

РОСЖЕЛДОР

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

Корниенко Елена Владимировна

**ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ПРИ УЧЕТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ**

Специальность 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание
и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Новакович Василий Иванович

Ростов-на-Дону

2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ	
1.1. Возникновение и развитие конструкций бесстыкового пути	9
1.2. Анализ статических методов определения изменений напряженно- деформированного состояния бесстыкового пути	18
1.3. Изменения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути в процессе эксплуатации	34
1.4. Выводы по главе 1	55
2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ И ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЕ В РЕЛЬСАХ	
2.1. Определение погонных сопротивлений сдвигу шпал в балласте поперек оси пути	58
2.2. Вывод и решение дифференциальных уравнений, отражающих процессы деформирования рельсошпальной решетки, при знакопеременной продольной температурной силе с учетом воздействия поездов	70
2.3. Решение дифференциальных уравнений с учетом начального погонного сопротивления сдвигу шпал поперек оси пути	79
2.4. Выводы по главе 2	81
3. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ПО УСЛОВИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ МЕСТ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЛЬСОВ И ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ	
3.1. Статический метод определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути на концевых участках рельсовых плетей при знакопеременном изменении температуры	83

3.2. Графоаналитический метод определения изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути при знакопеременных изменениях температуры рельсов с учетом воздействия поездов	93
3.3. Выводы по главе 3	106
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКИХ СВОЙСТВ БАЛЛАСТА, СДВИГАЕМОГО ШПАЛАМИ ВДОЛЬ И ПОПЕРЕК ОСИ ПУТИ	107
4.1. Определение вязких свойств щебеночного балласта, сдвигаемого шпалами вдоль и поперек оси пути, по испытаниям в действующем пути одиночных шпал	107
4.2. Определение вязких свойств щебеночного балласта, сдвигаемого рельсошпальной решеткой, на концевом участке рельсовой плети бесстыкового пути	112
4.3. Определение вязких свойств щебеночного балласта, сдвигаемого железобетонными шпалами, с использованием экспериментальных данных, полученных на экспериментальном кольце ВНИИЖТа	116
4.4. Выводы по главе 4	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. На железных дорогах России бесстыковой путь за последние два десятилетия стал основной конструкцией верхнего строения железнодорожного пути. Его протяженность превысила 91 тыс. км. Звеньевой путь более не укладывается.

Из-за изменяющихся в процессе эксплуатации знакопеременных продольных сил возможно несвоевременное обнаружение опасных по устойчивости мест с пониженной температурой закрепления. Тогда происходит накопление остаточных деформаций бесстыкового пути в продольном и поперечном оси пути направлениях, что в итоге приводит к потере продольной устойчивости колеи. Определение особенностей напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути при учете воздействия проходящих поездов позволит повысить эффективность работы путевого хозяйства и предотвратить сходы поездов.

Степень разработанности темы исследования

Изучению напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: О. Аммана [34], А. Блоха [35], Е.М. Бромберга [14], М.Ф. Вериги [72], Н.П. Виногорова [73], К. Грюневальдта [45], В.В. Ершова [74], Н.И. Залавского [87], Н.Б. Зверева [110], В.В. Карпачевского [107], Г.В. Карпачевского [83], А.Я. Когана [32], А.А. Кривобородова [50], Р. Леви [43], М.А. Мартине [36], Г. Мейера [44], Т.М. Митюшина [5], К.Н. Мищенко [33], В.И. Новаковича [60], В.О. Певзнера [101], С.П. Першина [39], В.А. Покацкого [101], Ф. Рааба [47], Ю.С. Ромена [76], А.В. Савина [141], О.А. Сулова [142], В.В. Шубитидзе [133], В.Я. Шульги [15] и др. К концу XX века стало ясным, что для реального отражения фактических условий работы бесстыкового пути необходимо учитывать воздействие поездов.

В представленном исследовании, в отличие от известных, рассмотрены изменения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути, возникающие в процессе эксплуатации, с учетом воздействия поездов на устойчивость конструкции. В частности, результаты выполненных в работе исследований позволяют

определять опасные для движения поездов места, где из-за изменений продольных сил в рельсах возникли нарушения установленного температурного режима работы бесстыкового пути (как правило, с понижением температуры закрепления).

Цель и задачи исследования

Целью работы является определение особенностей изменения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути в процессе эксплуатации при учете воздействия проходящих поездов.

Для достижения поставленной цели решены следующие *задачи*:

1. Определена математическая модель и найдены причины роста во времени остаточных стрел изгиба рельсов в плане при чередующихся сжимающих и растягивающих температурных продольных силах в бесстыковом пути.

2. С учетом фактора времени и воздействия поездов разработан графоаналитический метод определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути. С помощью этого метода обнаруживаются опасные для движения поездов участки, где нарушен установленный температурный режим работы бесстыкового пути.

3. Разработана методика определения по опытным данным коэффициента вязкости балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, с учетом фактора времени и воздействия поездов.

Научная новизна:

1. Определена математическая модель бесстыкового пути и разработана методика выяснения причин роста остаточных стрел изгиба рельсов в плане, учитывающие чередующиеся суточные и сезонные изменения продольных сил в рельсах и воздействие проходящих поездов.

2. Предложен графоаналитический метод определения в бесстыковом пути опасных мест, где нарушен установленный температурный режим работы рельсовых плетей.

3. Предложена методика определения коэффициента вязкости щебёночного балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, базирующаяся на обработке опытных данных.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке метода определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и фактора времени, который при использовании в нормативах повысит устойчивость рельсошпальной решетки. По данной методике возможно определение мест в рельсовых плетях с пониженной температурой закрепления, что, в свою очередь, позволит за счет оптимизации работ по перезакреплению рельсовых плетей снизить материальные и трудовые затраты на устройство пути, его текущее содержание и ремонт.

Методы диссертационного исследования

Методы исследования в данной работе основаны на:

- использовании математического аппарата дифференциального и интегрального исчисления, а также решений дифференциальных уравнений, отражающих исследуемые процессы деформирования элементов конструкции верхнего строения железнодорожного пути;
- современных методах планирования и проведения экспериментов;
- результатах учёта методик определения сил и деформаций, полученных отечественными и зарубежными учеными в области бесстыкового пути;
- методах теории ползучести, позволивших разработать графоаналитический метод решения задач по определению изменений напряженно-деформированного состояния рассматриваемой конструкции верхнего строения пути.

Положения, выносимые на защиту:

- метод определения механизма роста остаточных стрел изгиба рельсов в плане на напряженных неровностях в процессе эксплуатации бесстыкового пути;
- графоаналитический метод определения изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути под действием чередующихся температурных продольных сжимающих и растягивающих сил;
- методика определения коэффициента вязкости балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, базирующаяся на обработке опытных данных.

Степень достоверности и апробации результатов исследования

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, основана на методах таких фундаментальных наук, как теория ползучести, теория пластичности и теория упругости, а также на экспериментальных данных, подтверждающих теоретические выводы, полученные непосредственно на действующих участках бесстыкового пути.

Реализация результатов работы

1. Результаты работы легли в основу предложений по корректировке нормативов устройства и эксплуатации бесстыкового пути (Приложение 1 и 2).
2. Результаты работы учтены ВНИИЖТом при разработке «Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» (ЦП 2544) от 14.12.2016 в пунктах, касающихся регламентирования условий устойчивости бесстыкового пути (Приложение 3).

Апробация работы

Основные результаты исследований были доложены и обсуждены:

- на Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2011» (Ростов-на-Дону, 2011 г.);
- на Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2013» (Ростов-на-Дону, 2013 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава» в ДНУЖТ (Днепропетровск, 2013 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» (Ростов-на-Дону, 2015 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Транспорт-2016» (Ростов-на-Дону, 2016 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Транспорт-2017» (Ростов-на-Дону, 2017 г.);
- на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Наука -2017» (Ростов-на-Дону, 2017 г.);

– на Международной научно-практической конференции «Транспорт-2018» (Ростов-на-Дону, 2018 г.).

Личный вклад автора состоит:

– в определении математической модели и причин роста остаточных стрел изгиба рельсов в плане на напряженных неровностях бесстыкового пути при знакопеременных изменениях температуры с учетом воздействия поездов;

– в разработке графоаналитического метода определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути, при знакопеременных изменениях температуры рельсов с учетом воздействия поездов и фактора времени, с помощью которого обнаруживают опасные для движения поездов места, где нарушен температурный режим работы рельсовых плетей;

– в разработке методики определения по опытным данным коэффициента вязкости балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 25 печатных работах, в том числе 10 – в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и практических рекомендаций. Диссертация изложена на 145 страницах основного текста, содержит 50 рисунков, 1 таблицу, 3 приложения, список использованных источников из 143 наименований.

1. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

1.1. Возникновение и развитие конструкций бесстыкового пути

Наиболее совершенной и прогрессивной конструкцией верхнего строения пути на отечественных и зарубежных железных дорогах является бесстыковой путь. В 30–40-е годы прошлого столетия эта конструкция уже широко применялась в индустриально развитых странах Европы и Америки. В СССР внедрение конструкции бесстыкового пути тормозилось отсутствием рельсов достаточной погонной массы, а также слабыми промежуточными костыльными скреплениями, песчаным балластом и отсутствием средств сварки рельсовых плетей [1].

В конце XIX в., в 1896 году, идею укладывать железнодорожный путь без стыков впервые выдвинул русский инженер И.Р. Стецевич [2]. Им было предложено укладывать путь с волнообразным в плане искривлением и производить периодическое удлинение или укорочение плетей. В России бесстыковой путь был применен лишь в начале XX в. на трамвайных путях Москвы, Киева, Петрограда.

В 1897 году в США была сварена рельсовая плеть длиной 5 км. В Будапеште в то время сваривали стыки на трамвайных путях. В 1925 году специалистом-железнодорожником К.Э. Кюннером [3] был описан опыт «уничтожения зазоров и сварки стыков на магистральных дорогах». Немного позже Б.П. Чистяков [4] описал опыт «термитной сварки рельсовых стыков на железнодорожных путях в СССР и за границей».

В России в 1932 году впервые были уложены рельсы длиной 215–225 м на мостах через реки Оку и Волгу. В 1934 году рельсовые плети длиной 477 м были уложены на станции Подмосковная.

Ученые-путейцы МИИТа Н.Т. Митюшин и К.Н. Мищенко [5] пытались доказать техническую и экономическую необходимость внедрения бесстыкового пути, однако они наталкивались на возражения, которые в основном объяснялись тем, что в СССР в отличие от Западной Европы и США более суровые климати-

ческие условия и высокая грузонапряженность, требующие применения тяжелых рельсов, отдельных креплений и щебеночного балласта.

Бесстыковой путь на отечественных железных дорогах на территории Сибири бывшей Томской железной дороги начал применяться с 1948 года в виде конструкции инженера М.С. Боченкова, который занимался исследованиями железнодорожного пути в районах с суровым климатом и высокой грузонапряженностью [6]. Им под руководством своего учителя К.Н. Мищенко была разработана оригинальная конструкция вместе с технологией ее укладки, получившая название «Бесстыковой путь с саморазрядкой напряжений». В 1956 году была уложена первая конструкция бесстыкового пути с саморазрядкой напряжений и возвращающими пружинными устройствами. Крепления представляли собой стальные подкладки с загнутыми ребордами, обеспечивающими свободное продольное перемещение рельсовых плетей под действием сил угона и температурных удлинений. Исследования проводились на экспериментальном участке Подольской дистанции пути под Москвой [7]. После экспериментов, проведенных на данном участке протяженностью 10 км, было установлено, что эта конструкция является недостаточно надежной. К ее недостаткам отнесли сложность возвращающих устройств и уравнивательных приборов, которые не могли полностью обеспечивать безопасность движения поездов [8].

В 1956 году на бывшей Московско-Курско-Донбасской железной дороге было уложено на деревянных шпалах 2 км температурно-напряженного бесстыкового пути с периодической (сезонной) разрядкой напряжений. Эта конструкция требовала проводить два раза в год (весной и осенью) перезакрепление рельсовых плетей.

На Молодеченской дистанции Белорусской дороги в 1957 году было уложено около ста км верхнего строения пути с рельсами Р50 на железобетонных шпалах со креплениями К-2, с сезонной разрядкой температурных сил. В 1958 году такой путь был внедрен на участке Бердичев – Шепетовка на Украине, где параллельно началась укладка блочного железобетонного подрельсового основания [9].

В 1960 году впервые участок бесстыкового пути температурно-напряженного типа без сезонных разрядок протяженностью 10 км был уложен на участке Гродовка – Красноармейск Донецкой железной дороги [10].

Начало массовой укладки бесстыкового пути в СССР, преимущественно на железобетонных шпалах, относят к 1960 году.

В 1958 году в Мюнхене на XVIII конгрессе Международной ассоциации железнодорожных конгрессов были приняты рекомендации всем странам по внедрению бесстыкового пути на грузонапряженных и высокоскоростных линиях [11]. В Германии к этому времени было уложено около 10 тыс. км конструкции температурно-напряженного бесстыкового пути, с рекомендуемой температурой закрепления рельсовых плетей 15 °С [12].

