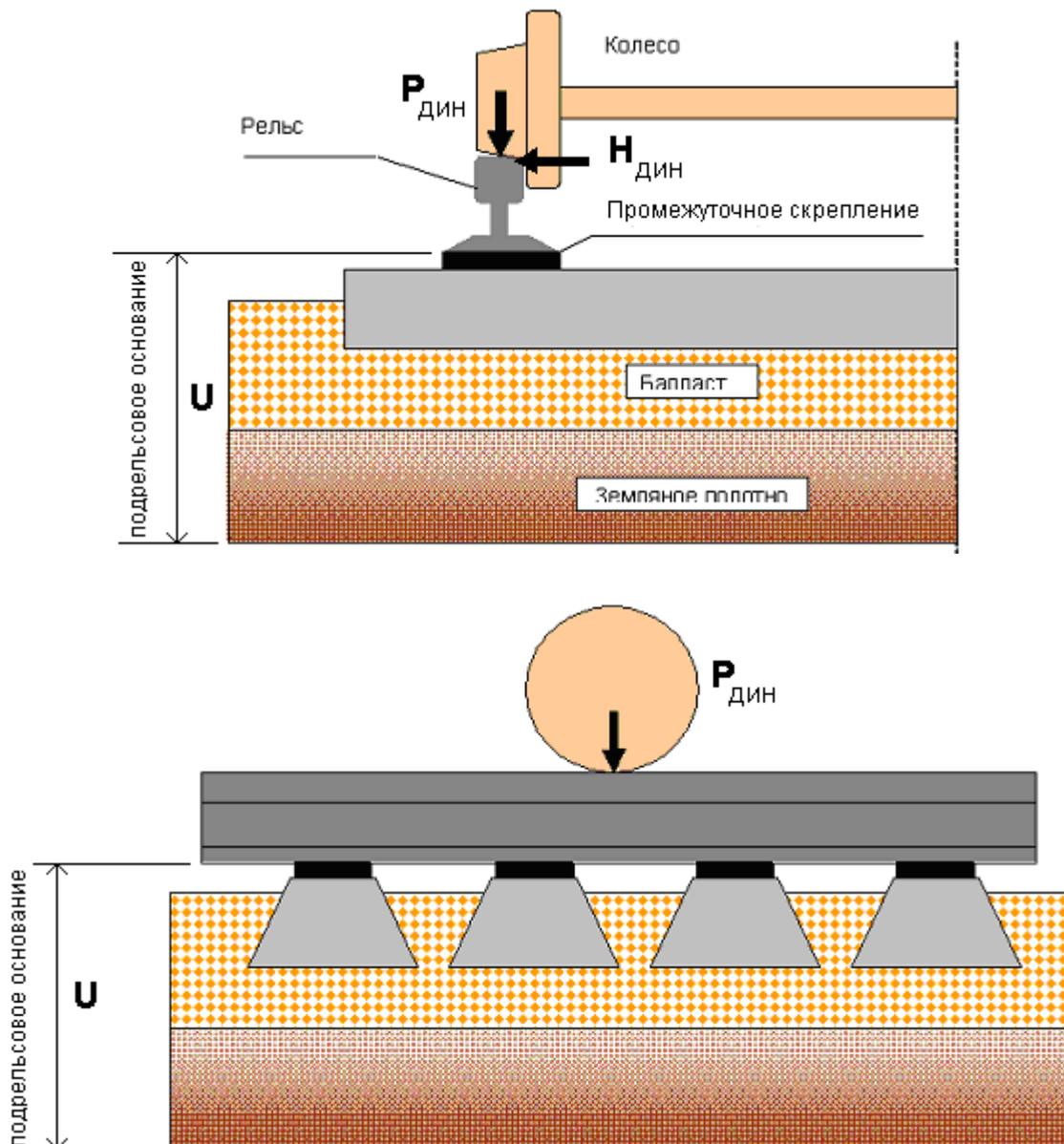


Рисунок 12 Схема формирования модуля упругости подрельсового основания железнодорожного пути

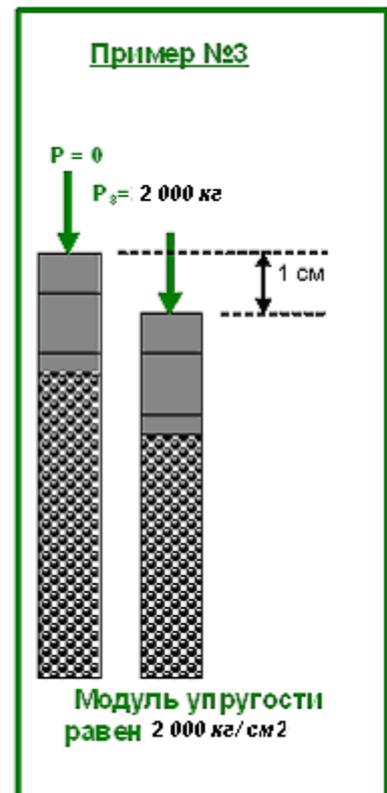
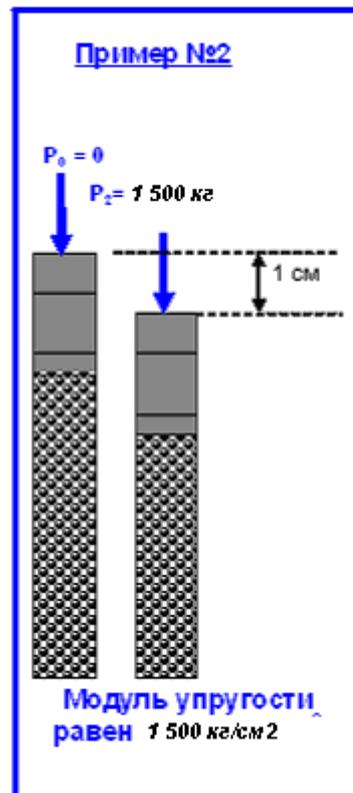
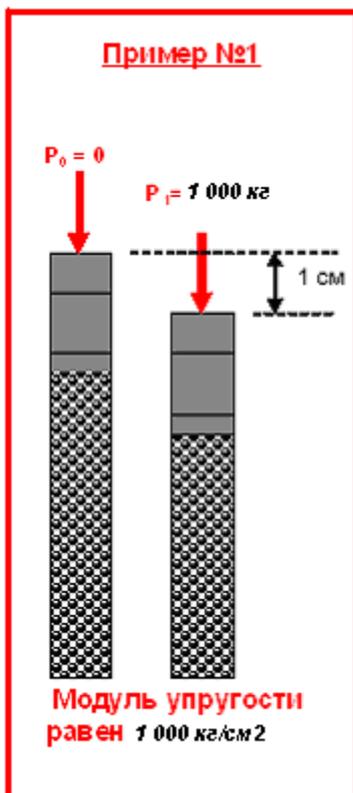
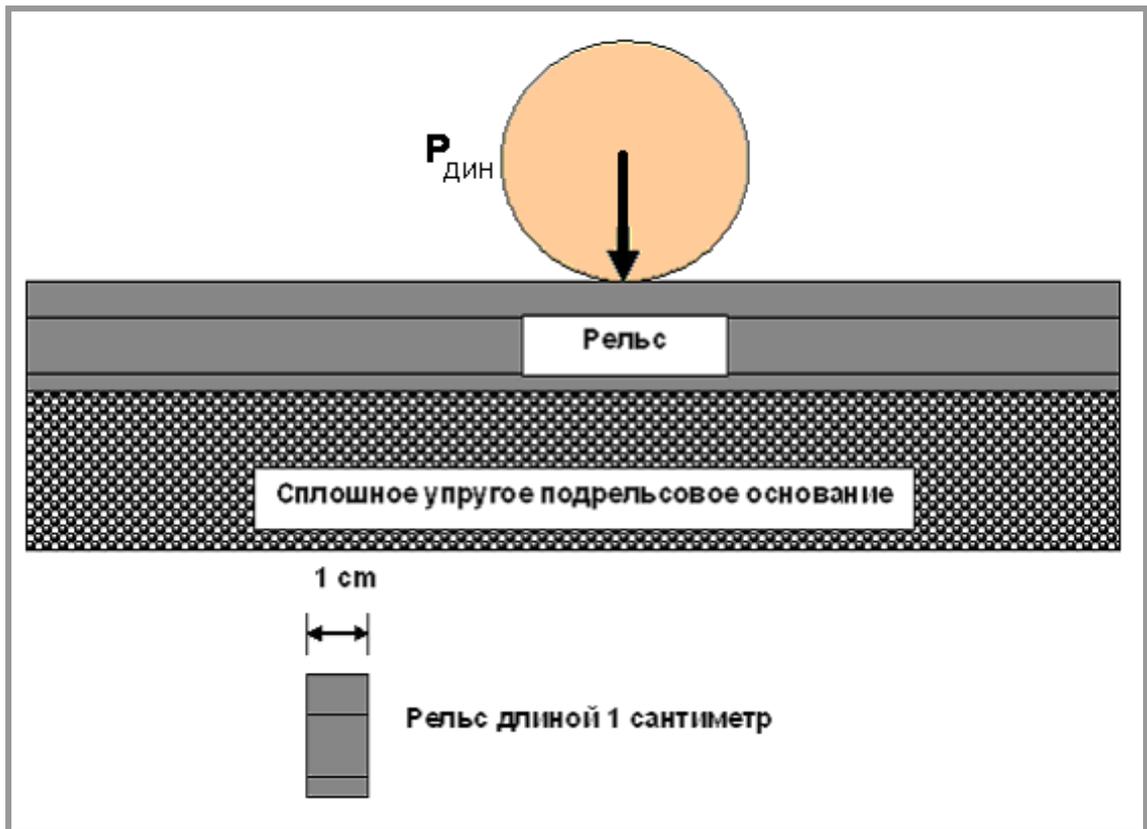


Рисунок 13. Схема определения модуля упругости подрельсового основания

Если взять изолированный короткий отрезок рельса и через него (нагружая опору вертикальной силой) определять жесткость подрельсового основания, отнесенную к одной опоре  $C_0$ , которая формируется за счет всех вышеуказанных упругих элементов, то используемый в расчетах пути на прочность модуль упругости рельсового основания  $u$  может быть получен по формуле

$$u = C_0/l,$$

где  $l$  расстояние между осями шпал.

Под воздействием подвижного состава при давлении колеса силой  $P$  происходит упругая деформация рельса на величину  $y$ . Зависимость позволяет при известных значениях параметра  $EI$  для рельса, лежащего в пути, определить величину  $u$  по формуле:

$$u = \frac{1}{\sqrt[3]{64EI}} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{y}\right)^4}$$

Величина  $C_0$  имеет размерность (кН/см);

Модуль упругости  $U$  измеряется в кН/см<sup>2</sup> или в МПа.

Физически модуль  $U$  представляет собой уровень (величину) равномерно распределенного давления на подрельсовое основание по одной рельсовой нити, при котором будет иметь место упругая осадка, равная 1 см.

Существенно зависят значения модуля упругости подрельсового основания и жесткости пути от рода шпал (деревянные или железобетонные) и от жесткости применяемых в скреплениях прокладок.

Жесткость пути зимой при промерзшем балласте и земляном полотне в 2-3 раза больше, чем летом.

Расчеты показывают, что вертикальная жесткость рельсов находится в пределах 1300-2000 МН/м, шпал сосновых новых 160-270 МН/м, старогодных 100-200 МН/м, железобетонных 570-1000 МН/м. Удельный вес (в %) основных элементов пути (шпалы – балласт – земляное полотно) в формировании модуля упругости летом оценивается следующими значениями:

При модуле упругости пути	23 МПа	-	9; 11; 80
	28 МПа	-	11; 17; 72
	47 МПа	-	23; 25; 52

Эти значения можно рассматривать лишь как характеризующие порядок влияния различных элементов верхнего строения пути на формирование жесткости пути. Следует заметить, что влияние жесткости прокладок на формирование жесткости пути, особенно с железобетонными шпалами, может быть более значительным, а прогиб пути из-за упругих деформаций земляного

полотна на участках, проходящих по болотам или слабым основаниям, существенно большим.

В опытах, проведенных на дорогах Германии, установлено, что удельный вес в общей вертикальной деформации пути на деревянных шпалах отдельных элементов (шпалы и прокладки – балласт – земляное полотно) может быть представлен соотношением (в %) 20; 55; 25, а железобетонных – 5; 70; 25.

#### 4.5 ЖЁСТКОСТЬ УЗЛА СКРЕПЛЕНИЯ

Жёсткость узла скрепления – часть вертикальной жёсткости пути, непосредственно связанная с модулем упругости подрельсового основания и зависящая от материала и конструкции амортизирующих прокладок. Исследования ВНИИЖТа, МИИТа, ДИИТа указывают, что этот параметр влияет на ускорение шпал и балласта, на интенсивность накопления остаточных осадок (табл. 5).

Если имеются неровности на поверхности катания рельса, то снижением жёсткости узла скрепления в 2,5 раза можно уменьшить расстройство пути по уровню в 2,7-3,5 раза.

Таблица 5 Влияние жёсткости узла скрепления на ускорения пути

Жёсткость узла скрепления, кН/м (тс/мм)	Ускорения шпал, g	Ускорение в балласте, g	Коэффициент влияния вибраций	
			В зоне стыка	В зоне плавной неровности
294 (30)	7,4	4,0	4,2	3,9
196 (20)	4,5	2,8	2,4	2,2
117,6 (12)	2,7	2,0	1,2	1,4

При жёстком рельсовом основании нагрузка, передаваемая рельсу от колеса, распределяется на меньшее количество шпал, чем при менее жёстком. От одной и той же нагрузки давление на шпалу будет падать при снижении жёсткости. Возникающая во время движения поезда вибрация уменьшает коэффициент внутреннего трения щебня, а следовательно, ускоряет накопление остаточных осадок. С понижением внутреннего трения увеличивается подвижность частиц щебня, создаются более благоприятные условия для выжимания его из-под шпалы. Вибрации снижают сопротивление продольным и поперечным перемещениям шпал в балласте до 50%.

Более интенсивное накопление осадок при железобетонных шпалах по сравнению с деревянными объясняется тем, что при них повышаются вертикальная жесткость, давление на шпалу (до 23%), ускорение в балласте (до 2,5 раз.). Применение амортизирующих прокладок в скреплении снижает

вибрационные ускорения в балласте, но увеличивает прогиб рельса под нагрузкой.

В ряде стран определены фактические значения вертикальной жёсткости узла крепления, и этот параметр нормирован (табл.6).

Анализ результатов исследований опыта эксплуатации скоростных магистралей убеждает в необходимости нормирования жёсткости только в совокупности с другими характеристиками – модулем упругости рельсового основания, скоростью движения поездов, осевой нагрузкой, глубиной неровности на поверхности катания рельса. Для внеклассных линий жёсткость узла крепления при железобетонном подрельсовом основании целесообразно установить в пределах 60-80 кН/мм, для линий 1-3 классов – 50-60 кН/мм, 4-5 классов – 40-60 кН/мм.

В 1999г. во ВНИИЖТе была подготовлена методика определения технических параметров малообслуживаемых конструкций звеньев и бесстыкового пути и оптимизации их значений. Предложены допускаемые значения параметров, исходя из наиболее благоприятного соотношения сил инерции, вязкости и жёсткости многопараметрической системы, что позволяет уменьшить расстройство и повреждение пути.

Таблица 6 Вертикальная жёсткость узла крепления

Страны	Вертикальная жёсткость узла крепления, КН/мм	
Россия	Установленная Фактическая	50 - 60 60 - 120 – КБ 40 – БПУ-ВСМ 50 – ЖБР 120 – ЖБ 60 – БПУ 50 – ВНИИЖТ-1 50 – АРС-3
Великобритания Германия	Фактическая Фактическая	60 – 250 – «Пэндрол» 50 – 250 – «Фоссло» 250 – НМ (W) Sk1-7; Sk1 –14 50 – Schotterlosse
США	Фактическая	28–F–10 15,8 – 17,5 – F–17
Франция	Фактическая	50 – «Набла»
Япония	Установленная	90
	Фактическая	60 – «модель 102»
Польша	Рекомендуемая	20 – 150 – для ж/б шпал
	Фактическая	300 – СБ-3

На основе расчётов для РФ рекомендованы параметры конструкций малообслуживаемого пути (табл.7), которые в дальнейшем должны быть откорректированы с учётом оптимизации по критерию минимальных суммарных эксплуатационных затрат.

Постепенный переход на малообслуживаемые конструкции может сократить эксплуатационные расходы на 1км пути в год до 10%, а затраты на текущее содержание в 1,5-1,8 раза без снижения уровня безопасности движения поездов.

Для Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД), членом которой является и Узбекистан, разработаны рекомендации на основе проведённых исследований и длительной эксплуатации бесстыкового пути на железобетонных шпалах магистральных линий Российских дорог, а также в результате анализа мирового опыта высокоскоростного движения, прежде всего во Франции и Японии, в том числе на безбалластном пути.

Наиболее важным параметром пути для высокоскоростного движения является характеристика упругости рельсовых опор, особенно с учётом зимних условий эксплуатации (или безбалластного пути), которая оказывает влияние на уровень динамических сил, вибрации и интенсивность расстройств пути и его основания, а также на состояние ходовых частей подвижного состава. Поэтому в рекомендациях по техническим требованиям к рельсовым скреплениям предусмотрено существенное снижение вертикальной жёсткости узла рельсового скрепления для высокоскоростного движения по сравнению с параметрами скреплений для обычных скоростей движения. Соответственно повышены требования к характеристике упругости клемм рельсового скрепления. В приведённой ниже табл.8, представлены технические требования к рельсовым скреплениям для высокоскоростного движения в сравнении с требованиями, которые приняты для скреплений существующих магистралей.

Таблица 7 Параметры конструкций малообслуживаемого пути

Технические параметры	Классы путей					
	внеклассные	1	2	3	4	5
Скорость движения поездов, Км/ч: пассажирских	до 200	до 140	до 120	до 120	до 60	до 60
Грузовых	до 90	до 90	до 80	до 80	до 50	до 50
Осевая статическая нагрузка, кН/ось: вагонная (грузовая)	до 235	до 235	до 235	до 235	до 235	до 235
Локомотивная	до 250	до 250	до 250	до 250	до 250	до 250
Ресурс (долговечность) всп, млн. т груза брутто	1200	1400	1400	1200	700	700
Модель упругости рельсового основания И, Мпа	140-160	120-140	120-140	до 100	до 100	до 100
Глубина неровности на поверхности катания головки рельса на базе измерения 1м, мм	0,3мм на базе измерения 1,5м	до 0,5	до 0,5	до 0,7	до 1,0	до 1,5
Момент инерции рельса относительно горизонтальной оси, см <sup>4</sup>	3540	3540	3540	3540	2011-3540	2011-3540
Вертикальная жёсткость узла скрепления, кН/мм	60-80	50-60	50-60	50-60	до 60	до 60
Сопrotивление продольному к оси пути перемещению шпал в балласте, кН/П.М. пути (не менее)	30	29	29	29	25	25
Сопrotивление продольному перемещению рельсовой плети относительно рельсовых опор, кН/пн (не менее)	28	25	25	25	23	23
Погонное поперечное сопротивление РШР без вертикальной нагрузки, кН/пм.пути (не менее)	16	15	15	15	14	14

Таблица 8 Технические требования к промежуточным рельсовым скреплениям бесстыкового пути на железобетонных шпалах

Технические характеристики	Един. измерения	Существующий путь при смешанном движении	Высокоскоростной путь
Статическая осевая нагрузка вагонов	т	23-25	18
Скорость движения поездов:			
Грузовых,	км/ч	120	-
Пассажирских	км/ч	160	300-350
Расчётные нагрузки на узел скрепления (средние):			
Вертикальные,	т	7	4
Поперечные, горизонтальные	т	5	3
Монтажная нагрузка от рельса на опору	т	2	2
Коэффициент трения между рельсом и шпалой	-	0,6	0,6
Вертикальная жёсткость узла скрепления	т/см	60	20-30
Жёсткость клеммы на контакте с подошвой рельса	т/см	1-3	0,4-1
Поперечная жёсткость узла скрепления	т/см	20-30	20-30
Жёсткость узла скрепления на кручение в поперечной плоскости	тм/рад.	10-15	10-15
Регулировка положения рельса по высоте	мм	10-20	10

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник инженера - путейца ,т1, 1972 г.
2. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь, 1985 г.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Расчетная схема.
2. Связь прогиба и упругого отпора.
3. Модуль упругости под рельсового основания для пути с деревянными шпалами.
4. То же с железобетонными шпалами.
5. Модуль упругости в зимних и летних условиях.
6. Пути снижения модуля упругости.
7. Общий модуль всего под рельсового основания.
8. Жесткость узла скрепления.
9. Влияние жёсткости узла скрепления на ускорения элементов верхнего строения пути.
10. Параметры конструкций малообслуживаемого пути.
11. Технические требования к промежуточным рельсовым скреплениям бесстыкового пути на железобетонных шпалах.

## ЛЕКЦИЯ 5. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗОК НА ПУТЬ.

### 5.1. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

На рисунке показана одиночная сила  $P_1$ , вызывающая упругий прогиб у рельса как балки на сплошном упругом основании. Начало координат расположено под силой. Знаки силы и координат указаны на рис. 14. Данная схема принята за расчетную.

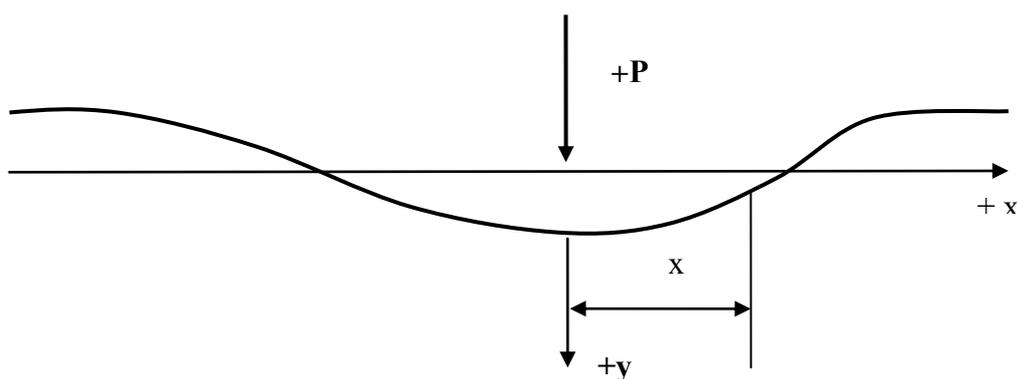


Рис. 14

Согласно теории Шведлера-Журавского в интервале между сосредоточенными силами распределенная нагрузка

$$q + p = EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = EJ + y^{IV}.$$

Здесь  $EI$  - физико-геометрический фактор жесткости;  $E = 2,1 \cdot 10^5$  Мпа - модуль упругости рельсовой стали;  $I$  - момент инерции рельса относительно его центральной горизонтальной оси, которая проходит через центр тяжести поперечного сечения рельса;

$p$  - вес погонной длины балки;  $q$  - реактивный упругий отпор, определяемый формулой.

### 5.2 ЛИНЕЙНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА.

Уравнение с учетом изложенного в предыдущей лекции примет следующий вид:

$$E I y^{IV} + U y = p$$

Линейные дифференциальные уравнения решаются способом суперпозиции (т.е. суммирования), при котором полный интеграл уравнения равен сумме интегралов, соответствующих отдельно каждому слагаемому правой части, в том числе и нулю. В последнем случае решение называется общим, а все остальные решения - частными. Общий интеграл соответствует решению однородного уравнения

$$EI y^{IV} + Uy = 0$$

Частное решение уравнения найдем исходя из того, что  $p = const$  и, следовательно, прогиб под постоянной погонной нагрузкой  $y = const$ .

Так как производная постоянной величины равна нулю, то для частного решения уравнение выражается в виде

$$Uy = p$$

Отсюда частное решение  $y_p$  (т.е. просадка от неизменной погонной нагрузки  $p$ ) будет

$$y_p = p / U$$

Это выражение можно получить, минуя дифференциальное уравнение, имея в виду, что погонная реакция основания  $q$  от погонно распределенной неизменной нагрузки  $p$  равна этой нагрузке и имеет противоположный знак:

$$q = -Up_p = -p$$

Отсюда вытекает выражение приведенное ранее.

Для удобства решения однородного уравнения запишем в виде

$$y^{IV} + 4k^4 y = 0$$

### 5.3 КОЭФФИЦИЕНТ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ.

В приведенной выше формуле

$$k = \sqrt[4]{U / 4EI}$$

Введенный для удобства записи параметр  $k$  является одной из важнейших характеристик расчета пути на прочность.

Ему дано название коэффициента относительной жесткости рельсового основания и рельса.

Название коэффициента соответствует структуре формулы для  $k$ , так как подкоренное выражение представляет собой отношение характеристики упругости подрельсового основания  $U$  к физико-геометрическому фактору жесткости рельса.