На отечественных железных дорогах температура рельсов зимой существенно ниже, чем в Германии. В значительной части технических решений при внедрении бесстыкового пути в СССР был заимствован немецкий опыт. В частности, соединения рельсовых плетей через уравнивательные пролеты, отдельное скрепление типа «К», температура закрепления не выше 15 °С. Способ термитной сварки рельсов, широко применяемый в Германии, был отвергнут, поскольку контактная сварка, как тогда считалось, обеспечивала большую прочность сварного соединения, что было необходимым условием для более грузонапряженных железных дорог [13], какими являлись основные магистрали в СССР.

К 1962 году бесстыковой путь становится типовой конструкцией [14].

Далее, начиная с 1963 года, протяженность бесстыкового пути на отечественных железных дорогах ежегодно увеличивалась. В 1964 году она составляла 2200 км, а к 1966 году – 5500 км. С 1970 по 1980 год ученые-путейцы начали разработку и внедрение бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями [15]. В 1983 году во Львове рельсовые плети укладывались длиной до перегона [16]. Внедрение бесстыкового пути без ограничения по максимуму в 1984 году началось с утверждением временных «Технических условий на укладку бесстыкового пути с рельсовыми плетями длиной более 950 м». В 1991 году утвержденными «Техническими указаниями по устройству, укладке, ремонту и содержанию бес-

стыкового пути» [17] была разрешена укладка сверхдлинных рельсовых плетей (длиной до перегона). После 1998 года в проектах по капитальному ремонту пути предусматривалась укладка только сверхдлинных рельсовых плетей. К 2003 году протяженность бесстыкового пути составила 50 % главных путей российских железных дорог, а на магистральных линиях – около 40 %. С начала XXI века полигон бесстыкового пути продолжал увеличиваться за счет укладки в восточных регионах страны, где он составил к тому времени от 6 до 11 % длины главных путей.

В 1998 году В.М. Ермаков в [18] проводит сравнение конструкции бесстыкового пути в Западной Европе и России, подчеркивая причины, препятствующие внедрению «сверхдлинных» плетей в стране, а именно – несовершенство промежуточных рельсовых креплений типа КБ, сложность введения плетей в расчетный температурный интервал, обеспечение работы автоматической сигнализации и системы автоблокировки, несовершенство технологии ремонтов пути. Автором [18] также были описаны разработанные и находящиеся на разных стадиях внедрения промежуточные рельсовые крепления. Так, на Октябрьской дороге впервые были проведены испытания на участке пути со креплением КБ с упругими прутковыми клеммами типа ОП 105 со скоростями 160/80 км/ч и на стрелочном переводе – 100/80 км/ч. На Горьковской дороге на участках с грузонапряженностью до 40 млн ткм брутто на 1 км в год предполагалось применять бесподкладочное крепление с прутковой пружинной клеммой типа ЖБР-3. Аналогичные сферы применения имело бесподкладочное крепление с прутковой пружинной клеммой, получившее название ВНИИЖТ-1. Кроме них на разных стадиях разработки и внедрения находились крепления типа БПУ с пластинчатыми упругими клеммами и анкерные бесподкладочные крепления типа АРС.

В странах Западной Европы на участках высокоскоростного движения для регулирования перевозок использовались «точечные каналы», в то время как в России для этих целей применялись рельсопроводные каналы, в которых рельсовые цепи могут быть как с изолирующими стыками, так и без них. К последним относятся рельсовые цепи с тональной частотой. Они более эффективны, однако сложны и нуждаются в качественном обслуживании. Для устранения же уравни-

тельных пролетов на отечественных дорогах применяют вварку в плети высокопрочных изолирующих стыков. В России такие стыки обеспечивают необходимое сопротивление продольным силам только за счет сил сопротивления сдвигу слоя клея. В.М. Ермаковым был подсчитан и экономический эффект от удлинения рельсовых плетей до перегона, который оказался в два раза выше по сравнению с эффективностью сварки на блок-участке.

В 2001 году в [19] был предложен рельс Р58, поскольку он может обеспечить большую устойчивость бесстыкового пути за счет уменьшения продольных сжимающих температурных сил и необходимого погонного сопротивления q на 17 % по сравнению с Р65.

Э.В. Воробьев и В.И. Новакович [20] обратили внимание на следующие особенности устройства и ремонта бесстыкового пути: предотвращение угона за счет устройства изолирующих стыков, недопущение раскрытия зазора больше конструктивного, угрожающего безопасному движению поездов. Необходимым является, по их мнению, поддержание нормальных размеров и состояния балластной призмы. Было отмечено, что на работу верхнего строения пути оказывает влияние и состояние земляного полотна. Основной технической характеристикой конструкции, обеспечивающей устойчивость рельсошпальной решетки, возможность выполнять ремонтные работы, служит достаточно высокая температура закрепления плетей, названная «оптимальной».

В статье [21] авторы описывают научные разработки, проложившие дорогу к «бархатному пути». Появилась возможность сваривать рельсовые плети протяженностью до перегона с помощью сварки рельсов способом предварительного изгиба. Упоминается применение термитной сварки на стрелочных переводах и при сварке рельсовых плетей между собой.

Ранее считалось, что с ростом грузонапряженности необходимо увеличивать погонную массу рельсов и массу железобетонных шпал, переходить на сплошное железобетонное основание. Чем тяжелее рельс, тем металлургам труднее обеспечить их качество, поскольку в более тяжелых рельсах сталь рыхлее и дефекты контактно-усталостного происхождения возникают в них чаще [22].

Рельсы Р75 по сравнению с Р65 имеют большую жесткость, поэтому возникают большей величины контактные напряжения и более высокая динамическая сила, передаваемая от колеса. По применяемым расчетам рельсов на прочность по предельному состоянию они имеют тем меньшие кромочные напряжения, чем больше их погонная масса, однако кромочные напряжения значительно ниже предела текучести, а контактные в несколько раз их превышают, что уменьшает срок их службы [23]. Другим фактором, который мог бы повлиять на решение в пользу тяжелых рельсов, является давление на балласт под шпалами. Однако напряжение в балласте под шпалами при рельсах Р75 отличается от Р65 по применяемой методике расчета лишь на 6 %, а от состояния и качества балласта его несущая способность зависит во много раз больше.

При увеличении погонной массы рельса от типа к типу продольная устойчивость рельсошпальной решетки уменьшается в среднем на 20 %, а зимой существенно увеличиваются зазоры. Поэтому в [22] было предложено применять на бесстыковом пути рельсы меньшей массы, чем Р65. Рельсы Р58 имеют такую же ширину подошвы, как Р65, однако меньшую высоту. Такой путь представляется более надежным и экономичным, в этом случае на 12 % сокращается расход металла.

Для меньшей динамики взаимодействия пути и подвижного состава этим же автором [22] было предложено применять облегченные железобетонные шпалы. На основании статических расчетов и экспериментов существует предположение, что шпала сдвигу в горизонтальной плоскости поперек и вдоль оси пути сопротивляется тем больше, чем выше ее масса. Но при учете воздействия поездов эта зависимость существенно изменяется [22]. Уменьшение массы железобетонной шпалы позволит снизить энергетические затраты, увеличить производительность труда, снизить ее стоимость. Расчеты по стандартной методике показывают [22], что масса шпалы может быть доведена до 1,5–1,6 кН.

Считается, что для бесстыкового пути в кривых участках по наружной нити необходимо увеличение плеча балластной призмы с 0,25 до 0,45 м. Такое увеличение плеча несущественно влияет на сопротивление балласта [22]. Однако ста-

тические опыты, проведенные во ВНИИЖТе [14], показали, что увеличение плеча балластной призмы более 0,25 м не имеет смысла и ведет лишь к дополнительным материальным и энергетическим затратам. В [22] указывалось на то, что связывание балласта вязущими материалами уменьшает его дренирующие свойства, а стальные фартуки на торцах шпал ускоряют отрясение концов шпал, с последующим их провесом, и затрудняют ремонтные работы и текущее содержание. В то же время при оптимальной температуре закрепления погонные сопротивления щебеночного балласта без упомянутых мер вполне достаточны для сохранения устойчивости бесстыкового пути.

Особой проблемой на отечественных железных дорогах являются промежуточные скрепления. Наиболее распространённым типом скрепления до настоящего времени является КБ. Эта конструкция имеет ряд недостатков, в результате которых в промежутке между капитальными ремонтами ресурс рельсов используется не полностью и требуется проводить капитальный ремонт раньше срока. Новые скрепления АРС и ЖБР-65, а также «Фоссло» и «Пандрол» имеют недостатки, основным из которых является невозможность обеспечить постоянное прижатие рельса к шпале.

В статьях [24] и [25] вновь были даны дополнительные обоснования целесообразности применения рельса Р58. Указывалось на то, что в строительной механике чем тоньше балка на упругом основании, т. е. рельс, тем она прочнее. Предложенный рельс Р58 имеет меньшую на 20 мм высоту, чем Р65, но такую же ширину подошвы. Кромочные напряжения, которые зависели от его бокового кручения и изгиба, уменьшались на 10 % по сравнению с Р65. Возрастает устойчивость против кантования, а следовательно, снижается нагрузка на прокладки и клеммы, возникающая при повороте рельсов под действием боковых сил. Металлургам уменьшение погонной массы и высоты благодаря лучшему обжатию металла, а также вследствие меньшего коробления при остывании позволяет улучшить качество рельсовой стали. В связи со снижением динамических нагрузок и контактных напряжений можно ожидать уменьшения выхода рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения. Внедрение нового рельса Р58 обес-

печит повышение устойчивости бесстыкового пути и уменьшение величины зазора на концах плетей и при изломе во время действия растягивающих температурных сил зимой и в межсезонье.

В настоящее время протяженность бесстыкового пути на главных путях с 2007 по 2016 год увеличилась соответственно с 66 465,7 до 91 000 тыс. км (рисунок 1.1); на станционных – с 4725,7 до 6464,3 тыс. км.

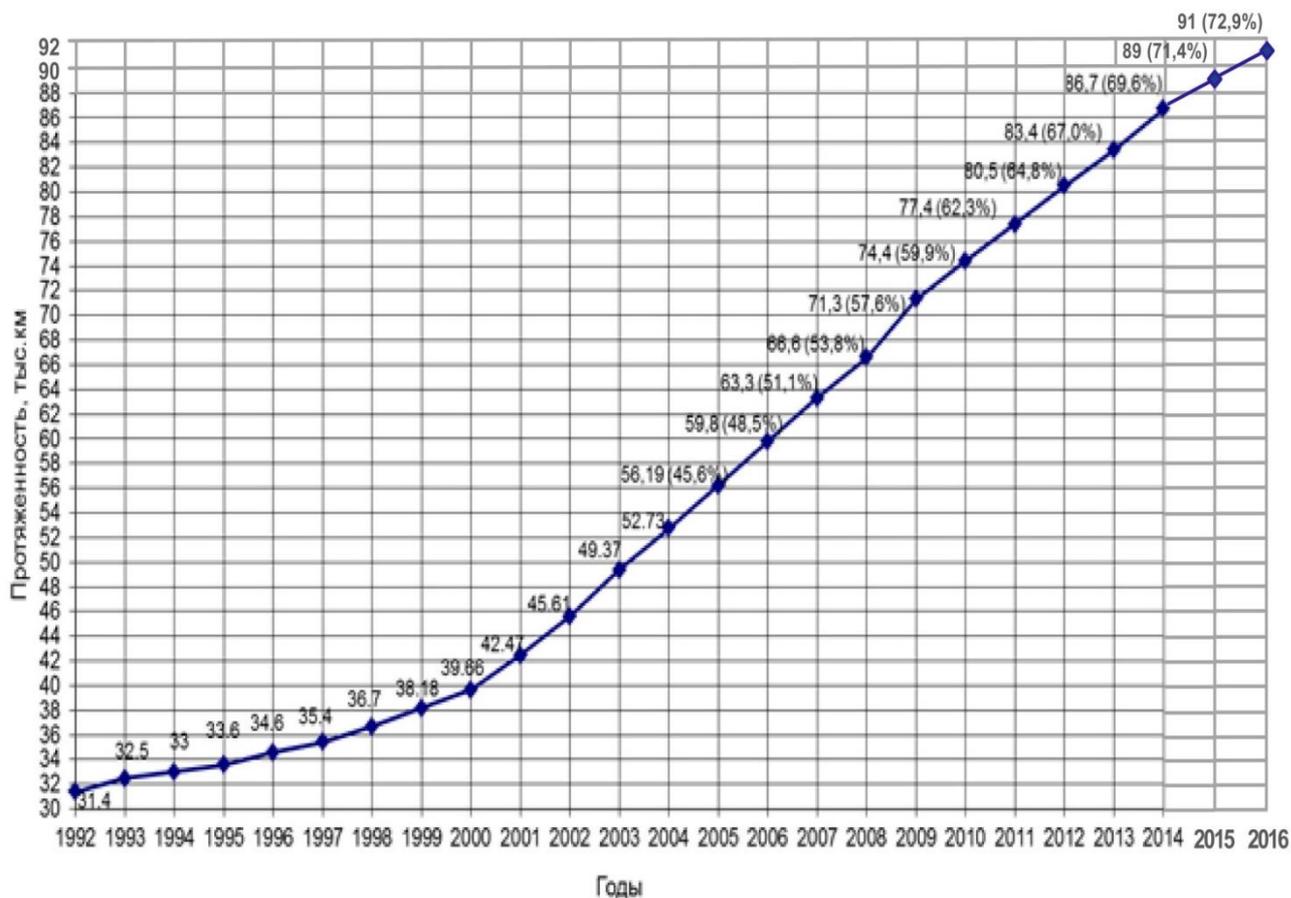


Рисунок 1.1 – Протяженность бесстыкового пути на железных дорогах России

Самый значительный прирост бесстыкового пути (4,7 тыс. км) наблюдался в 2009 году (рисунок 1.2).