Коэффициент относительной жесткости основания и рельса находится обычно в границах от 0,009 до 0,018 см<sup>-1</sup>.

#### 5.4 ПОЛНЫЙ ИНТЕГРАЛ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ.

Общий интеграл уравнения:

$$y = C_1 e^{kx} \cos kx + C_2 e^{kx} \sin kx + C_3 e^{-kx} \cos kx + C_4 e^{-kx} \sin kx$$

Так как при  $x \rightarrow \infty$  должно  $y \rightarrow 0$ , то  $C_1 = C_2 = 0$ . При  $x = 0$  должно быть  $y' = 0$ .

Кроме того, поперечная сила при  $x = 0$  равна половине реакции основания всей балки, т.е.

$$EI y''' = -P/2$$

Из этих двух условий находятся оставшиеся постоянные интегрирования  $C_3$  и  $C_4$ .

Общий интеграл  $y_{об}$  решения дифференциального уравнения после проведения необходимых преобразований, будет

$$y_{об} = P \frac{k}{2U} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx)$$

Полный интеграл

$$y = y_{об} + y_p = P \frac{k}{2U} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx) + \frac{P}{U}$$

#### 5.5. ИЗГИБАЮЩИЙ МОМЕНТ И ПОПЕРЕЧНАЯ СИЛА.

Изгибающий момент

$$M = EI y''.$$

Если рельс имеет сплошное опирание по всей длине (это может быть при плитном или рамном основании), то давление на под рельсовое основание будет равно -  $q$  (так как реакция основания равна  $q$ ).

В случае если опирание происходит на отдельные опоры (могут быть под рельсовые площадки и в случае плит и рам), давление на опоры будет

$$Q \approx ql,$$

Здесь  $l$  – расстояние между опорами

На основании вышеуказанного получаем следующие формулы для определения расчетных параметров:

$$y = P \frac{k}{2U} \eta + \frac{P}{U}, \quad M = \frac{P}{4k} * \mu,$$

$$-q = U * y = \frac{P * k}{2} * \eta + p, \quad Q = -q * l = \frac{P * k * l}{2} * \eta + p * l,$$

$$\eta = e^{-kx} (\cos kx + \sin kx),$$

$$\mu = e^{-kx} (\cos kx - \sin kx),$$

Эпюры  $M$ ,  $Q$ ,  $y$  от силы  $P=1$  являются одновременно линиями влияния (рис. 15)

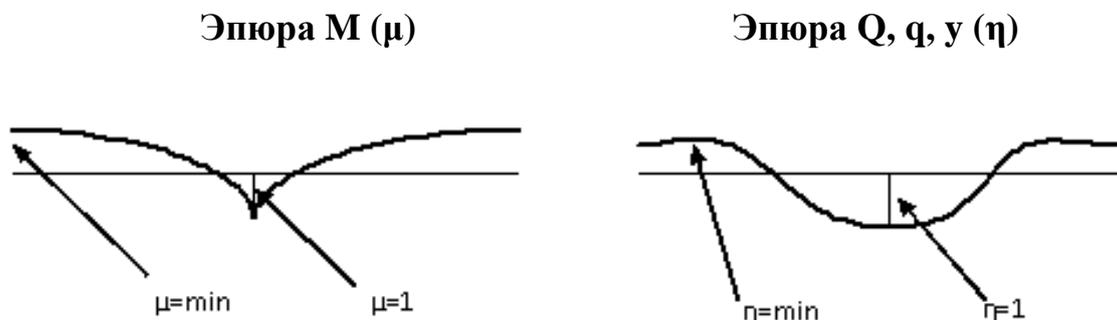


Рис. 15

Поэтому от **системы грузов** получим следующие зависимости схему расчета и зависимости:

$$y = \frac{k}{2U} \sum P * \eta - \frac{p}{U}; \quad M = \frac{1}{4k} \sum P * \mu;$$

$$-q = \frac{k}{2} \sum P\eta + p;$$

$$Q = \frac{kl}{2} \sum P\eta + pl$$

Силы  $\sum P\mu$  и  $\sum P\eta$  называют эквивалентными грузами. Влияние колес, отстоящих более чем на 3,5 – 4,0 от рассматриваемого сечения, столь незначительно, что им обычно пренебрегают.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник инженера-путейца. 1976 г.
2. Шахунянец Г.М. Железнодорожный путь, 1985 г.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Схема расчета.
2. Уравнение статического расчета.
3. Коэффициент относительной жесткости К.
4. Решение уравнения.
5. Уравнение прогиба, изгибающего момента и поперечной силы.
6. Эпюры М, Q, у.

## **ЛЕКЦИЯ 6. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ**

### 6.1 ЦЕЛЬ РАСЧЕТОВ

В соответствии с требованиями ПТЭ все элементы железнодорожного пути (земляное полотно, верхнее строение и искусственные сооружения) по прочности, устойчивости и состоянию должны обеспечивать безопасное и плавное движение поездов со скоростями, установленными на данном участке. Причём это требование должно выполняться вне зависимости от изменяющихся во времени состояния железнодорожного пути и условий его эксплуатации. Для оценки прочности и устойчивости железнодорожного пути выполняются соответствующие расчёты, базирующиеся на законах теоретической и строительной механики. Их целью является:

- оценка напряженно–деформированного состояния элементов верхнего строения пути и основной площадки земляного полотна, а также определение степени его устойчивости под воздействием эксплуатационных нагрузок и природных факторов;
- определение таких нагрузок и скоростей движения поездов, при которых напряжения и деформации, возникающие в пути, не будут превосходить допускаемых значений, и устойчивость пути будет надежно обеспечена;
- оценка работоспособности конструкции пути в любой период его эксплуатации;
- проведение технико-экономических расчетов по выбору оптимальных параметров основных элементов верхнего строения пути для заданных условий эксплуатации;
- проектирование новых конструкций пути и др.

Ниже на основе обобщения материалов, приведённых в /1 – 9/, дана методика расчета пути на прочность и устойчивость.

Основной целью расчета являются установление напряжений в элементах верхнего строения пути и на основной площадке земляного полотна, определение величины прогиба рельса под действующей поездной нагрузкой для установления допускаемых скоростей движения поездов, проектирования новых конструкций железнодорожного пути и отдельных его элементов, обеспечения безопасности движения поездов, устранения имеющихся ограничений и др.

## 6.2 ПРЕДПОСЫЛКИ И ДОПУЩЕНИЯ

Под воздействием подвижного состава во всех элементах железнодорожного пути (земляное полотно, верхнее строение и искусственные сооружения) возникают напряжения и деформации. В связи с тем, что точное определение указанных параметров достаточно трудоёмко, в правилах расчета железнодорожного пути на прочность приняты следующие предпосылки и допущения /1-5/:

- рельс считается балкой бесконечно большой длины неизменного сечения, лежащей на сплошном однородном равноупругом основании (рассматривается сечение, удаленное от стыка на 3,5 м и далее);
- путь и подвижной состав находятся в исправном состоянии, отвечающем требованиям ПТЭ;
- колеса подвижного состава при движении не отрываются от поверхности катания рельсов (рассматривается безударное движение);
- расчет ведется на вертикальные силы, приложенные по оси симметрии рельса.
- учет действия горизонтальных поперечных сил, влияние внецентренного приложения вертикальных сил и подуклонки рельса осуществляется умножением расчетных напряжений в подошве рельса на коэффициент  $f$ . Из продольных горизонтальных сил учитываются только температурные силы, появляющиеся в рельсах;
- упругая реакция основания  $q$  считается линейно зависящей от осадки  $u$ , т.е.  $q = -Uu$ , где  $U$  – коэффициент пропорциональности или модуль упругости подрельсового основания;
- характеристики пути (модуль упругости подрельсового основания, коэффициент относительной жесткости и др.) считаются детерминированными (неслучайными, постоянными) величинами;
- влияние климатических факторов учитывается лишь при температурных воздействиях на рельсы и изменениях жесткости пути при промерзании шпал, балласта и земляного полотна;
- вертикальные силы от расчетного колеса принимаются как максимально вероятностные  $P_{расч}$ , определяемые уровнем вероятности их неперевышения  $\Phi = 0,994$ . Ввиду относительно небольшого влияния соседних колес принимается допущение, что давления от них имеют средние значения  $P_{ср}$ ;
- собственные напряжения и неупругие сопротивления не учитываются;
- колеблющиеся массы колеса и пути в расчетах учитываются соответствующими коэффициентами;
- за расчетное сечение пути принимается сечение в зоне влияния изолированной неровности на пути, которое экипаж проходит со сжатыми рессорами;

- подавляющая часть неровностей на колесах принимается в виде непрерывных, доля их составляет 95 %. Остальные 5 % колес имеют изолированные неровности. Дисбаланс колес не учитывается;
- рельс рассчитывается только на нормальные напряжения изгиба (не учитываются местные, в том числе контактные напряжения);
- расчет ведется по одному рельсу.

Несмотря на достаточно большое количество предпосылок и допущений, расчет дает удовлетворительные результаты, совпадающие с данными экспериментов. Влияние допущений и предпосылок компенсируется в расчетах коэффициентом запаса  $K_3 = 1,3$ .

### 6.3 НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ

Напряжения в элементах верхнего строения пути и деформация рельса определяются величиной давления колеса на рельс и характером прогиба рельса под поездной нагрузкой.

#### Расчетные усилия, передаваемые на рельс

Расчетная величина силы взаимодействия колеса и рельса в сечении под колесом определяется с вероятностью неперевышения ее  $\Phi = 0,99379$  и составляет:

$$P_{РАСЧ} = P_{СР} + 2,5 S \quad (6.1)$$

С учетом вероятностного сочетания составляющих общего давления колеса на рельс, реализуемых при движении современных единиц подвижного состава, имеем:

для силы среднего давления колеса на рельс

$$P_{СР} = P_{СТ} + P_p^{CP} \quad (6.2)$$

и для среднеквадратического отклонения совокупности действующих на рельс сил

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{HP}^2 + q_1 S_{HНК}^2 + (1 - q_1) S_{HНК}^2} \quad (6.3.)$$

Из формул (6.1 - 6.3) видно, что величина расчетного давления колеса на рельс определяется с учетом: статического давления от подвижного состава, отнесенного к одному колесу, ( $P_{СТ}$ ); дополнительного динамического давления,

вызванного колебаниями кузова на рессорах, ( $P_p^{CP}$ ); дополнительных динамических давлений, вызванных наличием изолированной неровности на пути, ( $S_{HII}$ ), неровностей на колесе - изолированной ( $S_{ИHK}$ ) и непрерывной ( $S_{HHK}$ ) с учетом доли колес, обращающихся на участке, с изолированными неровностями, ( $q_I$ ).

Отдельные составляющие расчетного давления колеса на рельс учитываются следующим образом:

статическое давление колеса на рельс ( $P_{CT}$ ) принимается в расчете по паспортным данным подвижного состава;

сила дополнительного давления от колебания кузова на рессорах учитывается средним давлением и среднеквадратическим отклонением:

$$P_p^{CP} = 0,75 P_p^{max}, \quad S_p = 0,08 P_p \quad (6.4)$$

сила дополнительного давления, вызванного наличием изолированной неровности на пути, учитывается среднеквадратическим отклонением:

$$S_{HII} = 0,565 \cdot 10^{-8} \alpha_1 \varepsilon \gamma l \beta \sqrt{\frac{Uq_K}{K}} v P_{CP} \quad (6.5)$$

сила дополнительного давления, вызванного наличием изолированной неровности на колесе, учитывается среднеквадратическим отклонением;

$$S_{ИHK} = 0,5 \alpha_0 \xi e_0 \frac{U}{K} \quad (6.6)$$

сила дополнительного давления, вызванного наличием непрерывной, неровности на колесе, учитывается среднеквадратическим отклонением:

$$S_{HHK} = \frac{0,052 \alpha_0 U v^2 \sqrt{q_K}}{d^2 \sqrt{KU - 3,26 K^2 q_K}} \quad (6.7)$$

В формулах (1.4 - 1.7) приведены /1,5,8/:

$\alpha_0$  - коэффициент, учитывающий влияние приведенной массы пути на дополнительные давления, вызванные наличием неровностей на колесе;

$\alpha_1$  - коэффициент, учитывающий влияние приведенной массы пути на дополнительное давление, вызванное наличием изолированной неровности на пути (табл. 1);

$\varepsilon$  - коэффициент, учитывающий влияние жесткости подрельсового основания на крутизну дополнительной динамической неровности на пути;

$\gamma$  - коэффициент, учитывающий род балластного слоя;

$l$  - среднее расстояние между осями шпал;

$U$  - модуль упругости подрельсового основания;

$v$  - скорость движения экипажа;

$q_K$  - вес необрессоренных частей экипажа, отнесенный к одному колесу;

$d$  - диаметр среднего круга катания колеса;

$e_0$  - величина наибольшей расчетной глубины изолированной неровности;

$\beta$  - коэффициент, учитывающий влияние мощности рельса на образование неровности на пути:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{2018}{J_\varepsilon}};$$

$J_\varepsilon$  - момент инерции рельса с учетом величины износа;

Численные параметры указанных величин приведены в

$K$  - коэффициент относительной жесткости рельса и основания:

$$K = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ_\varepsilon}};$$

$E$  - модуль упругости рельсовой стали,  $E=2,1 \times 10^6$  кг/см<sup>2</sup>;

$\xi$  - максимальный дополнительный прогиб рельса при проходке колесом косинусоидальной неровности, отнесенный к единице глубины неровности; принимается  $\xi = 1,47$ , если соблюдается неравенство:  $v \geq v_{KP}$ , где

$$v_{KP} = 0,182 \sqrt{\frac{Ug}{Kq_K}},$$

$g$  - ускорение свободного падения,  $g = 981 \text{ см/с}^2$ .