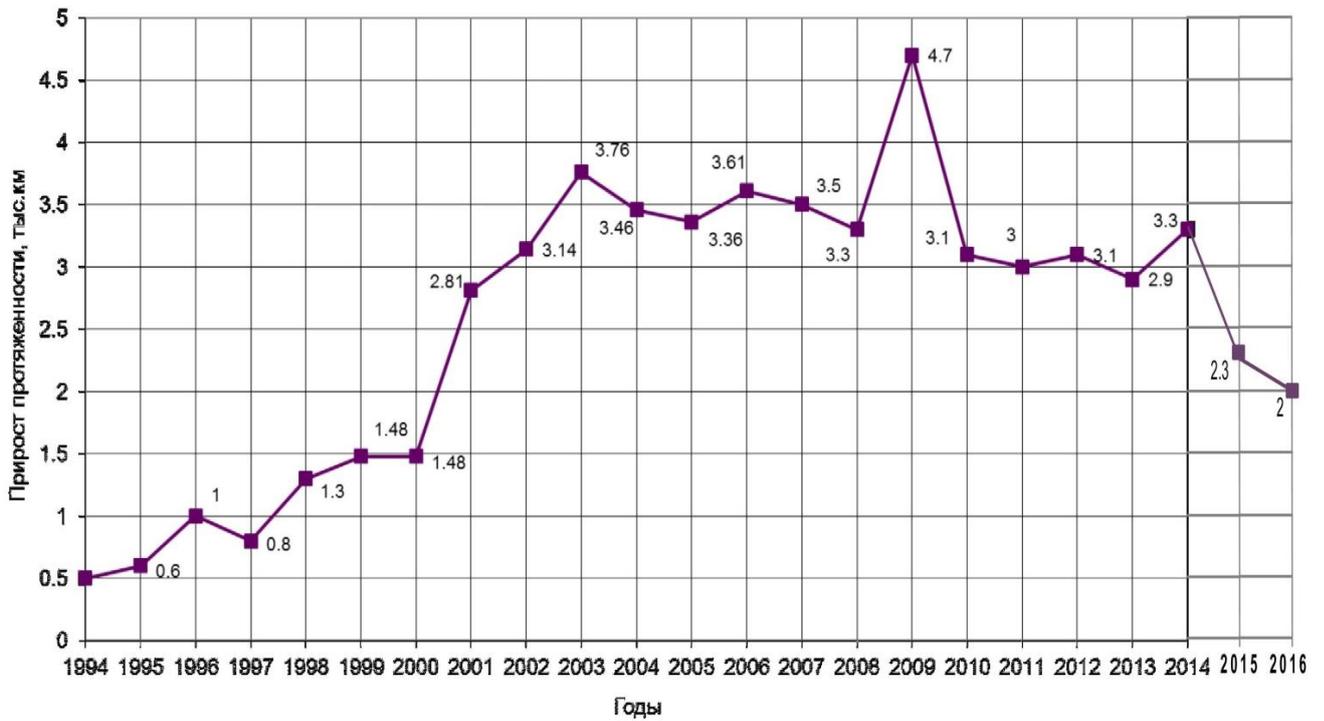


Рисунок 1.2 – Прирост протяженности бесстыкового пути по годам

Протяженность бесстыкового пути длиной до перегона в 2013 году составила 21 703,7 тыс. км, длиной до блок-участка – 21 806,1 тыс. км (рисунок 1.3).

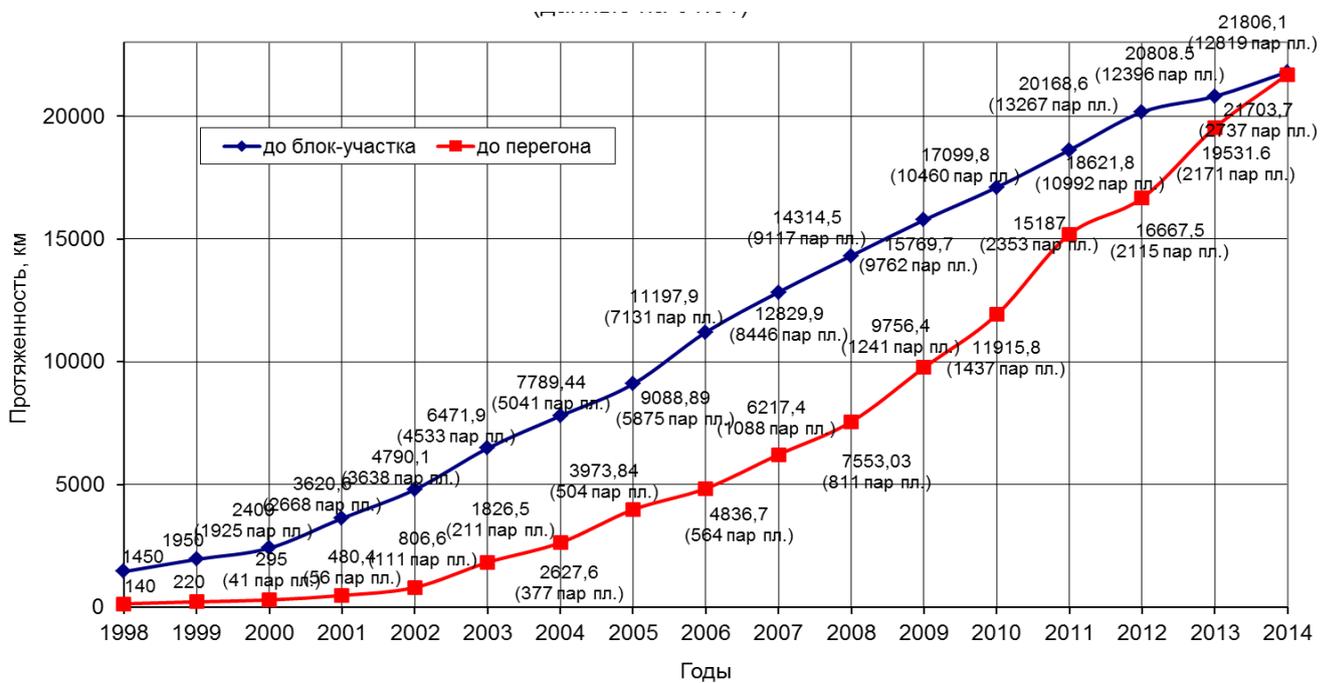


Рисунок 1.3 – Изменение полигона укладки бесстыкового пути длиной до блок-участка и перегона на сети железных дорог

1.2. Анализ статических методов определения изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути

1.2.1. Изменения продольных сил и деформаций

При расчетах температурных сил в рельсовых плетях бесстыкового пути и перемещений их концов пользуются формулами, приведенными в [27]. Эти расчетные формулы позволяют определять удлинение рельсовой плети от укладки до минимальной температуры и от укладки до максимальной температуры при смерзании балласта и увеличении погонного сопротивления.

В работе [28] предпринята попытка создания теории расчета температурных перемещений при изменении величины продольного смещения рельсов при учете погонного сопротивления на концах рельсовой плети. Зависимость между продольным смещением и погонным сопротивлением К. Миклоши [28] принимает по формуле:

$$\frac{dr}{d\lambda} = K_1, \quad (1.1)$$

где r – погонное сопротивление, кН/м;

λ – продольное смещение, м;

K_1 – некоторая постоянная, которая по существу является модулем упругости, МПа.

Э. Немешди [29], Л. Сакмауэр [30], С.П. Першин [31], А.Я. Коган [32] принимают зависимость между продольным погонным сопротивлением и смещением по формуле:

$$r = r_0 + U_x \lambda, \quad (1.2)$$

где r_0 – начальное сопротивление, кН/м;

U_x – продольный модуль упругости, МПа.

Зависимость погонного сопротивления от малых продольных перемещений может выражаться формулой [62]:

$$r = U_x \lambda. \quad (1.3)$$

В работах авторов, где величина r зависит от λ , приведены расчетные формулы, позволяющие для несмерзшегося балласта при прямом ходе производить расчеты изменения температуры, по которым определяются величины температурных перемещений на конце рельсовой плети. В зависимости от времени года по этим формулам не учитываются изменения погонных сопротивлений.

В большинстве публикаций не приводилось достоверных данных о величинах r_0 и U_x и не было известно, при какой максимальной величине перемещения λ возможно использование указанных зависимостей. Л. Сакмауэр [30] считает, что эта зависимость справедлива до величины $\lambda \leq 2$ мм, Э. Немешди [29] – до $\lambda \leq 4$ мм. По их мнению, сопротивление после смещения на большую величину достигнет максимума и останется постоянным. Для практических целей, как считают авторы, когда требуется определить наибольшие годовые изменения длины рельсовой плети, независимо от величины перемещений необходимо принимать погонное сопротивление постоянным.

Если при изменении длины рельсов нет сопротивления, препятствующего этому, тогда изменение температуры не вызывает продольных сил и напряжений. Изменение длины рельсовой плети в результате изменения температуры при отсутствии сопротивления определяется по формуле

$$\Delta l = \alpha L \Delta t . \quad (1.4)$$

График изменения длины рельсовой плети при изменении температуры представляет собой прямую линию, которая наклонена к оси абсцисс под углом $\gamma = L \arctg \alpha$.

При наличии жесткой заделки на концах длина рельса не может изменяться при колебаниях температуры. Продольная температурная сила определяется по формуле:

$$F_t = \alpha E \omega \Delta t . \quad (1.5)$$

Напряжения, возникающие при этом в рельсовом металле, равны

$$\sigma_t = \frac{F_t}{\omega} = \alpha E \Delta t , \quad (1.6)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$;

E – модуль упругости рельсовой стали, МПа;

ω – площадь поперечного сечения рельса, м²;

Δt – приращение температуры, °С.

График приращения продольной силы при изменении температуры аналогичен графику удлинений, только угол наклона его к оси абсцисс $\gamma = \arctg \alpha E \omega$.

В случае, когда один конец рельса заделан, а другой перемещается, преодолеваемая неупругое сопротивление, которым является сила трения между рельсом и стыковыми накладками, изменение длины рельса будет равно

$$\lambda = \alpha L \left(\Delta t - \frac{R_c}{\alpha E \omega} \right), \quad (1.7)$$

где L – длина концевого участка, м.

Это явление происходит при прямом ходе температуры, когда она повышается или понижается в первый раз после укладки и закрепления рельса.

При обратном ходе изменения температуры, т. е. при понижении температуры после повышения или наоборот:

$$\lambda = \alpha L \left(\Delta t - \frac{2R_c}{\alpha E \omega} \right). \quad (1.8)$$

При рассредоточенном по всей длине рельса неупругом погонном сопротивлении r изменение длины при прямом и обратном ходе температур равно

$$\lambda_{\text{прям}} = \frac{\alpha^2 E \omega}{2r} \Delta t^2; \quad (1.9)$$

$$\lambda_{\text{обрат}} = \frac{\alpha^2 E \omega}{4r} \Delta t^2. \quad (1.10)$$

Когда погонное сопротивление увеличивается от r_1 до r_2

$$\lambda = \frac{\alpha^2 E \omega}{2(r_2 - r_1)} \Delta t_1^2, \quad (1.11)$$

где Δt_1 – изменение температуры после увеличения погонного сопротивления, °С.

При наличии стыкового R_c и погонного сопротивлений r формулы при прямом и обратном ходе имеют следующий вид

$$\lambda_{\text{прям}} = \frac{\alpha^2 E \omega}{2r} \left(\Delta t - \frac{R_c}{\alpha E \omega} \right)^2; \quad (1.12)$$

$$\lambda_{\text{обрат}} = \frac{\alpha^2 E \omega}{4r} \left(\Delta t - \frac{2R_c}{\alpha E \omega} \right)^2. \quad (1.13)$$

Если же на конце рельсовой плети имеется упругое сопротивление, удлинение равно

$$\lambda = \frac{\alpha L}{1 + \frac{K\alpha}{E\omega}} \Delta t, \quad (1.14)$$

где K – коэффициент пропорциональности (жесткость упругого элемента, оказывающего сопротивление).

Когда в рельсовых плетях бесстыкового пути имеются продольные растягивающие силы, то при сквозном изломе рельса образуется зазор. Это объясняется тем, что длина плети сокращается и наступает разрядка напряжений на участках, которые прилегают к месту излома [26].