Динамическая максимальная нагрузка колеса на рельс, возникающая в результате колебания кузова на рессорах определяется как кг,

$$P_p^{max} = \mathcal{J} z_{max}, \quad (6.8)$$

где  $\mathcal{J}$  – жесткость рессорного подвешивания, приведенная к колесу, кг/мм,;

$z_{max}$  – динамический прогиб рессорного подвешивания, мм,

При расчетах бесстыкового пути, а также для единиц подвижного состава, не прошедших экспериментальную проверку,  $P_p^{max}$  определяется по следующей формуле:

$$P_p^{max} = \left( 0,1 + 0,2 \frac{v}{f_{CT}} \right) (P_{CT} - q_k) \quad (6.9)$$

где  $f_{CT}$  - статический прогиб рессорного комплекта

В результате по формуле 6.1 определяется расчетная величина силы взаимодействия колеса и рельса  $P_{РАСЧ}$  в сечении под колесом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003.
2. Першин С. Л. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути. Труды МИИТа, вып. 147. М., Транспорт, 1962.
3. Справочник инженера путейца. Под ред. В. В. Басилова и М. А. Чернышева. Т. 1. М., Транспорт, 1972.
4. Чернышев М.А. Практические методы расчета пути. - М.: Транспорт, 1967.
5. Севостьянова Л.Л. Расчет верхнего строения пути на прочность и устойчивость: Методическое пособие. Хабаровск:, ДВГУПС, 2003.
6. Железнодорожный путь. Под ред. Т.Г. Яковлевой. - М.: Транспорт, 2001.
7. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути. Под ред. С.В. Амелина и Т.Г.Яковлевой. - М.: Транспорт, 1990.
8. Виноградов В.А. и др. Расчёты железнодорожного пути на прочность и устойчивость: Методическое пособие для курсового и дипломного проектирования. Ташкент:, ТашИИТ, 1981.
9. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Ташкент, ГАЖК «Узбекистон темир йуллари», 2000.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель расчетов
2. Предпосылки и допущения
3. Расчетные усилия, передаваемые на рельс
4. Силы среднего давления колеса на рельс
5. Среднеквадратического отклонения совокупности действующих на рельс сил
6. Нагрузка колеса на рельс, возникающая в результате колебания кузова на рессорах

## ЛЕКЦИЯ 7. РАСЧЕТНЫЕ И ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ

### 7.1. РАСЧЁТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Величина напряжений в элементах верхнего строения пути и прогиб рельса определяются с учетом воздействия на расчетное сечение системы сосредоточенных нагрузок, в зону воздействия которых входит рассматриваемое расчетное сечение. Для верхнего строения пути современных типов влияние от отдельных сосредоточенных нагрузок (давлений осей подвижного состава) практически ощущается при расстоянии от оси до расчетного сечения не более 350 см. При этом следует выбирать наиболее неблагоприятные сочетания системы сосредоточенных нагрузок от осей подвижного состава, а именно: в расчетном сечении устанавливается ось подвижного состава, оказывающая максимально-вероятностное давление на рельс ( $P_{РАСЧ}$ ); воздействие от соседних осей учитывается коэффициентами линий влияния при величине давления этих осей на рельс, равной  $P_{СР}$ .

Коэффициенты линий влияния принимаются с учетом относительной жесткости рельса и основания ( $K$ ) и расстояния от расчетного сечения до учитываемой нагрузки от соседней оси ( $X=L_i$ ) в соответствии с расчетными формулами: для изгибающих моментов

$$\mu = e^{-KX}(\cos KX - \sin KX),$$

для прогибов, перерезывающих сил и давления рельса на шпалу

$$\eta = e^{-KX}(\cos KX + \sin KX).$$

Коэффициенты  $\mu$  и  $\eta$  можно принимать по /1,3/.

При этом наиболее неблагоприятное сочетание нагрузок следует принимать следующим образом:

- для экипажей с двухосной жесткой базой – одна из осей принимается за расчетную и учитывается влияние второй оси;

- для экипажей с трехосной жесткой базой предварительно определяется знак коэффициента линии влияния ближайших осей тележки: при положительном значении коэффициента линии влияния за расчетную ось принимается средняя ось тележки и учитывается влияние крайних осей, при отрицательном значении коэффициента линии влияния за расчетную ось принимается крайняя ось тележки и учитывается влияние средней оси.

Для получения наибольших напряжений в рельсах необходимо иметь от системы заданных сил максимальное значение изгибающего момента  $M_{\max}$ , а для напряжений на шпале, в балласте и на основной площадке земляного полотна – максимальное значение нагрузки на шпалу  $Q_{\max}$ . Они возникают под одним из колес расчетной оси.

При определении наибольших напряжений от изгиба и кручения в рельсах от воздействия эквивалентной нагрузки  $P_{\text{экв}}^I$  за расчетная ось может приниматься принимается также следующим образом:

- при двухосной тележке – первая ось;
- при трехосной тележке – первая ось, если выполняется условие

$$x = \frac{\pi}{4K} \leq L_{\min},$$

где  $L_{\min}$  – минимальное расстояние между центрами осей колесных пар (рис. 16, а).

В противном случае за расчетную ось принимается вторая.

При расчетах наибольших напряжений и сил в элементах подрельсового основания от воздействия эквивалентной нагрузки  $P_{\text{экв}}^{II}$  за расчетную ось принимается:

- при двухосной тележке – первая ось (рис. 16, б);
- при трехосной тележке – первая ось, если выполняется условие

$$x = \frac{3\pi}{4K} \leq L_{\min}$$

(рис. 16, б). В противном случае за расчетную ось принимается вторая (рис. 16, в).

Считая схему работы рельса под действием расчетной системы грузов статической, получаем:

- величину изгибающего момента в расчетном сечении рельса

$$M = \frac{1}{4K} (P_{\text{расч}} + \sum P_{\text{ср}} \mu),$$

величину давления рельса на шпалу в расчетном сечении

$$Q = \frac{Kl}{2} (P_{РАСЧ} + \sum P_{СР} \eta),$$

- величину прогиба рельса в расчетном сечении

$$Y = \frac{K}{2U} (P_{РАСЧ} + \sum P_{СР} \eta)$$

По величине изгибающего момента и давления рельса на шпалу определяются напряжения в элементах верхнего строения пути:  
в рельсах:

по оси подошвы

$$\sigma_{П-О} = \frac{M}{W},$$

кромочные по подшве

$$\sigma_{П-К} = f \sigma_{П-О},$$

кромочные в головке

$$\sigma_{Г-К} = m_{Г-К} \sigma_{П-О},$$

- по верхней постели шпалы под подкладкой

$$\sigma_{Ш} = \frac{Q}{\omega},$$

- в балластном слое по нижней части шпалы

$$\sigma_{\delta} = \frac{Q}{\Omega_{\alpha}}.$$

В приведенных выше формулах приняты следующие обозначения:

$W$  – момент сопротивления рельса;

$f$  – коэффициент учета горизонтального изгиба и кручения рельса;

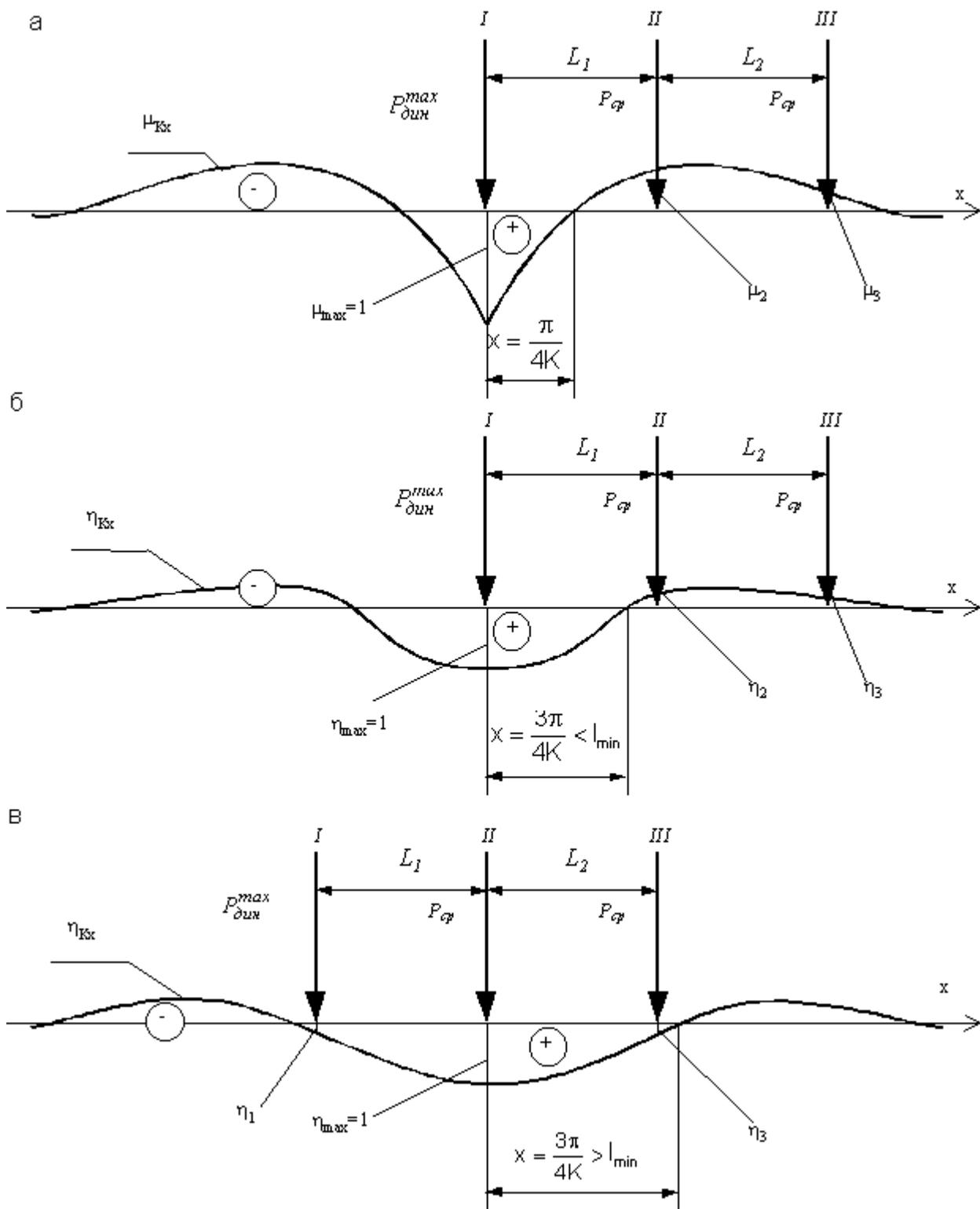


Рис. 16. Схемы для определения наименее выгодного положения нагрузки (выбора расчетной оси)

$m_{Г-К}$  – коэффициент перехода от осевых напряжений в подошве рельса к кромочным напряжениям в подошве рельса:

$$m_{Г-К} \cong \frac{Z_{Г}}{Z_{П}} + (f - 1) \frac{b_{Г}}{b_{П}},$$

$Z_{Г}, Z_{П}$  – расстояние от горизонтальной оси рельса, проходящей через центр тяжести рельса, до крайних волокон соответственно головки и подошвы рельса;

$b_{П}, b_{Г}$  – ширина соответственно подошвы и головки рельса в расчетном уровне;

$\omega$  - площадь подрельсовой подкладки;

$\Omega_{\alpha}$  - опорная площадь полушпалы с учетом изгиба.

## 7.2. ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

В соответствии с [1] критерии прочности пути определены из условия обеспечения его надежности по следующим показателям:

- $[\sigma_{к}]$  – из условия неперевышения допускаемого количества отказов рельсов за период нормативной наработки;
- $[\sigma_{ш}]$  – из условия неперевышения допускаемого износа шпал и прокладок под подкладками за период нормативной наработки;
- $[\sigma_6]$  и  $[\sigma_3]$  – из условия неперевышения допускаемой интенсивности накопления остаточных деформаций соответственно в балласте и на основной площадке земляного полотна.

Численные значения оценочных критериев прочности звеньевого пути приведены ниже в таблице.

Таблица 9 Оценочные критерии прочности

Критерии	Вид подвижного состава	Значения оценочных критериев прочности, кг/см <sup>2</sup> , при грузонапряженности, млн. ткм брутто на км в год*			
		>50	50–25	24–10	<10
[ $\sigma_k$ ]	Локомотивы	1900	2000	2400	3400
	Вагоны	1500	1600	2000	3000
[ $\sigma_{ш}$ ]	Локомотивы	12	16	20	30
	Вагоны	11	15	18	27
[ $\sigma_б$ ]	Локомотивы	4,0	4,2	4,5	5,0
	Вагоны	2,6	3,0	3,5	4,0
[ $\sigma_з$ ]	Локомотивы	1,0	1,0	1,1	1,2
	Вагоны	0,8	0,8	0,9	1,0

Примечание. \*Для новостроек на 10-й год эксплуатации.

Данные таблицы применимы: [ $\sigma_k$ ] – для типовых нетермообработанных рельсов в прямых и кривых радиусом более 1000 м. Для термоупрочненных рельсов значения [ $\sigma_k$ ] увеличиваются на 14 %. В кривых с  $R \leq 1000$  м [ $\sigma_k$ ] = 2400 кг/см<sup>2</sup>, так как нормативными документами предусмотрена сплошная смена рельсов между капитальными ремонтами пути в кривых с  $R = 1000 \div 651$  м – один раз;  $R = 650 \div 351$  м – два раза;  $R \leq 350$  м – три раза;

[ $\sigma_{ш}$ ] – для сосновых стандартных шпал;

[ $\sigma_n$ ] = 40 кг/см<sup>2</sup> – допускаемое напряжение в прокладке (при железобетонных шпалах);

[ $\sigma_б$ ] – для щебеночного и асбестового балласта. Для песчаного балласта приведенные значения [ $\sigma_б$ ] необходимо уменьшить в 1,6 раза, при карьерном гравии и ракушке – в 1,4 раза;

[ $\sigma_з$ ] – для земляного полотна из суглинистых грунтов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003.
2. Першин С. Л. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути. Труды МИИТа, вып. 147. М., Транспорт, 1962.
3. Справочник инженера путейца. Под ред. В. В. Басилова и М. А. Чернышева. Т. 1. М., Транспорт, 1972.
4. Чернышев М.А. Практические методы расчета пути. - М.: Транспорт, 1967.
5. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003.
6. Овчинников А.Н. и др. Расчёты железнодорожного пути на прочность и устойчивость: Методические указания для выполнения курсового проекта и выпускной работы. Ташкент, ТашИИТ, 2007.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип определения величины напряжений в элементах верхнего строения пути и прогиба рельса.
2. Как выбирается наиболее неблагоприятные сочетания системы сосредоточенных нагрузок от осей подвижного состава
3. Коэффициенты линий влияния принимаются для изгибающего момента и поперечной силы
4. Принцип определения наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок
5. Величина изгибающего момента в расчетном сечении рельса
6. Величина давления рельса на шпалу в расчетном сечении
7. Величина прогиба рельса в расчетном сечении
8. Напряжения в рельсах
9. Напряжения по оси подошвы
10. Напряжения кромочные по подошве рельса
11. Напряжения кромочные в головке рельса
12. Напряжения в балластном слое по нижней части шпалы
13. Напряжения по верхней постели шпалы под подкладкой
14. Допускаемые напряжения в элементах верхнего строения пути



При этом напряжения в расчетном сечении определяются по следующей формуле:

$$\delta_h = \delta'_h + \delta'_{hc} + \delta''_{hc},$$

где  $\delta'_h$  - напряжение на основной площадке земляного полотна, вызванное давлением основной расчетной шпалы в расчетном сечении:

$$\delta'_h = r_1 \delta'_o [0,635 m C_1 + 1,275 (2 - m) C_2]$$

$\delta'_o$  - напряжение в балласте по нижней постели расчетной шпалы;

$r_1$  - поправочный коэффициент, учитывающий род шпал:

для железобетонных -  $r_1 = 0,7$ ,

для деревянных -  $r_1 = 0,8$ ;

$m$  - коэффициент, учитывающий характер распределения напряжений в балластном слое по нижней поверхности шпалы в поперечном направлении:

$$m = \frac{8,9}{\delta'_o + 4,35}$$

Принимаемая в расчетах величина  $m$  должна соответствовать условию:

$$1 \leq m \leq 2;$$

$C_1, C_2$  - параметры, учитывающие характер распределения напряжений в балластном слое под шпалой:

$$C_1 = \frac{b}{2h} - \frac{b^3}{24h^3}, \quad C_2 = \frac{bh}{b^2 + 4h^2},$$

$b$  - средняя ширина нижней постели шпалы, принимается для деревянных шпал в зависимости от типа:

I тип -  $b = 25$  см;

II тип -  $b = 23$  см;

III тип -  $b = 21$  см;

для железобетонных -  $b = 27,5$  см,

$h$  - толщина балласта под шпалой

Величины параметров  $C_1$  и  $C_2$  можно принимать для типовых конструкций верхнего строения пути согласно [1 - 5];

$\delta_{hc}^I ; \delta_{hc}^{II}$  - напряжение в расчетной точке основной площадки земляного полотна, передаваемое от соседних шпал:

$$\delta_{hc}^I = \frac{r_1}{\pi} A \delta_{bc}^I, \quad \delta_{hc}^{II} = \frac{r_1}{\pi} A \delta_{bc}^{II}$$

$A$  - параметр, определяющий характер передачи давлений в балластном слое от соседних шпал на расчетную точку:

$$A = \beta_1 - \beta_2 + 0,5(\sin 2\beta_1 - \sin 2\beta_2),$$

Параметр  $A$  можно принимать по /1 - 5/

$\delta_{bc}^I ; \delta_{bc}^{II}$  - соответственно напряжения в балластном слое под первой и второй соседними шпалами от поездной нагрузки:

$$\delta_{bc}^I = \frac{Q_c^I}{\Omega_\alpha}; \quad \delta_{bc}^{II} = \frac{Q_c^{II}}{\Omega_\alpha};$$

$Q_c^I ; Q_c^{II}$  - давления от расчетной нагрузки и соседних осей подвижного состава соответственно на первую и вторую соседние шпалы:

$$Q_c^I = \frac{Kl}{2} (P_{PACЧ} \eta'_{PACЧ} + \sum P_{CP} \eta'_C);$$

$$Q_c^{II} = \frac{Kl}{2} (P_{PACЧ} \eta''_{PACЧ} + \sum P_{CP} \eta''_C)$$

Полученное в процессе расчета напряжение  $\delta_h$  сравнивается с допускаемым напряжением для грунта основной площадки земляного полотна, которое в нормальных условиях эксплуатации соответствует величинам, приведенным в таблице оценочных критериев прочности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003.
2. Першин С. Л. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути. Труды МИИТа, вып. 147. М., Транспорт, 1962.
3. Справочник инженера путейца. Под ред. В. В. Басилова и М. А. Чернышева. Т. 1. М., Транспорт, 1972.
4. Чернышев М.А. Практические методы расчета пути. - М.: Транспорт, 1967.
5. Овчинников А.Н. и др. Расчёты железнодорожного пути на прочность и устойчивость: Методические указания для выполнения курсового проекта и выпускной работы. Ташкент, ТашИИТ, 2007.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип определения напряжений на основной площадке земляного полотна
2. Схема определения напряжений на основной площадке земляного полотна
3. Формула определения суммарных напряжений в расчетном сечении
4. Давления от расчетной нагрузки и соседних осей подвижного состава на первую и вторую соседние шпалы
5. Напряжения на основной площадке земляного полотна, вызванное давлением основной расчетной шпалы в расчетном сечении

## ЛЕКЦИЯ 9. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТОВ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

Практические расчеты бесстыкового пути выполняются с целью определения условий укладки и закрепления плетей бесстыкового пути и установления режимов эксплуатации. Для этого на основе рассмотрения условий прочности и устойчивости плетей бесстыкового пути определяются возможные запасы изменения температуры плети по сравнению с температурой закрепления ее для работы в выбранном режиме эксплуатации /1,7,9/.

### 9.1. ДОПУСКАЕМЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛЕТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ РЕЛЬСА

Для бесстыкового пути из-за наличия погонных и стыковых сопротивлений температурному изменению длины плети характерно развитие значительных продольных сил, вызывающих осевое напряженное состояние рельса даже при отсутствии поездной нагрузки. Поэтому общее условие прочности для рельсов бесстыкового пути, принятое до настоящего времени в практических расчетах, имеет вид:

$$K_{II}\delta_K + \delta_t \leq [\delta] \quad (9.1)$$

где  $K_{II}$  - коэффициент запаса прочности,  $K_{II} = 1,3$ ;

$\delta_K$  - кромочные напряжения в наиболее загруженных волокнах рельса, реализуемые при воздействии поездной нагрузки. Устанавливаются предварительным расчетом элементов верхнего строения пути на прочность;

$\delta_t$  - нормальные напряжения в рельсах, возникающие в связи с изменением температуры плети по сравнению с температурой ее зацепления;

$[\delta]$  - допускаемое напряжение для рельса плети бесстыкового пути, принимаемое равным условному нормальному пределу текучести рельсовой стали,  $[\delta] = 3500 \text{ кг/см}^2$ .

Плеть бесстыкового пути работает при температурах как выше, так и ниже температуры закрепления. То есть нормальные температурные напряжения могут быть и растягивающими (при пониженных температурах), и сжимающими (при повышенных температурах). Учитывая характер распределения нормальных напряжений от изгиба по поперечному сечению рельса, следует общее условие прочности преобразовать:

для температур работы бесстыковой плети ниже температуры закрепления

$$K_{II}\delta_{II-K} + \delta_p \leq [\delta]; \quad (9.2)$$

для температур работы бесстыковой плети выше температуры закрепления

$$K_{II}\delta_{Г-К} + \delta_{tc} \leq [\delta]; \quad (9.3)$$

где  $\delta_{тp}$ ;  $\delta_{tc}$  - соответственно нормальные напряжения растяжения и сжатия по поперечному сечению рельса бесстыковой плети, вызванные изменением температуры рельса по сравнению с температурой закрепления;

$\delta_{II-К}$  - растягивающие напряжения в кромочных волокнах подошвы рельса от изгиба под поездной нагрузкой. Для районов с минимальными температурами не ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  расчетные параметры состояния железнодорожного пути принимаются для подсчета  $\delta_{II-К}$  по летним условиям работы, а для районов с минимальными температурами рельса ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  - по зимним условиям работы;

$\delta_{Г-К}$  - сжимающие напряжения в кромочных волокнах головки рельса от изгиба под поездной нагрузкой.

При полном отсутствии температурного изменения длины рельса температурные напряжения незагруженной поездной нагрузкой плети составляют

$$\delta_t = \alpha E \Delta t \approx 25 \Delta t, \quad (9.4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения рельсовой стали,  $\alpha = 1,18 \times 10^{-5}$  1/град;

$E$  - модуль упругости рельсовой стали,  $E = 2,1 \times 10^6$  кг/см<sup>2</sup>;

$\Delta t$  - интервал изменения температуры рельса по сравнению с температурой закрепления,  $^{\circ}\text{C}$ .

Следовательно, на основе условий прочности можно определить допускаемые интервалы безопасного изменения температуры:

- понижение температуры рельса по условиям прочности кромочных волокон подошвы рельса

$$\Delta t_{III} \leq \frac{[\delta] - K_{II} \delta_{II-К}}{25} \quad (9.5)$$

- повышение температуры рельса по условиям прочности кромочных волокон головки рельса

$$\Delta t_{пр} \leq \frac{[\delta] - K_{п} \delta_{г-к}}{25} \quad (9.6)$$

## **8.2. ДОПУСКАЕМЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛЕТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ПО УСЛОВИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ**

В летних условиях при повышенных по сравнению с закреплением плети температурах продольные сжимающие температурные силы могут привести к нарушению устойчивости первоначального положения плети, т.е. к выбросу пути.