Зазор, образующийся в месте излома на концах рельсовой плети, равен сумме сокращений длины двух примыкающих участков

$$\lambda = 2\lambda = \frac{\alpha^2 E \omega}{r} \Delta t^2. \quad (1.15)$$

В тех случаях, когда балласт не смерзся или смерзся недостаточно, перемещение рельса сопровождается перемещением шпал в балласте. Перемещение одной рельсовой нити при неподвижной второй нити вызовет перекося шпал и поворот рельса относительно шпал. Появится дополнительное сопротивление в виде момента, препятствующего повороту рельса относительно шпалы, и в виде дополнительных сил, препятствующих повороту шпалы в балласте.

Величина зазора для случая, когда шпалы перемещаются вместе с рельсом, что возможно при недостаточно смерзшемся балласте, определяется формулой

$$\lambda = \frac{\alpha^2 E \omega}{r} \Delta t^2 \left(\frac{2aS}{a^2 + S^2 + \frac{4aM}{rb}} \right), \quad (1.16)$$

где a – длина шпалы, м;

S – расстояние между осями рельсов, м;

M – реактивный крутящий момент, возникающий между шпалой и рельсом при их взаимном повороте, Н·м;

b – расстояние между осями шпал, м.

Погонное сопротивление продольному перемещению рельсов при замерзшем балласте было определено М.С. Боченковым [26] в 1960 и 1961 гг. Рельс длиной 12,5 м, прикрепленный к шпалам отдельным креплением марки К, сдвигался при помощи гидравлических домкратов. Сопротивление смещению определялось в 1960 г. по манометру гидравлического домкрата, а в 1961 г. – при помощи проволочных датчиков с записью осциллографом на фотобумагу. В этих опытах при смерзшемся балласте, когда рельс перемещается относительно шпал и креплений, сдвиг происходит не плавно, а скачками.

В опытах 1961 г. на Юго-Западной дороге из-за недостаточного смерзания балласта в большинстве случаев шпалы частично или полностью перемещались вместе с рельсом. Скачков же в перемещении рельса не наблюдалось.

Прямые эксперименты по определению величины зазора при изломе плети в напряженном бесстыковом пути были проведены в 1961 г. на Донецкой дороге Н.Б. Зверевым и на Юго-Западной дороге М.С. Боченковым. При распиле рельсовых плетей измерялась величина зазора и напряжения в рельсах до распила и после распила. Распилы производились в середине рельсовой плети или на таком расстоянии, где влияние концевого участка исключается.

На основании опытов по сдвигке рельсов и опытов с распилом рельсовых плетей был сделан вывод, что для расчетов величины зазора при отдельном креплении марки К принимать погонное сопротивление при смерзшемся балласте равным $r = 12...13$ кг / см на одну рельсовую нить, а при несмерзшемся балласте – $r = 4,8$ кг / см.

1.2.2. Условия устойчивости под действием продольных сил

Метод расчета условий устойчивости бесстыкового пути под действием продольных сжимающих температурных сил в рельсовых плетях, который получил применение в первые годы внедрения бесстыкового пути в СССР, был опубликован в 1950 г. К.Н. Мищенко в его монографии «Бесстыковый рельсовый путь» [33]. В отличие от подобных зарубежных методов Константин Николаевич свой метод расчета бесстыкового пути на устойчивость основал на энергетическом методе, в котором приравнивал нулю сумму элементарных работ, а не конечную сумму работ внешних и внутренних сил, как это делали О. Амман и К. Грюневальдт [34]. Метод расчета К.Н. Мищенко был основан на предпосылке, по которой рельсошпальная решетка уже потеряла состояние устойчивого равновесия под действием сжимающей силы [125].

Несколько отличающееся решение, полученное также энергетическим методом, было предложено немецким ученым А. Блохом в 1932 г. [35]. Уравнение кривой изгиба выглядит следующим образом (рисунок 1.4):

$$y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right). \quad (1.17)$$

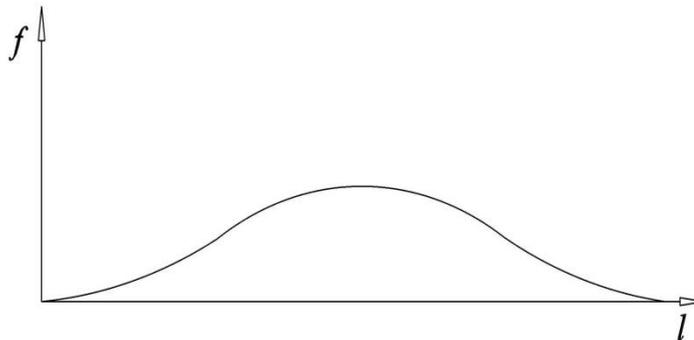


Рисунок 1.4 – Кривая изгиба

В 1932 г. [33] под руководством Т.М. Митюшина были проведены опыты в лабораторных условиях на модели, благодаря которым появился достаточный материал для решения некоторых вопросов устойчивости бесстыкового пути.

К.Н. Мищенко упоминает французского исследователя А. Мартине [36], который разработал метод решения этой же задачи путем интегрирования дифференциальных уравнений. А. Мартине решает задачу определения устойчивости бесстыкового пути без учета удлинений рельсов на примыкающих к нему прямых участках. Основные формулы А. Мартине имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} F &= 80 \frac{EJ_{\text{рш}}}{l^2} \\ f &= \frac{ql^4}{415EJ_{\text{рш}}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.18)$$

где F – продольная сила, кН;

E – модуль упругости рельсовой стали, МПа;

$J_{\text{рш}}$ – момент инерции рельсошпальной решетки, м⁴;

l – длина кривой изгиба, м;

f – стрела кривой изгиба, м;

q – погонное сопротивление сдвигу поперек оси пути, кН/м.

К.Н. Мищенко в [33] приводит пример получения этих же формул, используя энергетический метод. Решение в [33] для определения устойчивости в горизонтальной плоскости с учетом деформаций на участках, примыкающих к изогнутой части, выглядело следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{2,416}{\sqrt[4]{n}} \sqrt[4]{J_{\text{рш}} \omega E^2 q^2} \\ q &= \frac{F^2 \sqrt{n}}{5,84E \sqrt{J_{\text{рш}} \omega}} \\ l &= 19,18 \sqrt{\frac{EJ_{\text{рш}}}{F}} \\ f &= 2,88 \sqrt{\frac{nJ_{\text{рш}}}{\omega}} \end{aligned} \right\}. \quad (1.19)$$

Для кривого участка пути:

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{F^2 \sqrt{n}}{7,18E \sqrt{J_{\text{рш}} \omega}} + \frac{F}{R} \\ l &= 4\pi \sqrt{\frac{EJ_{\text{рш}}}{F}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.20)$$

где $n = 1 + \frac{L}{l}$, здесь l – длина хорды искривления;

L – длина прямолинейных участков, примыкающих к концам изогнутой части колеи, м;

$J_{рш}$ – момент инерции рельсошпальной решетки в горизонтальной плоскости, м⁴;

ω – площадь поперечного сечения двух рельсов, м²;

R – радиус кривой, м.

Оба решения – результат статического метода расчета пути на устойчивость, описывают два метода определения изгиба колеи в горизонтальной плоскости. Преимуществом энергетического метода является то, что процесс потери устойчивости пути рассматривается как единое целое в отличие от метода дифференциальных уравнений, где он разделен на части и затем эти части соединены, как у А. Мартине. По словам автора [33], недостатком решения французского исследователя является несоответствие формул действительному «выбрасыванию» пути, поэтому их можно применять только для приблизительных расчетов.

Принципиальным отличием было то, что А. Мартине определял не минимальную критическую силу при потере устойчивости рельсошпальной решетки, а соотношение параметров изогнутой оси рельсов f и l .

В [33] указывается на недостатки исследования В. Брокмана [37] и Ф. Корини [38] и невозможность их использования для расчета устойчивости. Остальные решения, приведенные в работе [33], сводятся к двум основным, описанным выше.

Подробный анализ отечественных и зарубежных исследований в области устойчивости бесстыкового пути, известных до 1962 года, был сделан С.П. Першиным в труде «Метод расчета устойчивости бесстыкового пути» [39]. Разработанный им энергетический метод отличался от метода К.Н. Мищенко тем, что был усложнен учетом переменного сопротивления перемещениям вдоль и поперек оси пути, а также учетом зависимости момента сопротивления повороту рельса относительно шпалы. Для практического применения метода С.П. Першина необходимо было иметь базу экспериментальных данных о величине $q = ay^b$, какой на тот момент не было [40]. В значительной части своей работы С.П. Першин

[39] особо остановился на анализе теории чехословацкого инженера Л. Сакмауэра, который момент сопротивления повороту шпалы относительно рельса вводил в расчет, учитывая при этом момент инерции двух рельсов. При расчете в горизонтальной плоскости он отступает от предпосылки приведения рельсошпальной решетки к сплошной балке и учитывает скручивание узлов решетки. В работе Л. Сакмауэр [41] решается задача изгиба рамы с жесткими узлами и неодинаковой жесткостью рельсов и шпал.

Известно упрощенное решение венгерского специалиста И. Немешди-Немчека [42], который пренебрегал деформацией прямолинейных участков, прилегающих к концам искривления. Путь же рассматривался им как стержень конечной длины с жесткой заделкой на концах изогнутой оси. Условия равновесия были найдены им методом дифференциальных уравнений. Подобное решение было и у французского инженера Р. Леви [43]. Исходное дифференциальное уравнение равновесия с равномерно распределенной погонной нагрузкой для сжато-изогнутых стержней имело следующий вид:

$$EIy^{IV} - Py'' + q = 0. \quad (1.21)$$

Окончательная формула предлагается для использования в расчетах устойчивости пути при его изгибе в вертикальной плоскости, она имеет следующий вид:

$$f = \frac{15,7EIq}{F^2}. \quad (1.22)$$

В работе Р. Леви [43] имеется специальная формула для расчетов в горизонтальной плоскости стержня, учитывающая опорные реакции на концах. Он рассматривает волнообразное искривление с тремя волнами относительно изогнутой оси (рисунок 1.5).

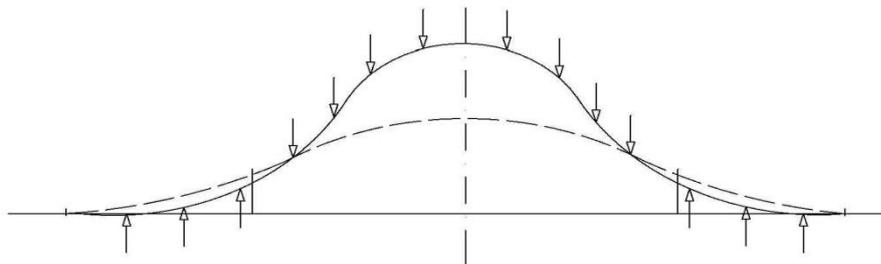


Рисунок 1.5 – Расчетная схема Р. Леви

Р. Леви решает эту задачу с учетом противодействия моментов сил, возникающих в узлах рельсошпальной решетки.

Сокращенное решение, широко применяемое в Европе, дано Г. Мейером [44]. Оно найдено по условию равновесия энергетическим методом, в котором было рассмотрено двухволновое S-образное искривление в горизонтальной плоскости. Уравнение изогнутой оси для двухволнового S-образного изгиба имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x \in \left(0, \frac{l}{3}\right) y &= \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{3\pi x}{l}\right) \\ x \in \left(\frac{l}{3}, \frac{2}{3}l\right) y &= -f \left(1 - \cos \frac{3\pi x}{l}\right) \\ x \in \left(\frac{2}{3}l, l\right) y &= -\frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{3\pi x}{l}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (1.23)$$

Такой же кривой пользовался К. Грюневальдт [45].

Простота расчетов по формулам Г. Мейера обеспечила им известность. В результате они были применены во многих странах, в том числе инженером Г. Рубином [46] для определения рациональной температуры укладки бесстыкового пути:

$$T_0 = 60 - \frac{F - G}{2\alpha E \omega}, \quad (1.24)$$

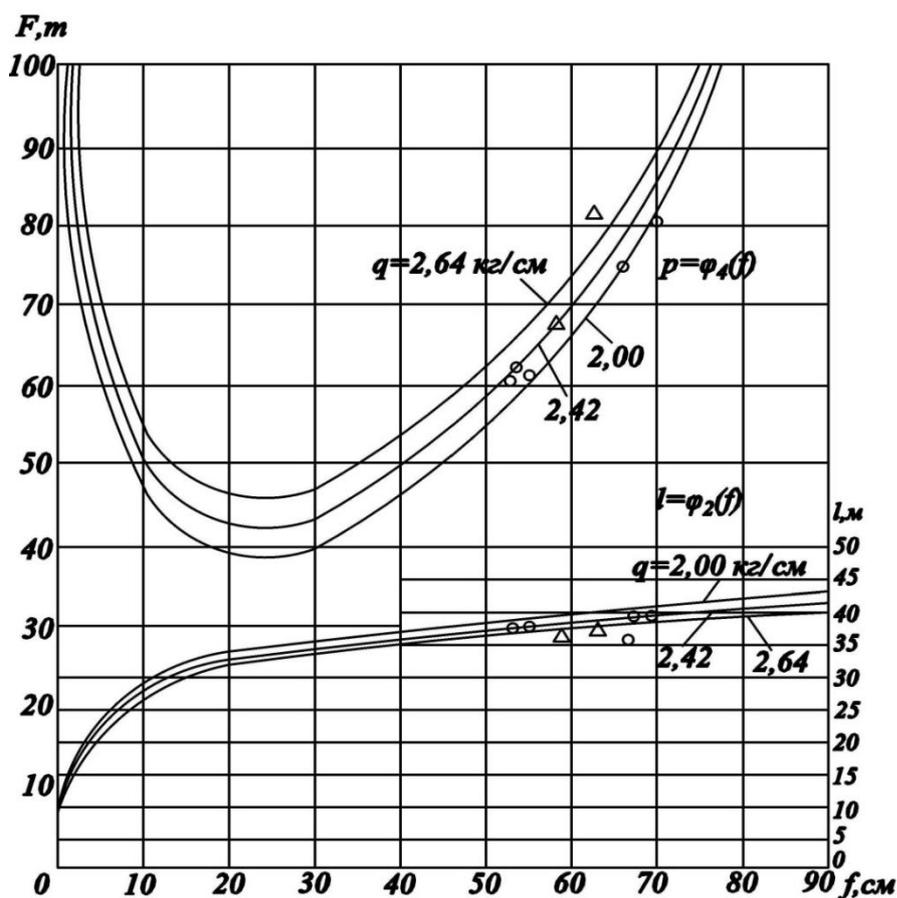
где G – сила сжатия, возникающая из-за наличия температурных допусков при укладке в пределах $G = 150 \dots 250$ кН.