Допускаемое повышение температуры по условиям сохранения устойчивости положения рельсо-шпальной решетки составляет /1,2/:

$$\Delta t_y \leq \frac{[N_k]}{50 F} \quad (9.7)$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения рельса;

$[N_k]$  - допускаемая продольная сила, не вызывающая потери устойчивости положения рельсошпальной решетки.

Величина  $\Delta t_y$  приведена в /1 - 9/.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003.
2. Першин С. Л. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути. Труды МИИТа, вып. 147. М., Транспорт, 1962.
3. Справочник инженера путейца. Под ред. В. В. Басилова и М. А. Чернышева. Т. 1. М., Транспорт, 1972.
4. Чернышев М.А. Практические методы расчета пути. - М.: Транспорт, 1967.
5. Севостьянова Л.Л. Расчет верхнего строения пути на прочность и устойчивость: Методическое пособие. Хабаровск:, ДВГУПС, 2003.
6. Железнодорожный путь. Под ред. Т.Г. Яковлевой. - М.: Транспорт, 2001.
7. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути. Под ред. С.В. Амелина и Т.Г.Яковлевой. - М.: Транспорт, 1990.

8. Виноградов В.А. и др. Расчёты железнодорожного пути на прочность и устойчивость: Методическое пособие для курсового и дипломного проектирования. Ташкент:, ТашИИТ, 1981.

9. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Ташкент, ГАЖК «Узбекистон темир йуллари», 2000.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель практических расчетов бесстыкового пути на прочность.
2. Цель практических расчетов бесстыкового пути на устойчивость.
3. Общее условие прочности для рельсов бесстыкового пути.
4. Температурные напряжения плети бесстыкового пути.
5. Допускаемые интервалы безопасного понижения температуры рельса по условиям прочности кромочных волокон подошвы рельса.
6. Допускаемые интервалы безопасного повышения температуры рельса по условиям прочности кромочных волокон головки рельса.
7. Допускаемое повышение температуры по условиям сохранения устойчивости положения рельсошпальной решетки.

## ЛЕКЦИЯ 10. УСЛОВИЯ УКЛАДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

### 10.1 УКЛАДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ БЕССТЫКОВОГО БЕЗ СЕЗОННЫХ РАЗРЯДОК НАПРЯЖЕНИЙ

Для железных дорог Узбекистана характерно применение температурно-напряженного бесстыкового пути без сезонных разрядок напряжений. Укладка и эксплуатация бесстыкового пути в этом случае возможны при соблюдении условия /8/:

$$T_A \leq [T_A], \quad (10.1)$$

где  $T_A$  - фактическая максимальная годовая амплитуда колебания температуры рельса для района эксплуатации бесстыкового пути;

$[T_A]$  - допускаемая по условиям прочности и устойчивости амплитуда изменения температуры рельса:

$$[T_A] = \Delta t_P + \Delta t_C - [\Delta t_3], \quad (10.2)$$

$\Delta t_P$  - допускаемый интервал понижения температуры рельса по сравнению с температурой закрепления, когда в рельсах возникают растягивающие температурные силы, принимается  $\Delta t_P = \Delta t_{III}$ ;

$\Delta t_C$  - допускаемый интервал повышения температуры рельса по сравнению с температурой закрепления, когда в рельсах возникают сжимающие температурные силы, принимается равным наименьшей из величин  $\Delta t_{III}$  и  $\Delta t_y$  /8/;

$[\Delta t_3]$  - интервал температур, на котором можно произвести окончательное закрепление плетей, устанавливаемый по условиям производства работ; минимальный интервал  $[\Delta t_3]$  рекомендуется принимать при закреплении в весенний период  $15^\circ\text{C}$ , а в осенний период -  $10^\circ\text{C}$ ;

При соблюдении условия (10.2) возможна укладка и эксплуатация бесстыкового пути температурно-напряженного типа без сезонных разрядок.

Фактический возможный интервал закрепления плети составит:

$$\Delta t_3 = \Delta t_P + \Delta t_C - T_A \quad (10.3)$$

Для определения расчетных параметров необходимо выполнить комплексный расчет бесстыкового пути на прочность и устойчивость, основные положения которого приведены ниже.

## 10.2 КОМПЛЕКСНЫЙ РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

### Общие сведения

Бесстыковой путь температурно-напряженного типа – это путь со сварными рельсовыми плетями такой длины, при которой даже в период наибольших изменений температуры рельсов по сравнению с нейтральной  $t_0$  рельс, преодолев сопротивления стыковых скреплений  $R_c$ , не сможет полностью преодолеть погонное сопротивление  $r$  продольному перемещению (зимние  $r_3 = 2,5 \div 3,0$  т/м или летние  $r_d = 0,65 \div 1,18$  т/м) на всей своей длине.

В бесстыковом пути (в отличие от звеньевом) продольные возвратно-поступательные перемещения рельсошпальной решетки (при положительных температурах) и рельсов по прокладкам (при температурах рельсов ниже  $-5 \div -10$  °С), неблагоприятные для балласта, скреплений, имеют место только на концевых участках длиной  $l_t = 50 \div 100$  м (рис. 18).

Средняя часть плети на протяжении  $Z = l_{on} - 2l_t$  остается всегда неподвижной.

Изменение температуры рельсов  $\Delta t$  по сравнению с нейтральной ( $t_0$  – температура закрепления) приводит к появлению продольных температурных сил

$$N_t = \pm \alpha E F_p \Delta t, \quad (10.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения рельсовой стали, равный  $0,0000118$   $1/^\circ\text{C}$ ;

$E$  – модуль упругости рельсовой стали,  $E = 2,1 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>;

$F_p$  – площадь поперечного сечения рельса, см<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – изменение температуры рельса, °С.

При повышении температуры в рельсовых плетях будут возникать сжимающие продольные температурные силы ( $-N_t$ ), а при понижении – растягивающие ( $+N_t$ ). Подставляя в формулу (10.4) численные значения  $\alpha$ ,  $E$  и площадь поперечного сечения рельса типа Р65 ( $F_p = 82,7$  см<sup>2</sup>) получим

$$N_t = \pm 20,7 \Delta t \quad (\text{кН}) \text{ или}$$

$$N_t = \pm 2,07 \Delta t \quad (\text{т}). \quad (10.5)$$

В бесстыковом пути с новыми рельсами Р65 изменение температуры рельса на  $1^\circ\text{C}$  вызывает в его неподвижной части продольную температурную силу  $N_t = \pm 2,07 \text{ т}$ .

При этом величина температурных напряжений в средней (неподвижной) части плети в связи с несостоявшимся изменением ее длины определяется как

$$\sigma_t = \pm N_t / F_p \quad \text{или} \quad \sigma_t = \pm \alpha E \Delta t.$$

Подставляя в формулу численные значения коэффициента линейного расширения рельсовой стали  $\alpha$  и модуля упругости рельсовой стали  $E$ , получим

$$\sigma_t = \pm 25 \Delta t \quad (\text{кг/см}^2)$$

или

$$\sigma_t = \pm 2,5 \Delta t \quad (\text{МПа}). \quad (10.6)$$

Из этого следует, что нормальные температурные напряжения в неподвижной части плети не зависят от типа рельса и длины рельсовой плети, а изменение температуры бесстыковой плети на каждый  $1^\circ\text{C}$  вызывает в его неподвижной части изменение температурного напряжения  $\sigma_t$  на  $\pm 25 \text{ кг/см}^2$  или на  $2,5 \text{ МПа}$ .

На рис. 18 показаны эпюры напряжений в плети и деформаций концевых участков в летний и зимний периоды эксплуатации бесстыкового пути.

Сжимающие температурные напряжения при повышении температуры плети относительно нейтральной ( $-\sigma_t^{\text{лето}}$ ) и растягивающие при понижении температуры ( $+\sigma_t^{\text{зима}}$ ), считают равномерно распределенными по поперечному сечению рельса (рис. 19 а).

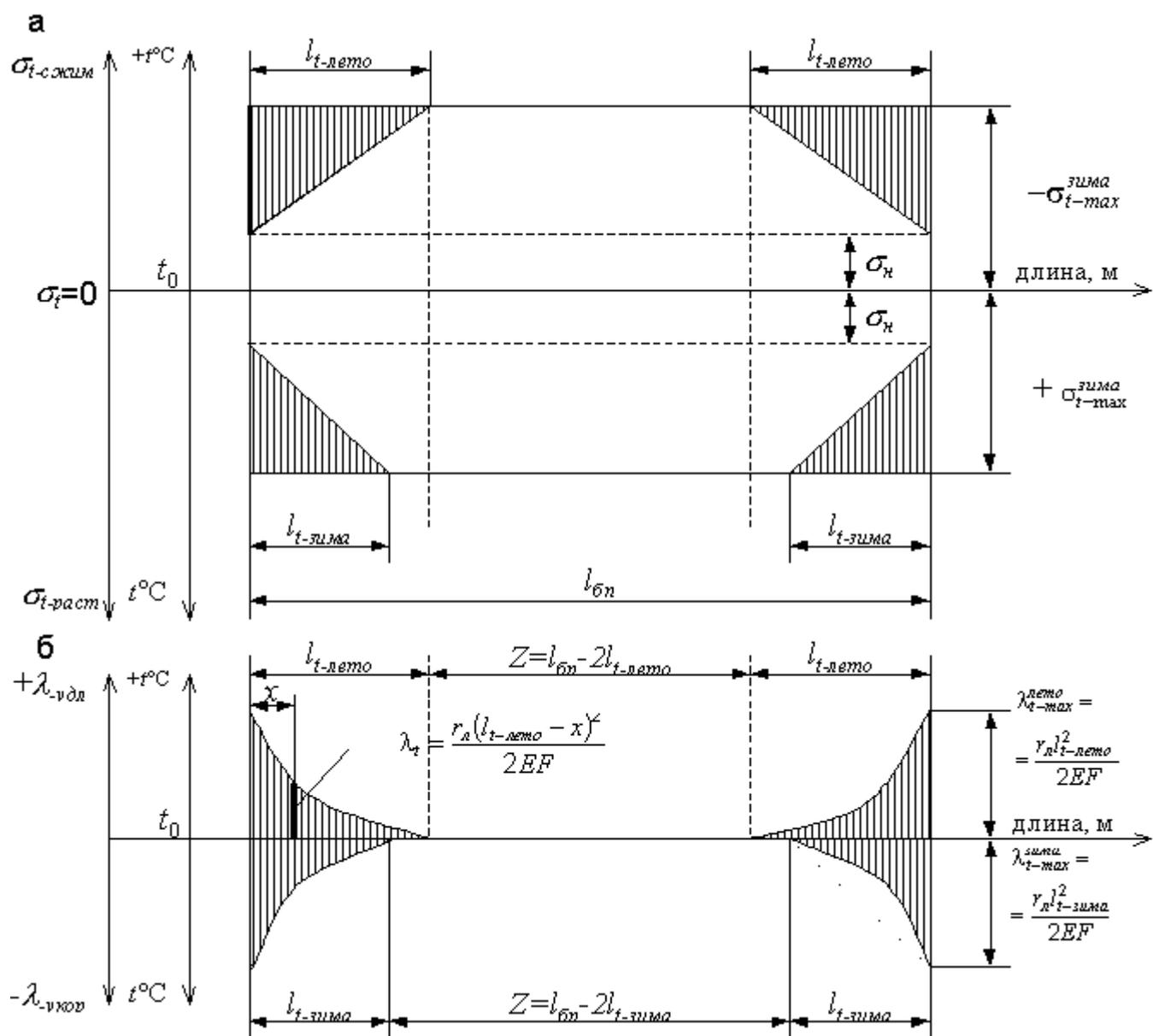


Рис. 18. Эпюры напряжений (а) и деформаций (б) бесстыковой плети в летний и зимний периоды эксплуатации