В рассмотренных решениях сжимающая сила считалась приложенной центрально. Профессор Ф. Рааб в своей работе [47] рассмотрел разные случаи эксцентричного приложения сжимающей силы, деля их на внутренние и внешние, а также случаи одновременного наличия начальной стрелы изгиба f_0 и эксцентриситета сжимающей силы на концах искривления. Он основывался на предпосылке линейного закона изменения q и в качестве кривой изгиба всегда рассматривал синусоиду.

В способе нахождения условий равновесия энергетическим методом М. Нумато в [48] все кривые имеют скачкообразное изменение кривизны в начале

и в конце искривления, а также скачкообразное изменение угла наклона касательной в точках сопряжения кривых.

Решение М. Нумато отличается тем, что элементарные работы находят дифференцированием по λ , а не по f , критическую длину искривления находят из условия максимума q . При этом окончательные формулы остаются такими же, однако японским специалистом были найдены выражения для постоянных η в зависимости от распределенного момента сопротивления повороту рельса относительно шпалы m . М. Нумато при различных f построил график функции $F_0 = \varphi_4(f)$ для случая одноволнового бокового изгиба, где прямоугольниками, треугольниками и кружками показаны искусственные выбросы пути для соответствующих погонных сопротивлений среды (рисунок 1.6).



Опытные данные соответствуют
величинам погонного сопротивления:

- $q=2,42$ кг/см
- △- $q=2,64$ кг/см
- q равно еще большей, но точно не известной величине

Рисунок 1.6 – График функции $F_0 = \varphi_4(f)$ при $R = 600$ м

Венгерским ученым Э. Немешди [49] было разработано аналогичное решение. Однако для описания кривых изгиба используются не тригонометрические функции, а алгебраические многочлены. Для одностороннего искривления на прямой вместо уравнения синусоиды приводится следующая зависимость:

$$y = f \left(1 - 3 \frac{x^2}{a^2} + 3 \frac{x^4}{a^4} - \frac{x^6}{a^6} \right), \quad (1.25)$$

где $a = \frac{l}{2}$.

При исследовании устойчивости пути на кривых используются те же уравнения, но ординаты искривления отсчитываются от недеформированного положения.

Оригинальное решение по определению условий равновесия методом интегральных уравнений было предложено А.А. Кривобородовым [50], но им был рассмотрен случай потери устойчивости только в вертикальной плоскости, который, как показала практика, встречается весьма редко.

Э. Энгелем [51] были найдены решения, в которых рельсошпальная решетка имела узлы в местах соединения рельсов со шпалами и учитывались реактивные моменты. Учитывалось также и непостоянство сопротивления балласта, и принималась во внимание начальная неровность.

Оценить устойчивость бесстыкового пути с рельсами разных типов можно, пользуясь методом расчета К.Н. Мищенко [33]. По этому методу поперек оси пути можно определить величину погонного сопротивления сдвигу под действием сжимающей продольной силы, необходимого для сохранения устойчивости (1.20).

Обозначив все члены, не зависящие от типа рельсов, коэффициентами A , B и C , из (1.20) получим:

$$q = A \sqrt{\frac{\omega^3}{J_\Gamma} \left(B \sqrt{\frac{\omega^3}{J_\Gamma} + 1} \right)} + C\omega. \quad (1.26)$$

Зависимость $q(\omega, J_\Gamma)$ для разных типов рельсов – от Р38 до Р75, была опубликована в работе [52] еще в 1963 г. В [52] установлено, что с увеличением массы

рельса на 10–15 кг/м отношение $\sqrt{\frac{\omega^3}{J_\Gamma}}$ увеличивается на 8–10 %, q для прямой возрастает на 14–17 %, а для кривого участка радиусом 600 м – на 20–25 %. Автор [52] провел эксперимент, в котором рельсошпальную решетку представлял как стержень прямоугольного сечения, упирающийся концами в массивную станину и зажатый между струбцинами через стальные планки, распределявшими давление на деревянные чурки. Последние имели пазы, в которые поместили стержень и нагревали током от сварочного трансформатора. Его длина составляла 1350 мм, что с запасом превышало длину кривой изгиба при потере устойчивости, плюс примыкающие участки. При этом погонные сопротивления вдоль и поперек оси пути получались равными 7 и 5 кгс/см. С помощью этого же эксперимента оценивалось влияние формы поперечного сечения рельсов, а также площади на устойчивость пути. При подстановке в формулу К.Н. Мищенко $\omega = hb$ и $J_\Gamma = \frac{hb^3}{12}$, тогда

$\sqrt{\frac{\omega^3}{J_\Gamma}} = 2b\sqrt{3}$. При аналогичной подстановке в формулы А. Мартине получилось,

что $q = Ah\sqrt{Bh+1}$, где постоянные $A = 0,482E\alpha^2\Delta t^2$ и $B = 0,0661E(\alpha\Delta t)^{3/2}r^{-1}$, r – погонное сопротивление продольным перемещениям. Зависимость $q(h)$ означала, что погонное сопротивление, необходимое для сравнения устойчивости стержня, не зависит от размера одной стороны прямоугольного стержня. Это было подтверждено экспериментом с нагревом двух стержней сечением 20×3 мм² и $20 \times 1,5$ мм². При этом потеря устойчивости обоих произошла при одинаковой температуре, отличались только кривые изгиба: у стержня с большим сечением ее длина была в два раза больше, а стрела пропорционально меньше. На основании этих опытов был сделан вывод, что рельс должен иметь меньшую высоту для обеспечения лучшей устойчивости бесстыкового пути.

Уже упомянутый нами французский ученый А. Мартине [53] для определения F , l и f получил решение в виде двух формул. На рисунке 1.7 показаны графики этих функций.

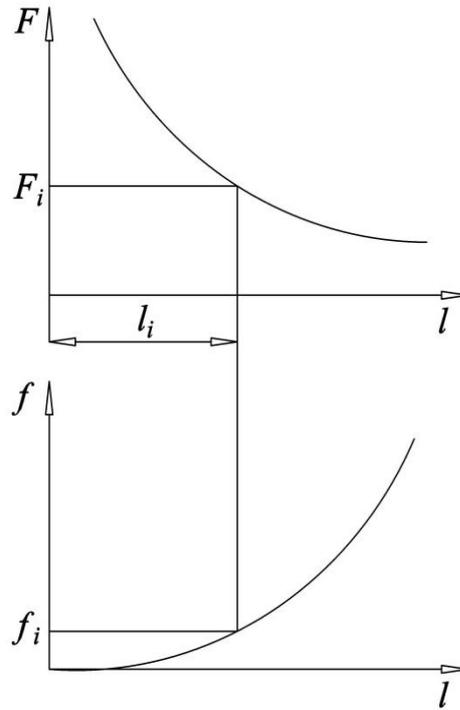


Рисунок 1.7 – График функций (1.18)

Из графика видно, что решение неоднозначное и соответствующих потере устойчивости сочетаний F , l , f бесконечное множество. Изгиб оси рельсов, точно соответствующий детерминированной зависимости (1.18), – это напряженная неровность, которая характеризует опасное место по условию устойчивости бесстыкового пути. Если продольная сила F меньше расчетной, а неровность положе, то такая неровность – ненапряженная.

После А. Мартине появились другие методы расчета, которые в итоге давали подобные формулы, отличающиеся только коэффициентами. Например, эти же формулы можно переписать в виде:

$$\left. \begin{aligned} F &= 3,9 \sqrt{\frac{EJ_{\text{рш}} q}{f}} \\ l &= 6,9^4 \sqrt{\frac{EJ_{\text{рш}} f}{q}} \end{aligned} \right\}. \quad (1.27)$$

Тогда график этих функций имеет следующий вид, представленный на рисунке 1.8.

При таком графическом изображении результатов решения удобнее было задаваться допусаемым значением стрелы f для нахождения F и l .

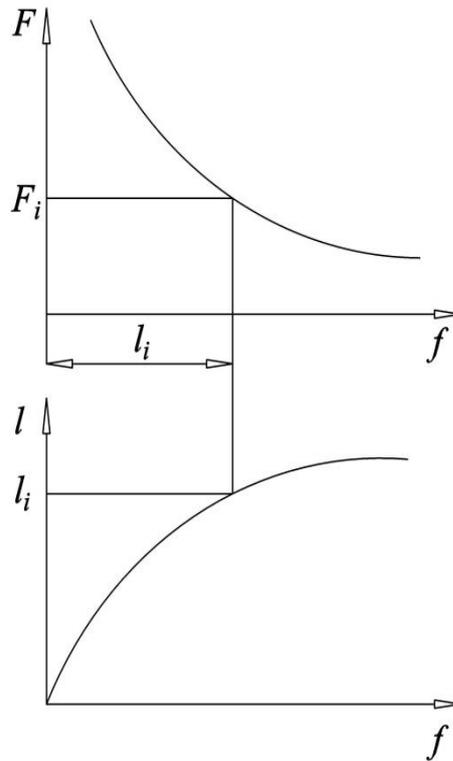


Рисунок 1.8 – График функции (1.27)

К.Н. Мищенко в СССР, М. Нумато в Японии (см. рисунок 1.6) – при решении учитывали падение продольной силы при изгибе оси рельсов. Решение в данном случае было получено однозначное, поскольку можно было найти минимум функции $F(f)$ (рисунок 1.9).

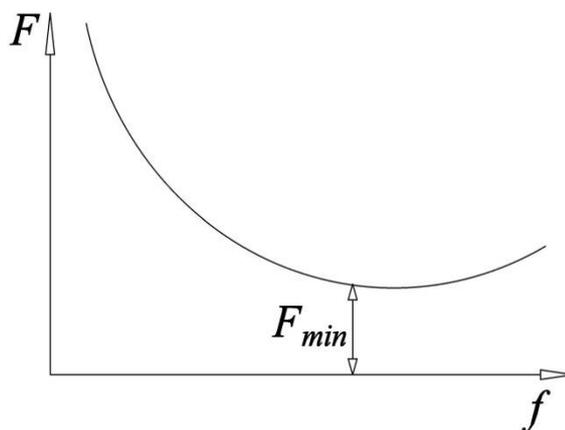


Рисунок 1.9 – График функции $F(f)$

При этом стрела оказывалась более 200 мм. При значительно меньших стрелах не могло осуществляться движение поездов.

Е.М. Бромберг [106] были предложены допускаемые стрелы изгиба в плане – 0,2 мм для прямых и 0,4 мм для кривых. Такие нереально малые значения допускаемых стрел вошли в противоречие с Инструкцией ЦП-515, в которой отступление в смежных стрелах изгиба возможно до 100 мм.

М.Ф. Вериге в своей монографии [54] нормы стрел в 0,2...0,4 мм посчитал создающими слишком большие запасы устойчивости.

При проведении опытов на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа [14] рельсы искусственно нагревались до 42 °С и в таком состоянии находились не продолжительное время. Фактически рельсы от солнца могут нагреться на 20 °С выше и сохранять такую температуру несколько часов. Опыты на кольце [14] не отражали подобные экстремальные условия. В одном из характерных опытов во время первого цикла нагрева стрела в кривом участке при $R = 600$ м увеличилась более чем на 2 мм, что превышало допускаемую норму в 0,4 мм в 5 раз. После прекращения нагрева остаточная стрела при остывании рельсов составила 0,4 мм. При втором цикле нагрева возникла стрела еще большей величины, а после завершения второго цикла образовалась остаточная стрела 0,8 мм. В следующем цикле при подогреве стрела составила 2,5 мм. Третий цикл не был завершен. В результате этих опытов был сделан вывод, что устойчивость под поездом не оказывается меньшей, чем при его отсутствии, хотя объяснить наблюдаемые процессы экспериментаторам тогда не удалось. Процессы роста стрелы при нагреве возможно объяснить, только основываясь на теории ползучести.

Одной из преград на пути расширенного применения бесстыкового пути была верхняя граница температурного интервала закрепления, определяемая условием прочности рельса. М.Ф. Вериге [55] для расширения сфер применения бесстыкового пути считал возможным увеличить Δt_y за счет более точного расчета. Это привело бы к понижению общей на сети железных дорог России температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути, что негативно повлияло бы на условия устойчивости.

1.3. Изменения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути в процессе эксплуатации

1.3.1. Изменения продольных сил и деформаций в рельсах бесстыкового пути при учете воздействия поездов

В 1967 г. А.Я. Коган в своей монографии «Продольные силы в железнодорожном пути» [56] заметил, что «корреляционная связь между погонными сопротивлениями и перемещениями в процессе эксплуатации стирается». Он также отмечает [56], что «погонные сопротивления в каждой точке плети со временем перестают зависеть от продольных перемещений рельса». Исследователь объяснял это ползучестью балласта, сдвигаемого шпалами.

В.И. Новаковичем и В.В. Ершовым были проведены эксперименты на ползучесть [57] при действии на одиночные шпалы постоянных сил, соответствующих по величине температурным продольным. Величина этих сил была соизмерима с результирующей поперечной силой, передаваемой на железобетонные шпалы в направлении поперек оси пути. При этом наблюдаются такие же относительно небольшие перемещения, как и на Экспериментальном кольце [14]. Эти сдвиги со временем накапливаются при проходе поездов и в неблагоприятных случаях могут достигнуть опасных для движения поездов значений.

Был проведен большой цикл экспериментов с одиночными шпалами, направленных на определение реологических характеристик балласта, сдвигаемого шпалами, учитывающих воздействие поездов и фактора времени [58]. К шпалам прикладывались силы постоянной величины в пределах их реальных значений. В результате этих экспериментов были определены зависимости погонных сопротивлений продольным оси пути перемещениям, и таким образом найдены значения реологических констант: коэффициент вязкости K , время релаксации n , мгновенный модуль упругости U_x . Была также определена реологическая модель, отражающая процесс деформирования балласта при сдвиге железобетонных шпал вдоль оси пути [126]. Ею оказалась модель Максвелла.

Таким образом, в упруго-вязкой среде реологической моделью бесстыкового пути является упругий стержень (рисунок 1.10).

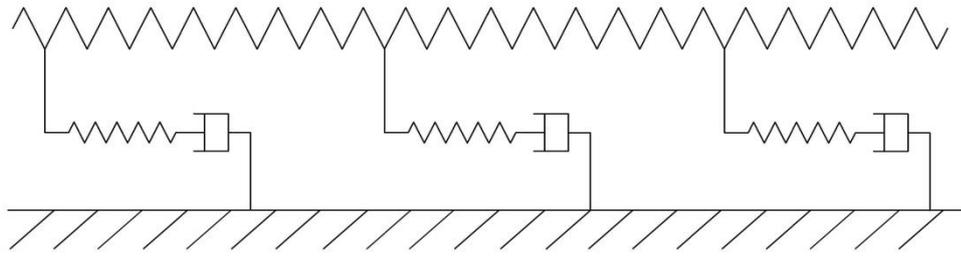


Рисунок 1.10 – Реологическая модель бесстыкового пути

Математической ее моделью является следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d^2\lambda}{dx^2} = \frac{r}{E\omega} \\ r + \frac{dr}{d\tau}n = K \frac{d\lambda}{d\tau} \end{cases} \quad (1.28)$$

При совместном решении двух уравнений (1.28) получим:

$$\frac{\partial^2\lambda}{\partial x^2} = n \frac{\partial^3\lambda}{\partial x^2 \partial \tau} - N^2 \frac{\partial \lambda}{\partial \tau}, \quad (1.29)$$

где n – время релаксации, с;

$$N = \sqrt{\frac{K}{E\omega}} \text{ – коэффициент относительной вязкости, м}^{-1}\text{с}^{1/2}.$$

Как показали расчеты [59] по (1.29) с применением численного метода по программе Maple, их результаты мало отличаются от расчетов без учета упругой части модели Максвелла только в первые часы действия продольных сил в рельсах. В дальнейшем графики зависимости $F(x, \tau)$ практически совпадают. В связи с этим в дальнейшем можно без существенных погрешностей пользоваться дифференциальными уравнениями следующего вида:

$$\frac{\partial^2\lambda}{\partial x^2} = N^2 \frac{\partial \lambda}{\partial \tau}, \quad (1.30)$$

или

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = N^2 \frac{\partial F}{\partial \tau}, \quad (1.31)$$

Сокращенный вывод уравнений (1.30) и (1.31) и их решения приведены в [60].

Здесь приведем полный вывод. Он заключается в следующей последовательности математических действий:

1) из уравнения равновесия элементарного участка рельса бесстыкового пути dx ($F + dF - F = rdx$) получаем зависимость $r = dF/dx$;

2) из закона Гука в дифференциальном виде $F = E\omega d\lambda/dx$ и

3) зависимости (закон Ньютона) $r = K d\lambda/d\tau$, из совместного решения трех представленных зависимостей получим дифференциальное уравнение (1.30).

Чтобы получить дифференциальное уравнение (1.31), необходимо продифференцировать все три зависимости следующим образом:

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial F}{\partial \tau} = E\omega \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial \tau}, \quad \frac{\partial r}{\partial x} = K \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial \tau}. \quad (1.32)$$

При совместном решении, исключая в (1.32) $\frac{\partial r}{\partial x}$ и $\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial \tau}$, получим (1.31).

В учебном пособии В.И. Новаковича [60] были описаны изменения перемещений и продольных сил в рельсовых плетях бесстыкового пути с учетом влияния фактора времени и воздействия поездов. В [60] используются методы и результаты экспериментов «на ползучесть» и «на релаксацию» для определения реологических констант с одиночными шпалами. На основании полученных эмпирических данных была найдена реологическая модель бесстыкового пути и решена задача определения деформаций и изменений продольных сил с учетом фактора времени. В результате опыта на ползучесть были определены реологические константы. Решение, так же как в статике, имеет два уравнения с тремя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} l &= 2\pi \sqrt{\frac{2EJ_{\text{рш}}}{F}} \\ f &= f_0 \exp \frac{F^2 \tau}{4EJ_{\text{рш}} \xi} \end{aligned} \right\}. \quad (1.33)$$

Решение по данной теории отличается тем, что можно задаваться не только значением начальной стрелы, но и временем, за которое стрела может увеличиться настолько, что произойдет потеря устойчивости. В данном случае потерей устойчивости считается превышение нормированной величины скорости роста стрелы. Период времени, которым при определении скорости роста стрелы изгиба рельсов в плане необходимо ограничиться, – две недели, поскольку это период между проходами путеизмерительного вагона. Полученная закономерность изменения стрелы показана на рисунке 1.11, откуда видны рост стрелы под действием сжимающей продольной силы F и ее уменьшение во времени при растягивающей продольной силе.

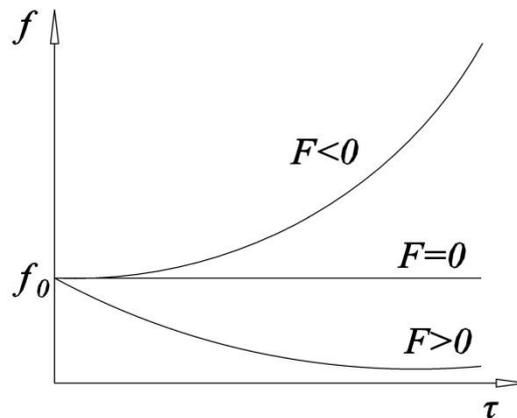


Рисунок 1.11 – Закономерность изменения стрелы f от времени τ

Из закономерности роста стрелы (1.33) следует ряд выводов. Во-первых, на скорость изменения натурального логарифма влияют три параметра рельсошпальной решетки (продольная сила, жесткость решетки и коэффициент вязкости). Во-вторых, из этой закономерности можно определить необходимый период времени между проверками состояния пути в плане. В-третьих, можно определить, какое влияние оказывают площадь и форма поперечного сечения рельса на сопротивляемость балласта. И самый главный вывод – можно определить допустимое по условию устойчивости превышение температуры рельсов по сравнению с температурой закрепления плетей.

При сравнении двух методов, используемых в расчетах бесстыкового пути: статического и учитывающего воздействие поездов, – можно определить главные

их особенности [61]. Одним из основных отличий двух методов являются предположения и допущения в расчетах к определению напряженно-деформированного состояния конструкции, прежде всего в силах сопротивления продольным горизонтальным перемещениям рельсов. При этом деформирование рельсов в обоих случаях является идеально упругим, т. е. подчиняющимся закону Гука. Сопротивления продольному сдвигу рельсов в накладках и промежуточных скреплениях, а также сдвиг шпал в балласте вдоль оси пути при статическом методе принимаются фрикционными, подчиняющимися закону Кулона.

При учете воздействия поездов сопротивления сдвигу шпал с рельсами в балласте поперек и вдоль оси пути считают вязкими (закон Ньютона – скорость деформации прямо пропорциональна силе сопротивления).

В статике, по закону Кулона, пока реактивная сила не достигнет максимальной величины, деформации равны нулю. Такие силы были определены экспериментами – на стенде и в действующем пути. Статический метод расчета сил и деформаций в рельсах бесстыкового пути применим только для случая выполнения путевых ремонтных работ в «окна». Если же по пути движется поезд, то сопротивление в стыке не может сохраниться не то что 400 кН, но даже 20 кН [62] в силу проскальзывания концов рельсов в накладках из-за ударов в стыке. Такое проскальзывание происходит под действием продольной сжимающей силы, пока торцы рельсов не упрутся друг в друга или пока под действием продольной растягивающей силы болты не начнут работать на срез. Учитывая это, даже в статическом методе расчета следует принимать стыковое сопротивление равным нулю, при расчете зазора с учетом воздействия поездов даже при нулевых температурах, т. е. еще до смерзания балласта, для предотвращения срезающих усилий болтов почти всегда требуется заменять уравнительный рельс удлиненным.

За рубежом, например во Франции, в связи с такими изменениями зазоров на концах рельсовых плетей применяли вместо уравнительных пролетов уравнительные стыки, а в Германии просто ликвидировали уравнительные пролеты термитной сваркой.

В уравнильных стыках при статическом расчете продольный ход концов ± 50 мм является вполне достаточным, в отличие от результата расчета с учетом воздействия поездов. По статическому расчету во время излома в середине плети, если учитывать реальные условия, зазор оказывается большим, чем 50 мм. При учете воздействия поездов в первые минуты излома рельсовой плети зазор относительно мал и не угрожает безопасности движения, но он растет со временем и может стать намного большим, чем найденный статическим расчетом. Температура закрепления при учете воздействия поездов имеет меньшее влияние на величину зазора.

В Технических указаниях по бесстыковому пути [63] ТУ-2000 были учтены предложения по ограничению нижней границы закрепления в зависимости от климатического района. Результаты расчета, учтенные в [63], были получены при расчете устойчивости с учетом воздействия поездов и при условии возможности выполнения путевых работ летом. Нормированный интервал закрепления в $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) достаточно узок, что ведет к ограничению возможности выполнения путевых работ и не способствует улучшению продольной устойчивости рельсошпальной решетки. Сравнение двух методов расчета по результатам определения зазоров на концах рельсовых плетей приводит к выводу о том, что применение метода, учитывающего воздействие поездов, в конечном счете, способствует более надежному обеспечению безопасности движения поездов.

Применение теории ползучести для расчетов бесстыкового пути не всегда воспринималось позитивно [65, 66]. В связи с этим в [64] авторы посчитали необходимым привести дополнительные доказательства целесообразности ее применения. В своей статье [64] они дают ответы на девять замечаний, в которых объясняют положения теории, учитывающей воздействия поездов и фактора времени. Они указывают на то, что решения дифференциального уравнения с учетом и без учета начального сопротивления дают практически одинаковые результаты, и подчеркивают, что вывод о том, будто сдвиги возникают вследствие вибрации и боковых сил, противоречит опытным графикам ВНИИЖТа, где видно прямое влияние температуры. Задача определения устойчивости с помощью теории пол-

зучести решалась в трудах академика А.Р. Ржаницына [67]; вязкие силы сопротивления балласта, так же как фрикционные, вызывают явление гистерезиса. Для определения допустимого повышения температуры (Δt_y) рельсовой плети с помощью теории ползучести достаточно прологарифмировать обе части уравнения и решить его относительно Δt_y .

Имеются две основные задачи расчета бесстыкового пути. Первая – определение величины зазора в местах излома или на концах рельсовых плетей под действием растягивающей силы. Вторая – определение условий устойчивости под действием сжимающей продольной силы [68].