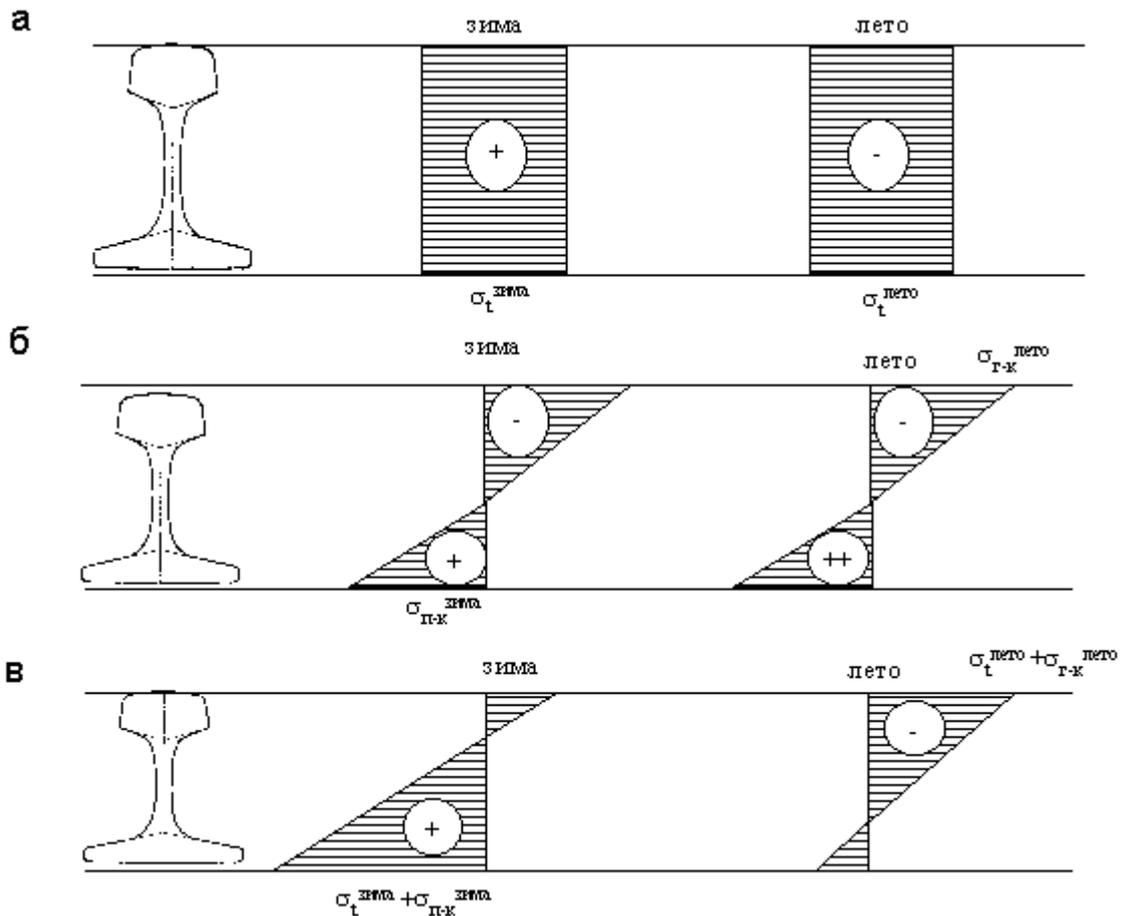


Рис. 19. Эпюры нормальных напряжений в рельсах в летний и зимний периоды эксплуатации: *а* – температурные напряжения; *б* – изгибные напряжения от поезда; *в* – суммарные поездные и температурные напряжения

### 10.3 РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

Рельсовые плети бесстыкового пути, кроме изгибных и других напряжений от воздействия подвижного состава, испытывают значительные температурные напряжения. В этом заключается основное отличие работы бесстыкового пути температурно-напряженного типа от звеньев.

При этом прочность рельса будет обеспечена, если суммарные нормальные напряжения не превысят допустимых величин:

$$\text{летом} \quad K_H \sigma_{z-k}^{\text{лето}} + \sigma_f^{\text{лето}} \leq [\sigma_{0,2}], \quad (10.7)$$

$$\text{зимой} \quad K_H \sigma_{n-k}^{\text{зима}} + \sigma_f^{\text{зима}} \leq [\sigma_{0,2}],$$

где  $K_H$  – коэффициент запаса прочности рельсов

( $K_n = 1,3$  для рельсов первого срока службы и старогодных рельсовых плетей, прошедших диагностирование и ремонт в стационарных условиях или профильное шлифование и диагностирование в пути;

$K_n = 1,4$  для рельсов, пропустивших нормативный тоннаж или переложённых без шлифования) ;

$\sigma_{z-k}^{лето}$ ,  $\sigma_{n-k}^{зима}$  – максимальные вероятные кромочные напряжения от колес подвижного состава соответственно в головке при летних условиях

эксплуатации и в подошве – при зимних;  $\sigma_t^{лето}$ ,  $\sigma_t^{зима}$  – температурные напряжения в поперечном сечении рельса от действия температурных сил, возникающих соответственно при повышении и понижении температуры рельсовой плети относительно нейтральной температуры  $t_0$ ;

$[\sigma_{0,2}]$  – допускаемое напряжение

(для термоупрочнённых рельсов  $[\sigma_{0,2}] = 400$  МПа,

для незакалённых – 350 МПа).

В формулах (10.7) величины наибольших допускаемых температурных напряжений  $\sigma_t^{лето}$ ,  $\sigma_t^{зима}$  неизвестны и подлежат определению:

$$\text{летом } \sigma_t^{лето} \leq [\sigma_{0,2}] - K_n \sigma_{z-k}^{лето}; \quad (10.8)$$

$$\text{зимой } \sigma_t^{зима} \leq [\sigma_{0,2}] - K_n \sigma_{n-k}^{зима}.$$

В то же время температурные напряжения, МПа, могут быть определены по формуле (10.6), тогда

$$\sigma_t^{лето} \leq -2,5 \Delta t_{nz}; \quad (10.9)$$

$$\sigma_t^{зима} \leq +2,5 \Delta t_{nn},$$

где  $\Delta t_{nz}$  и  $\Delta t_{nn}$  – соответственно допускаемые изменения температуры рельса по условию прочности головки в сторону повышения и прочности подошвы в сторону понижения.

Зная  $\sigma_t$ , легко определить соответствующие допускаемые изменения температуры бесстыковой плети по условию прочности рельсов:

в сторону повышения по прочности головки рельса

$$[\Delta t_{nz}] \leq \frac{\sigma_f^{лето}}{2,5} \leq \frac{[\sigma_{0,2}] - K_n \sigma_{z-k}^{лето}}{2,5}; \quad (10.10)$$

в сторону понижения по прочности подошвы рельса

$$[\Delta t_{mn}] \leq \frac{\sigma_f^{зима}}{2,5} \leq \frac{[\sigma_{0,2}] - K_n \sigma_{n-k}^{зима}}{2,5}. \quad (10.11)$$

В дальнейших расчетах допускаемое понижение температуры рельса  $[\Delta t_p]$  по условию прочности (при растяжении) принимается равным  $\Delta t_{nn}$ ,

т. е. 
$$[\Delta t_p] = [\Delta t_{nn}].$$

Допускаемое повышение температуры  $[\Delta t_c]$  (при сжатии) должно быть выбрано из двух условий:

1) по прочности головки  $[\Delta t_c] = [\Delta t_{nz}] + 6^\circ$ ,

$6^\circ$  – допускаемое перенапряжение головки рельса;

2) по устойчивости  $[\Delta t_c] = [\Delta t_y]$ .

В качестве расчетного  $\Delta t_c$  принимается лимитирующее – меньшее из двух. Обычно (для рельсов современного производства типа Р65, Р75) лимитирующим является  $[\Delta t_y]$ .

При повышении температуры рельсовых плетей по сравнению с нейтральной в них могут развиваться сжимающие силы значительной величины (  $120 \div 150$  т), которые при неблагоприятном стечении обстоятельств приводят к очень опасному нарушению устойчивости пути – выбросу.

Выброс, как правило, происходит перед подвижным составом или после прохода им выбросоопасного участка. Это практически мгновенный процесс искривления рельсов в горизонтальной плоскости с одновременным подъемом путевой решетки до 15 мм.

#### 10.4 ДОПУСКАЕМЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУР РЕЛЬСОВ

Для определения возможности применения бесстыкового пути температурно-напряженного типа в конкретных эксплуатационных и климатических условиях рассчитывается допускаемая амплитуда колебания температур рельсовой плети

[T] и сравнивается с расчетной годовой амплитудой температуры рельсов  $T_A$  в заданном районе

$$[T] = [\Delta t_y] + [\Delta t_p] - [\Delta t_z], \quad (10.12)$$

где  $[\Delta t_z]$  – минимальный интервал температур, в котором окончательно закрепляются плети (по условиям производства работ  $[\Delta t_z] = 10$  °С, этот интервал может быть меньше  $[\Delta t_z] = 5$  °С, если закрепление плетей производится в период медленного изменения температуры рельсов (ранние утренние или вечерние часы, пасмурная погода и т. д.);  $[\Delta t_y]$ ,

$[\Delta t_p]$  – соответственно допускаемое повышение температуры рельсовых плетей по сравнению с температурой их закрепления по условию устойчивости пути и допускаемое понижение температуры, определенное условием прочности рельса.

Расчетная амплитуда  $T_A$  рельсов определяется по формуле

$$T_A = t_{maxmax} - t_{minmin} \quad (10.13)$$

где  $t_{maxmax}$  – расчетная максимальная температура рельса, т. е. наибольшая температура рельсов, возможная в данном географическом пункте; принимается для открытых участков на 20 °С выше температуры воздуха;  $t_{minmin}$  – расчетная минимальная температура, т. е. наименьшая температура рельсов, возможная в данном географическом пункте; обычно совпадает с наименьшей температурой воздуха.

Очевидно, что при  $T_A \leq [T]$  укладка и эксплуатация бесстыкового пути в заданных эксплуатационных и климатических условиях возможна.

Если  $T_A > [T]$ , то укладывать бесстыковую конструкцию можно, но при условии реализации следующих мероприятий:

- усиления мощности конструкции верхнего строения пути за счет укладки более мощных рельсов или применения рельсов термоупрочненных вместо нетермоупрочненных;
- уположения кривых, если ограничение связано с планом линии;
- уменьшения скорости движения поездов в период действия особо низких температур.

Выбор оптимального из перечисленных мероприятий представляет собой технико-экономическую задачу, которая решается с учетом конкретных эксплуатационных условий.

## 10.5 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ БЕССТЫКОВЫХ ПЛЕТЕЙ

Бесстыковые плети (в отличие от рельсов стандартной длины) необходимо закреплять на постоянный режим работы пути в определенном температурном интервале (расчетном интервале), определяемом по расчету. Только так можно обеспечить прочность рельсов при самых низких  $t_{\min\min}$  температурах зимой и прочность и устойчивость при самых высоких температурах рельсов летом  $t_{\max\max}$ .

Расчет интервалов закрепления бесстыковых плетей рассмотрим для двух случаев. При этом надо иметь в виду, что в климатических зонах с расчетной амплитудой  $T_A > 112^{\circ}\text{C}$  следует принять эпюру шпал для прямых и кривых равной 2000 шт/км.

Границы расчетного интервала закрепления плетей, т. е. самую низкую  $\text{mint}_3$  и самую высокую  $\text{max}t_3$  температуру закрепления, при которых еще можно укладывать и закреплять плети в заданных условиях, определяют соответственно из следующих выражений:

- нижняя граница расчетного интервала

$$\text{mint}_3 = t_{\max\max} - [\Delta t_y], \quad (10.14)$$

- верхняя граница расчетного интервала

$$\text{max}t_3 = t_{\min\min} + [\Delta t_p].$$

Графически (рис. 20) отложим от расчетной максимальной температуры рельса  $t_{\max\max}$  в произвольном масштабе величину  $[\Delta t_y]$ , а от расчетной минимальной температуры  $t_{\min\min} - [\Delta t_p]$ .

Как видно из рис. 20 концы этих отрезков перекрывают друг друга. Длина перекрытия графически определяет величину расчетного температурного интервала закрепления  $\Delta t_3^{\text{расч}}$ , в пределах которого следует укладывать и закреплять бесстыковые плети на постоянный режим эксплуатации.