Если учитывать фактор времени и воздействие поездов, то необходимо применять теорию ползучести. Из этой теории следует, что зазор на конце рельсовой плети под действием продольной растягивающей силы будет увеличиваться со временем. При решении дифференциального уравнения (1.30) М.В. Новакович [69] была получена формула для нахождения зазора при учете фактора времени:

$$\lambda_3 = \frac{\alpha (\pi E \omega \tau)^{1/2} \Delta t}{K^{1/2}}. \quad (1.34)$$

Для рельсов Р65 продольная сила на каждый градус будет изменяться на 20 кН [70]. Продольная растягивающая сила, которая может значительно превышать сжимающую, возникает в рельсах при понижении температуры рельсов по сравнению с температурой закрепления. От такой силы появляются напряжения в 200 МПа, что не превышает предел текучести. Таким образом, запас прочности для рельсов достаточно велик, в отличие от запаса устойчивости. Максимальная длина рельсовых плетей, изготавливаемых на РСП, составляла 800 м, что было обусловлено длиной плетевозного состава, затем в ТУ-79 были разрешены рельсовые плети длиной 950 м. ТУ-91 разрешали длину рельсовых плетей до блокучастка и перегона, но не менее 400 м. Применение плетей менее 400 м технически и экономически невыгодно, поскольку их трудно удержать от угона, поэтому следует увеличивать их длину контактной или термитной сваркой. В [70] предлагается прописать в ТУ необходимость при среднем и капитальном ремонтах сварки плетей протяженностью не менее перегона.

Автор статьи [70] считает необходимым пересмотреть в ТУ пункт «Соединение рельсовых плетей», потому что уравнильные пролеты не могут работать нормально без сезонной замены, и в перспективе следует эти пролеты ликвидировать сваркой. Значение нормальных зазоров не зависит от количества уравнильных рельсов, числа болтов, крутящего момента, графитовой смазки, но скорость их раскрытия во многом зависит от погонных сопротивлений продольным перемещениям и начального зазора. Таким образом, укладка рельсовых плетей и уравнильных рельсов должна производиться при достаточно высокой температуре, при этом закреплять их нужно при нулевых зазорах, чтобы по возможности исключить их последующее предельное раскрытие.

В Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути основным требованием является предотвращение продольных перемещений от температурных и динамических сил, что достигается прижатием рельсов к шпалам, контролем за угоном и нормальным общим состоянием пути [71]. В действующих нормативах сказано, что «если число уравнильных рельсов недостаточно для обеспечения прочности, нужно увеличить их число». При этом увеличивается количество стыков, но все равно окажется необходимой замена рельса на удлиненный.

1.3.2. Обеспечение условий устойчивости бесстыкового пути

М.Ф Вериге в своей статье «Динамические модели устойчивости бесстыкового пути» [72] предлагал использовать для исследования потери устойчивости бесстыкового пути две имитационные модели. Первая из них, ИМ-1, предусматривает отсутствие на участке пути поезда. Она, по его замыслу, характеризуется переходом от уравнений статики к уравнениям кинетики благодаря введению «инерционного члена», позволяющего учесть фактор времени в математическом моделировании. Вторая модель, ИМ-2, имела целью учитывать воздействие подвижного состава на путь. Использование ИМ-2 не было осуществлено, поскольку для ее применения отсутствовали необходимые экспериментальные данные о

механических характеристиках конструкции бесстыкового пути, которые были получены при движении поездов.

Н.П. Виногоров в большой статье [73], посвященной устойчивости бесстыкового пути, считает, что устойчивость рельсошпальной решетки определяется тремя основными факторами, а именно «сопротивлением балласта, сопротивлением изгибу рельсов в горизонтальной плоскости и сопротивлением повороту рельсов в узлах креплений». Продольная сжимающая сила при этом как основной фактор не упоминается. В [73] описаны опыты Е.М. Бромберга и результаты экспериментов с одиночными шпалами, проведенные В.В. Ершовым. Делается вывод о том, что для решения проблем обеспечения устойчивости необходимо дальнейшее изучение влияния подвижного состава, имеющего отступления в нормах содержания, продольных сил на путь, нарушения режимов движения и схем формирования поездов, высокочастотных вибраций пути на накопление поперечных деформаций.

В.В. Ершов провел большую серию опытов «на ползучесть» с одиночными шпалами при различной степени уплотнения балласта и при различных значениях погонного сопротивления сдвигу поперек оси пути $q = 8, 6, 4$ и 2 кН/м [74]. Это позволяет теперь проводить конкретные расчеты бесстыкового пути с учетом воздействия поездов.

Н.И. Залавский в статье «Устранить ошибки и противоречия в ТУ» [75] подчеркивает, что в ТУ-2000 [63] по условию устойчивости бесстыкового пути допускаемое превышение температуры закрепления, так же как и в предыдущих ТУ, формировалось на основании статической теории, по которой необходимо было определить критическую продольную сжимающую силу. Экспериментально устанавливалась эта сила в результате стендовых опытов с искусственным нагревом рельсов, проведенных во ВНИИЖТе в 1960–70-е годы, без учета сотрясения рельсошпальной решетки поездами, что искажало фактический процесс деформирования.

В конце 1970-х – начале 1980-х гг. были проведены опыты на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа, где участок пути между проходами поездов нагревался

электротоком большой силы. На основании экспериментов были сделаны выводы, что устойчивость под поездами не уменьшается, поэтому в нормативных документах Δt_y , найденные на основании стендовых опытов, оставили без изменений.

М.Ф. Вериге, А.Я. Коганом и Д.С. Роменом в 1972 году [76] был предложен метод определения условий устойчивости с помощью путеизмерителя по кривизне неровности при фиксированной продольной силе. Это было бы возможно, если точно знать хотя бы два из таких факторов, как F, f, l , и при точно известных постоянных, таких как q, J и конфигурации изгиба.

Стендовые опыты показали, что потеря устойчивости без воздействия поездов может произойти, но для этого нужна относительно большая продольная сила. Тогда посчитали, что под поездом устойчивость пути должна быть больше, поскольку путь пригружен вертикальными силами от поезда.

Ряд специалистов [92] утверждали, что под поездом может произойти потеря устойчивости. По оценке, данной в их исследованиях, стрела за время прохода одного поезда увеличивается на сотые, редко на десятые доли миллиметров, что не влечет за собой существенных изменений условий устойчивости. Однако эти перемещения накапливаются и в неблагоприятных случаях могут представлять опасность для движения поездов.

В.В. Ершов в своем труде «Аналитический метод определения устойчивости бесстыкового пути» [77] на основе большого количества экспериментов определил значение коэффициента вязкости и предельно допускаемые величины деформаций, при которых сохраняется устойчивость бесстыкового пути, в том числе и в период стабилизации.

В.В. Ершов посчитал, что значения Δt_y в действующих нормах для прямых имеют избыточный запас устойчивости, а для кривых значения Δt_y завышены.

Было предложено [78] установить высокую температуру закрепления рельсовых плетей по климатическим зонам с интервалом в 20 °С. Однако этот интервал был ограничен 10 °С, что, как видно, объяснялось стремлением избежать образования большого зазора при изломе в зимнее время.

Ограничением допускаемого отступления температуры рельсов от температуры закрепления выполняется задача обеспечения устойчивости бесстыкового пути при заданных условиях, которые определяются особенностями эксплуатации и конструкцией пути, в том числе при выполнении различных ремонтных работ. В связи с этим в [78] утверждается, что разработка методов расчета бесстыкового пути требует отдельного рассмотрения устойчивости пути при отсутствии поездов методами статики и с учетом их воздействия методами теории ползучести. Первый метод может быть проверен экспериментом на искусственно нагреваемом стендовом пути. Такие опыты проводились во ВНИИЖТе, в том числе при различных условиях ослабления связи рельсошпальной решетки с балластом. По результатам этих опытов были определены нормативные значения допускаемых отступлений от температуры закрепления в процессе эксплуатации и при ремонтных работах. Методика таких опытов основывалась на теории пластичности, она не учитывала фактор времени.

В опытах на стенде выброс пути происходил практически мгновенно. Считалось [73], что в нормативах, разработанных Е.М. Бромбергом, в величине допускаемого превышения температуры был заложен большой запас. Поскольку по ремонтуемому пути в «оконное» время не ходят поезда, то нет смысла настолько ужесточать нормативы введением коэффициентов запаса, чтобы в любых случаях предотвратить выброс. Во время работ в «окно» при закреплении рельсовых плетей в оптимальном температурном режиме в сторону превышения температуры закрепления относительно редко допускают отступление более чем на 20 °С, тогда если и произойдет выброс, то его возможно ликвидировать рихтовкой. Если в нормы заложить запас, то тогда усложнятся условия выполнения ремонтных работ из-за необходимости ввода температурных ограничений.

Минимально допустимая температура закрепления должна определяться, прежде всего, из условий устойчивости пути при воздействии поездов. Исходя из этих соображений нижняя граница закрепления рельсовых плетей в [78] была предложена 20...35 °С, в зависимости от климатических поясов: для Крайнего Севера не менее +20 °С, а для южных регионов – не менее +35 °С.

Главным препятствием для расширения сфер применения бесстыкового пути являлась и до сих пор в ряде случаев является [78] верхняя граница температурного интервала закрепления плетей, определяемая прочностью рельсов. Верхняя граница по условию прочности рельсов не ограничивает температуру закрепления рельсовых плетей, но ее ограничивает прочность болтов в стыках.

Применение бесстыкового пути с рельсовыми плетями длиной до перегона, а лучше более перегона (и при внедрении технологии сварки плетей со стрелочными переводами) позволяет допускать достаточно высокую температуру закрепления плетей. Из исследований [60] следует, что для расширения сфер применения бесстыкового пути и обеспечения его устойчивости необходимо допускаемое отступление от температуры закрепления в сторону повышения по условию устойчивости пути с учетом воздействия поездов определять с привлечением теории ползучести.

По результатам стендовых опытов был сделан вывод о том, что потеря устойчивости не может произойти под поездом, хотя нередко сходы происходили под движущимися поездами. Ошибочно предполагалось, что путь с рельсами типа Р75 устойчивей, чем с Р65. Однако расчеты по любой теории показали, что бесстыковой путь устойчивее с рельсами более легкого типа.

Считается также, что бесстыковой путь в кривых менее устойчив, чем в прямых. По формулам любых теорий, найденным для определения стрелы изгиба в плане и с учетом воздействия поездов, и методам статики стрела изгиба тем больше, чем меньше радиус. Однако решение с учетом радиуса и фактора времени приводит к выводу, что скорость роста стрелы не зависит от радиуса [79]. Скорость роста стрелы – это производная по времени, но в формулу, описывающую зависимость величины стрелы от деформации, радиус входит в виде постоянной величины. Отсюда сделан вывод, что устойчивость бесстыкового пути не зависит от радиуса. Значит, кривые малого радиуса могут применяться в бесстыковом пути без ограничения по минимальному радиусу вплоть до 200 м (меньшие радиусы в главном пути практически не встречаются).

Если учесть реальные сопротивления в стыках и погонные сопротивления сдвигу шпал в балласте, то неизбежно возникнет вывод о том, что при применении 25-метровых рельсов невозможно избежать торцевого давления при высоких температурах и работы стыковых болтов на срез – при низких [80]. Допустимые температурные амплитуды для 25-метровых рельсов были определены по результатам стендовых опытов: при условии отсутствия угона и при начальных зазорах, точно соответствующих температуре рельсов во время их укладки. Ни одно из этих условий фактически не может быть реально выполнено. В связи с этим следует считать, что звеньевой путь с рельсами 25-метровой длины недостаточно надежно обеспечивает безопасность движения.

В [81] исследовано влияние на устойчивость бесстыкового пути площади и формы поперечного сечения рельса. У всех исследователей для определения условий устойчивости формула сводилась к зависимости

$$F = A \sqrt{\frac{EJq}{f}}, \quad (1.35)$$

где A – числовой коэффициент, зависящий от конфигурации изгиба рельсов в плане.

Можно определить из (1.35) необходимое погонное сопротивление, препятствующее потере устойчивости, зависящее только от формы и площади поперечного сечения рельсов

$$q = C \frac{\omega^2}{J}, \quad (1.36)$$

где C – размерный коэффициент, в который вошли все факторы, влияющие на q , кроме ω^2/J .

При сравнении результатов, полученных по данной формуле, следует, что данные по статической теории расходятся с нормативами в Инструкции [82] для рельсов Р65 и Р75. Чем больше масса рельса, тем большее погонное сопротивление необходимо для сохранения устойчивости. Причина того, что для рельса Р75 в отличие от Р65 необходимо иметь значение q на 12 % больше, чем при сравнении с Р50 (5 %), в том, что на результаты расчета в большей степени влияет пло-

щадь, которая находится в числителе в квадрате, чем момент инерции сечения рельса, особенно при одинаковой ширине подошвы рельсов.

Влияние площади и формы поперечного сечения с учетом воздействия поездов оказывается таким же. Сопротивление балласта сдвигу поперек оси пути определяется по формуле

$$\xi = \frac{DF^2\tau}{EJ \ln(f/f_0)}, \quad (1.37)$$

где D – коэффициент, зависящий от конфигурации изогнутой оси рельсов.

Формула для определения формы и площади с учетом воздействия поездов будет иметь следующий вид:

$$\xi = G \frac{\omega^2}{J}, \quad (1.38)$$

где G – как и ранее, это коэффициент, в который вошли все остальные факторы кроме ω^2/J .

Поперек оси пути погонное сопротивление сдвигу рельсошпальной решетки равно $q = \xi \dot{y}$.