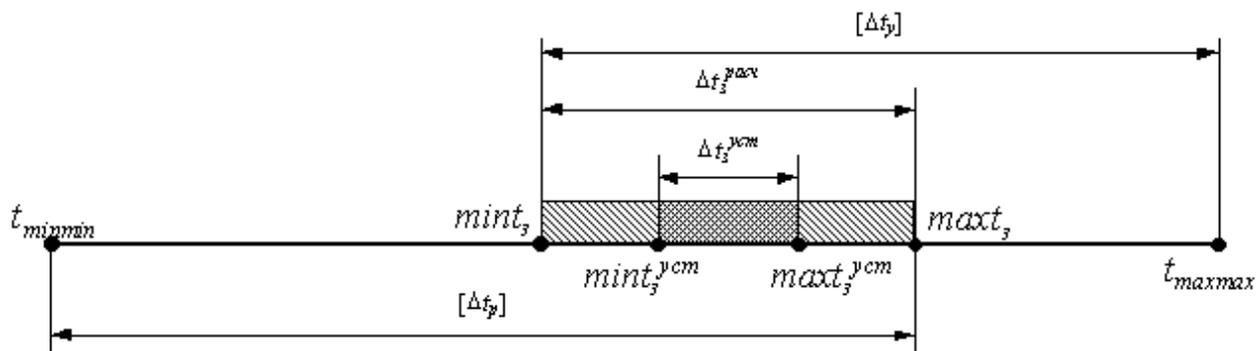


Рис. 20. Температурные интервалы закрепления рельсовых плетей на постоянный режим эксплуатации

### СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003.
2. Першин С. Л. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути. Труды МИИТа, вып. 147. М., Транспорт, 1962.
3. Справочник инженера путейца. Под ред. В. В. Басилова и М. А. Чернышева. Т. 1. М., Транспорт, 1972.
4. Чернышев М.А. Практические методы расчета пути. - М.: Транспорт, 1967.
5. Севостьянова Л.Л. Расчет верхнего строения пути на прочность и устойчивость: Методическое пособие, ДВГУПС, 2003.
6. Железнодорожный путь. Под ред. Т.Г. Яковлевой. - М.: Транспорт, 2001.
7. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути. Под ред. С.В. Амелина и Т.Г. Яковлевой. - М.: Транспорт, 1990.
8. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Ташкент, ГАЖК «Узбекистон темир йуллари», 2000.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основное условие укладка и эксплуатация бесстыкового пути без сезонных разрядок напряжений.
2. Допускаемая по условиям прочности и устойчивости амплитуда изменения температуры рельса.
3. Комплексный расчет прочности и устойчивости бесстыкового пути
4. Эпюры напряжений и деформаций бесстыковой плети в летний и зимний периоды эксплуатации.
5. Эпюры нормальных напряжений в рельсах в летний и зимний периоды эксплуатации.
6. Расчет температурных интервалов закрепления бесстыковых плетей

## ЛЕКЦИЯ 11. ДИАГРАММА ТЕМПЕРАТУРНОЙ РАБОТЫ ПЛЕТЕЙ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

Для правильного назначения расчетного интервала укладки и решения ряда задач, связанных с установлением температур разрядки напряжений сварных рельсовых плетей, целесообразно построить температурную диаграмму /5,7/, (рис. 21).

По оси ординат диаграммы откладывают продольную температурную силу в двух рельсах  $N_t''$ , по оси абсцисс – температуру рельса  $t_{max\ max}$  и  $t_{min\ min}$ .

На оси абсцисс наносят границы годовой амплитуды – максимальную летнюю и минимальную зимнюю температуры в районе, для которого рассчитывают бесстыковой путь. Через точки  $t_{max\ max}$  и  $t_{min\ min}$  проводят вертикальные ограничивающие прямые.

По оси ординат вниз откладывают наибольшую растягивающую температурную силу  $N_{tz}''$ , которая может быть допущена в двух рельсах зимой по условию прочности (линия  $HE$  на рис. 21):

$$N_{tz}'' = F''([\sigma] - K_{II} \sigma_{II-K}), \quad (11.1)$$

где  $F''$  - площадь двух рельсов, см<sup>2</sup>;

Далее по оси ординат вверх откладывают:

а) наибольшую сжимающую температурную силу в головке, которая может быть допущена по условиям прочности летом (линия  $MA$  на рис. 21):

$$N_{tl}'' = F''([\sigma] - K_{II} \sigma_{II-K}) \quad (11.2)$$

б) наибольшую сжимающую продольную силу, которая может быть допущена по условию устойчивости (линия  $PB$  на рис. 21):

$$N_K = \alpha E F'' \Delta t_y \quad (11.3)$$



В рассматриваемых случаях следует ввести бесстыковые плети в расчетный режим работы (расчётный температурный интервал). Для этого делается разрядка температурных напряжений для закрепления плети на постоянный режим при наступлении расчетных температур в пределах  $[\Delta t_{расч}]$ .

На рис. 21 разрядке соответствуют прямые  $S_1S_0$  и  $S_2S_0$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

9. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003.

10. Першин С. Л. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути. Труды МИИТа, вып. 147. М., Транспорт, 1962.

11. Справочник инженера путейца. Под ред. В. В. Басилова и М. А. Чернышева. Т. 1. М., Транспорт, 1972.

12. Чернышев М.А. Практические методы расчета пути. - М.: Транспорт, 1967.

13. Севостьянова Л.Л. Расчет верхнего строения пути на прочность и устойчивость: Методическое пособие. Хабаровск:, ДВГУПС, 2003.

14. Железнодорожный путь. Под ред. Т.Г. Яковлевой. - М.: Транспорт, 2001.

15. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути. Под ред. С.В. Амелина и Т.Г. Яковлевой. - М.: Транспорт, 1990.

16. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Ташкент, ГАЖК «Узбекистон темир йуллари», 2000.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7. Основное условие укладка и эксплуатация бесстыкового пути без сезонных разрядок напряжений.

8. Допускаемая по условиям прочности и устойчивости амплитуда изменения температуры рельса.

9. Минимальная температура закрепления рельса.

10. Максимальная температура закрепления рельса.

11. Диаграмма температурной работы плетей бесстыкового пути без сезонных разрядок напряжений.

12. Наибольшая растягивающая температурная сила  $N_{тз}''$ , которая может быть допущена в рельсах зимой по условию прочности подошвы рельса.

13. Наибольшая сжимающая температурная сила, которая может быть допущена по условиям прочности головки рельса летом.

14. Наибольшая сжимающая продольная сила, которая может быть допущена по условию устойчивости.

## ЛЕКЦИЯ 12. УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЕСА НА РЕЛЬСЕ

### 12.1 РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

При набегании колеса на рельс А оно в общем случае не должно накатываться своим гребнем на него. Для этого необходимо, чтобы колесо, если оно окажется по различным причинам приподнятым, опускалось вниз, соскальзывая гребнем по плоскости  $U-U$ , наклоненной под углом  $\tau$  к горизонту.

Ниже приведена расчетная схема равновесия колесной пары в тот момент, когда левое колесо на рельсе А несколько приподнялось и опирается на него своим гребнем (рис. 22).

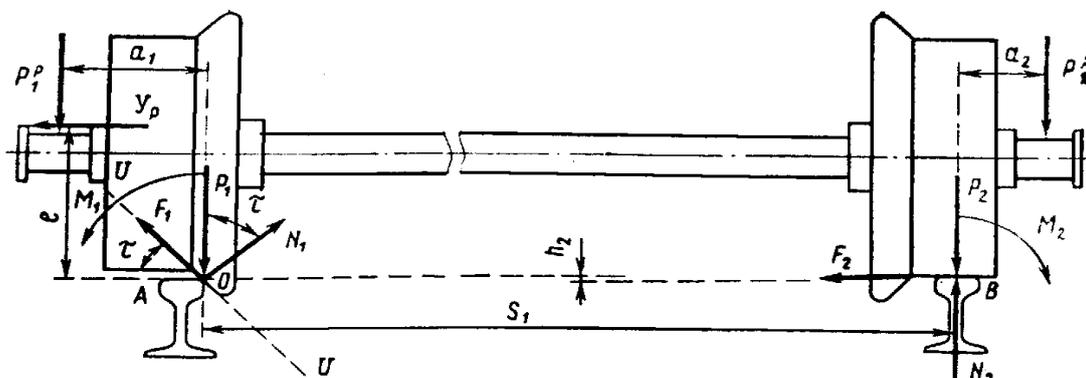


Рис. 22

Для обеспечения исключения схода колесной пары необходимо, чтобы все силы, действующие в плоскости  $U-U$  и направленные в сторону соскальзывания гребня колеса вниз, должны быть не меньше сил, действующих в той же плоскости, но направленных в сторону, обратную соскальзыванию гребня.

Отношение суммы всех первых сил к сумме всех вторых сил называется коэффициентом  $K$  устойчивости против накатывания колеса на рельс.

### **12.2 УСЛОВИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ.**

Рассмотрим условия предельного равновесия колесной пары в момент, когда левое колесо на рельсе А несколько приподнялось и опирается на него своим гребнем. В этом случае внешними действующими на рельсовые нити будут следующие силы и моменты:

1. Полная динамическая вертикальная нагрузка  $P_1$ , передаваемая в точке D от левого колеса на рельс А.

2. Полная динамическая вертикальная сила  $P_2$ , передаваемая в тот же момент от правого колеса на рельс В.
3. Момент  $M_1$ , действующий на рельс А (вследствие того, что часть  $P_1^p$  динамической силы  $P_1$  приложена к шейке оси).

При этом

$$M_1 = P_1^p a_1 .$$

4. Аналогичный момент, передаваемый на рельс В:

$$M_2 = P_2^p a_2 .$$

5. Динамическое рамное усилие  $Y_p$ , приложенное на расстоянии  $e$  от точки контакта левого колеса с рельсом А.

При этом обычно принимается, что  $e = r_k + r_{ш}$ ,

т.е. равна сумме радиуса колеса и радиуса шейки.

Реакции рельсовых нитей обозначены так:

1.  $N_1$  - нормальная к плоскости U-U реакция рельса А.
2.  $N_2$  - вертикальная реакция рельса В.
3.  $F_1$  - составляющая тангенциальной реакции рельса А, действующая в плоскости U-U и принимаемая в расчете равной  $f_1 N_1$ , где  $f_1$  - коэффициент скольжения гребня колеса по рельсу А в плоскости U-U.
4. Составляющая этой реакции, действующая в плоскости чертежа  $F_1 = f_1 N_1 \cos \gamma_1$
5. Аналогично определяются составляющие тангенциальной реакции рельса В (с индексами 2).

Рассмотрим условие предельного равновесия колесной пары в момент, когда колесо опирается в точке D на рельс А прямолинейной частью гребня и стремится опуститься вниз.

Составим три условия равновесия в виде проекции сил на ось U-U и ось, перпендикулярную этой оси и уравнение моментов относительно точки D:

$$(P_1 + P_2 - N_2) \sin \tau = F_1 + (Y_p + F_2) \cos \tau ; \quad (10.1)$$

$$(P_1 + P_2 - N_2) \cos \tau + (Y_p + F_2) \sin \tau = N_1 ; \quad (10.2)$$

$$M_1 + Y_p e = (P_2 - N_2) S_1 + M_2 + F_2 h_2 . \quad (10.3)$$

Из третьего уравнения находится сила  $N_2$ , а из второго уравнения находится  $N_1$ .

### 12.3 КОЭФФИЦИЕНТ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВПОЛЗАНИЯ ГРЕБНЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС.

Чтобы колесо не могло накатываться гребнем на рельс левая часть первого уравнения должна быть не менее правой части. Коэффициент устойчивости против вползания гребнем колеса на рельс определяется по формуле:

$$K = \frac{(P_1 + P_2 - N_2) \sin \tau}{F_1 + (Y_p + F_2) \cos \tau};$$

При  $K > 1$  накатывания не будет.

Из последней формулы следует, что с уменьшением силы  $F_1$  и коэффициента трения  $f_1$  можно существенно увеличить коэффициент устойчивости  $K$ . Поэтому смазка гребней колес и боковых граней головок рельсов существенно не только снижает износ рельсов и колес, но и благоприятно влияет на безопасность движения поездов.

При испытаниях новых единиц подвижного состава расчетные значения динамических сил находятся экспериментально. Значения  $K$  при этом должны определяться в наиболее неблагоприятных, но реальных одновременных сочетаниях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышев М.А. Практические методы расчета пути. М., Транспорт, 1967.
2. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь, М., Транспорт, 1985г.
3. Шахунянц Г.М. Проектирование железнодорожного пути. М., транспорт, 1980 г.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расчетная схема устойчивости колеса на рельсе.
2. Условие предельного равновесия колеса на рельсе.
3. Внешние силы, действующие на рельс при расчете устойчивости колеса.
4. Реакции рельсовых нитей.
5. Силы трения колес о рельсы.
6. Решение системы уравнений предельного равновесия.
7. Коэффициент устойчивости против вползания гребня колеса на рельс.
8. Мероприятия по обеспечению безопасности движения поездов, исключающие возможность вползания гребня колеса на рельс.
9. гребня колеса на рельс.