Концевой участок бесстыкового пути по степени опасности для движения поездов можно сравнить с опасным для плавания кораблей морским «айсбергом» [83]. Эта аналогия основана, во-первых на том, что в Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути указывалось на то, что концевой участок имеет длину 50...70 м (это видимая часть «айсберга»), а в [83] утверждается, что его длина, составляет 200...400 м и может быть еще больше (за минусом 50...70 м его невидимой части); во-вторых – именно невидимая часть «айсберга» представляет наибольшую опасность для движения поездов; в-третьих, невидимая часть «айсберга» зарождается в период длительных похолоданий, а опасной для движения поездов становится в первые дни периода потепления весной; в-четвертых, этот «айсберг» со временем тает и исчезает, но тает он не всегда достаточно быстро.

Если температура закрепления 40 °С, то при уменьшении температуры рельсов с 40 до 0 °С продольная растягивающая сила в двух плетях составит

1600 кН. Если считать, что длина концевого участка 50 и 70 м, то погонное сопротивление должно быть соответственно 32 и 23 кН/м. В этом случае зазор составит $\lambda \leq 4$ см, что в уравнительном пролете при наличии трех или четырех рельсов считается приемлемым. Однако в действительности балласт не всегда идеально уплотнен, и промежуточные скрепления прижимают рельсы к шпалам с силой меньшей, чем установлено в нормативах.

По данным ВНИИЖТа [6], сопротивления вдоль оси пути составляют 10 кН/м на две рельсовые нити. Таким образом, при статическом расчете длина концевого участка получится 160 м, а если щебень не уплотнен и шпальные ящики не полностью заполнены то $r = 2,5$ кН/м, и тогда длина концевого участка станет 640 м. В этом случае продольное перемещение составит 40 см, что можно компенсировать, лишь несколько раз заменив уравнительные рельсы на удлиненные или укороченные.

Наблюдениями на действующих участках пути И. Хошино [84] установил, что рельсовые плети длиной до 1000 м удлиняются в период весны и лета и укорачиваются осенью и зимой по всей длине. В.А. Несвит [85] в начале 70-х годов прошлого столетия провел такие же уникальные наблюдения за сезонными перемещениями сечений рельсовых плетей относительно опор контактной подвески в годовых циклах времени. В результате наблюдений за 12 плетями разной длины (от 250 до 800 м) ученый установил, что их сезонные удлинения и укорочения происходят на всем их протяжении с соответствующим изменением температуры их закрепления.

Объяснить наблюдаемые явления можно только с использованием теории ползучести, основы которой изложены в учебном пособии В.И. Новаковича [60].

На конечном участке рельсовой плети существуют три принципиально отличающиеся конфигурации эпюр продольных сил, построенных методом статики и с использованием теории ползучести [83].

Величина продольного перемещения на конце плети при учете фактора времени и воздействия поездов может быть приближенно определена по зависимости (1.34) [60].

Если концевых участков на перегоне всего два, т. е. рельсовая плеть имеет длину равную протяженности перегона, то такую работу реально можно выполнить, но если концевых участков на перегоне много, тогда перезакрепление рельсовых плетей становится невыполнимой задачей из-за большого объема работ. Чтобы минимизировать такие работы, необходимо как можно быстрее повсеместно перейти на конструкцию бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями.

Для обеспечения температурного режима работы бесстыкового пути требуется их закрепление при высокой температуре, что без применения специальных средств возможно только в летний период, поэтому часто их закрепляют при более низкой температуре, с последующим перезакреплением с помощью натяжителей или нагревателей. Величину изменений температуры закрепления лучше контролировать на 50-метровых участках. Нагрев начинают с середины плети с применением ударного разгонного устройства. При этом может быть применено и гидравлическое натяжное устройство (ГНУ), но оно само по себе может оказаться неэффективным [86]. При применении ГНУ есть возможность быстро достигнуть общего расчетного удлинения плети, но этого недостаточно, поскольку нужно, чтобы все 50-метровые части полуплети удлинились. При нагреве необходимо отрегулировать объем и скорость подачи топлива форсунками для предотвращения порчи подрельсовых прокладок. Кроме того, для увеличения коэффициента полезного действия нужно применять огнеустойчивый кожух, огибающий головку рельса, под который должны быть направлены струи пламени форсунок.

Считалось, что перезакрепление плетей с вводом в оптимальный температурный режим всегда можно выполнить с помощью ГНУ. Однако, чтобы растянуть рельсовую плеть с помощью ГНУ, требовалось устройство анкерных участков, длина которых зависит от величины погонного сопротивления, а также от разницы фактической и требуемой температур закрепления. Анкерные участки могли выдержать натяжение конца рельсовой плети при разнице температур не более 10 °С, что возможно только в летний период времени. Когда рельсовая плеть растягивалась по всей длине, анкерные участки включали в себя уравни-

тельно пролеты и возникало стыковое сопротивление. При этом стыковой зазор предельно раскрывался, а при снятии ГНУ возникала растягивающая продольная сила и болты начинали работать на срез.

В Инструкции [82] в расчетах длины анкерных участков завышены погонные сопротивления рельсошпальной решетки. В связи с этим при натяжении плети часто происходил срыв анкерного участка, что приводило к потере температуры закрепления и необходимости повторения работы с постановкой рельсовых плетей на катучие опоры. Перед применением ГНУ нужно подкрепить все стыковые болты и установить временно высокопрочные, чтобы зазоры анкерных участков оставались нулевыми. В последующем требуется заменить высокопрочные болты на обычные и уравнильные рельсы на удлиненные, поскольку в процессе эксплуатации стыковые зазоры зимой раскроются, что в конечном итоге весной может привести к потере устойчивости. Для работы с ГНУ необходимо приблизиться к погонным сопротивлениям, применяемым при расчете анкерных участков, что достаточно сложно. Таким образом перезакрепление плетей лучше осуществлять с помощью нагревательных устройств, а ГНУ применять в летний период.

Все исследователи рассматривали условия устойчивости в статике и сводили формулы к двум функциям, отличающимся постоянными коэффициентами, которые зависели от принятой конфигурации изгиба. Даже если бы эти функции были детерминированными, то решение все равно имело бы много вариантов. Попытки оценить условия устойчивости с помощью путеизмерителя [76] и путем численного интегрирования также не увенчались успехом. Пользуясь теориями упругости и пластичности, нельзя определить силы и деформации в сооружениях с учетом фактора времени.

Только теория ползучести позволяет определить напряженно-деформированное состояние бесстыкового пути с помощью реологических характеристик балласта, сдвигаемого шпалами. Среди этих констант наибольшее значение для расчетов бесстыкового пути с учетом фактора времени имеет коэффициент вязкости, определить который можно применением «опыта на ползучесть».

С помощью уравнений статики можно объяснить отличие терминов «напряженная» и «ненапряженная неровность» [87]. Неровность является «ненапряженной», если на бесстыковом пути действует продольная сжимающая сила F и имеется неровность в плане длиной l со стрелой f , а погонные сопротивления q все еще удерживают рельс от перемещения поперек оси пути. Если увеличивать продольную сжимающую силу, то, в конце концов, «ненапряженная» неровность превратится в «напряженную» и произойдет потеря устойчивости. То же самое происходит при уменьшении погонного сопротивления под движущимся поездом. Однако в данном случае перемещение на большую величину, как в статике, произойти не может, поскольку поездная вертикальная нагрузка препятствует этому. Таким образом, если по данным вагона-путеизмерителя установлено, что стрела растет во времени, значит, возникла «напряженная» неровность, и тогда может быть обнаружено опасное по условию устойчивости место.

Часто перед ремонтом требовалось перезакреплять плети на достаточно высокую температуру, а затем после работ вводить плети в установленный температурный интервал [88]. В современных нормативах большая часть требований снята благодаря внедрению плетей длиной до перегона, применению гидравлических натяжных и нагревательных устройств, высокопроизводительных выправочно-подбивочных машин и динамических стабилизаторов, а также замене щебнеочистительных машин с подрезными ножами на машины с глубокой очисткой балласта. Необходимый температурный режим работы проще всего обеспечить, если плети имеют длину равную протяженности перегона, поскольку все внимание при текущем содержании будет направлено на обеспечение нормальной работы промежуточных скреплений, при этом возникают благоприятные условия полностью исключить угон.

Разница в затратах на текущее содержание для сохранения температурного режима зависит от того, в какое время года и при какой температуре производились ремонтные работы на коротких плетях. Если температура рельсов равна или выше установленной температуры закрепления, то температурный режим не изменится. Но если путевые работы производились при температуре рельсов ниже

температуры закрепления, то плети за счет увеличения зазоров могут изменить температуру закрепления в сторону понижения. Тогда температура закрепления будет потеряна, и весной необходимо будет выполнить перезакрепление всех плетей с постановкой на катучие опоры и вводом в установленный температурный режим. На рельсовых же плетях длиной до перегона достаточно будет выполнить весеннее перезакрепление на 400-метровой длине концевых участков, примыкающих к стрелочным переводам.

Необходима методика с восстановлением плетей сваркой, обеспечивающая установленный температурный режим [89]. В нормативах написано, что сварку следует производить при температурах рельсов, не более чем на ± 5 °С отличающихся от температуры их закрепления. Если при сварке температура рельсов выходит за пределы ± 5 °С, то в этом случае должна быть произведена «разрядка температурных напряжений», т. е. «полное снятие температурных напряжений».

Если же в рельсовых плетях производится сварка при температурах, отличающихся от температуры закрепления более чем на ± 5 °С, то отступление от установленного температурного режима работы рельсовых плетей нельзя считать локальным, ибо участок, на котором нарушен этот режим, включает два примыкающих друг к другу концевых участка свариваемых рельсовых плетей, а эти концевые участки могут оказаться длиной до 400 м и более каждый. В этом случае «регулировка напряжений» невозможна, поскольку для этого понадобится раскреплять рельсовую плеть на участке длиной более километра.

Почти полвека назад для бесстыкового пути был предложен способ сварки рельсовых плетей [90], который позволяет при данном способе контактной сварки с предварительным изгибом с нагревом привариваемой части плети одновременно восстанавливать температурный режим работы бесстыкового пути. А четверть века назад был предложен способ соединения рельсовых плетей бесстыкового пути [91], который позволяет при выполнении алюминотермитной сварки с одновременным натяжением рельсовых плетей ГНУ также одновременно восстанавливать температурный режим работы бесстыкового пути. При таких способах нет необходимости производить разрядку напряжений на большом фронте работ, а глав-

ное, эти способы обеспечивают эффективное применение сверхдлинных рельсовых плетей без создания опасных отступлений от температуры закрепления в сторону понижения.

Итальянский ученый Ф. Корини [38] предлагал обеспечивать устойчивость бесстыкового пути повышением жесткости рельсошпальной решетки для сопротивления ее изгибу в горизонтальной плоскости. Однако жесткость рельсошпальной решетки не может приниматься больше жесткости двух рельсов, попытки увеличить ее с помощью увеличения жесткости промежуточных скреплений не увенчались успехом. Существовало мнение, что повысить жесткость можно за счет увеличения массы рельсов. Однако величина продольной температурной сжимающей силы в более массивных рельсах более негативно влияет на устойчивость, чем положительное влияние жесткости рельсов. К.Н. Мищенко [33] указывал, что обеспечить устойчивость можно за счет уплотнения балласта или присыпки щебнем концов шпал. Однако погонное сопротивление балласта – величина изменчивая и поэтому ненадежная для обеспечения устойчивости бесстыкового пути.

Сход подвижного состава, может произойти из-за вкатывания гребня колеса на головку рельса или из-за поперечного сдвига рельсошпальной решетки [92]. В учебнике Г.М. Шахунянца [93] отсутствовали конкретные примеры расчетов для определения той и другой причины схода, но были даны ссылки на разработчиков отечественных методов в этой области [94, 95]. Во всех материалах для решения задачи вкатывания гребня колеса на рельс использовался принцип Ж. Марье [96], суть которого в том, что безопасность против вкатывания гребня колеса на головку рельса будет обеспечена, если сумма сил в точке контакта будет такой, при которой приподнятое над рельсом колесо будет стремиться вниз.

В последующих исследованиях [97, 98] задача поперечной устойчивости рельсовой колеи против сдвига в балласте решается на основании закона Кулона. Авторы предполагают, что если силы трения станут меньше сдвигающих, то произойдет перемещение колеи, поэтому отношение боковых сил к вертикальным не должно превышать 0,4, в том числе для тяжеловесных поездов. При скоростном и тяжеловесном движении вероятность вкатывания гребня колеса на рельс возрастает.

тает, то же происходит и при экстренном торможении, смещении груза в вагоне, наличии геометрических неровностей в плане. Задача предотвращения сходов в основном решается соблюдением норм, приведенных в Инструкции ЦП-515 [99] и последующих ее уточненных вариантах [100].

Поскольку использование средних значений в расчетах не гарантирует обеспечения прочности и устойчивости конструкции, Е.М. Бромберг ввел требование периодического сезонного перезакрепления плетей с целью уменьшения продольных температурных сил в рельсе. Но это требование оказалось практически невыполнимо из-за ограниченности трудовых ресурсов на дистанциях пути.

Опыты, проведенные ВНИИЖТом на Экспериментальном кольце [14], показали, что рост стрел изгиба в плане под действием сжимающих сил отличается от стендовых опытов тем, что изгиб рельсошпальной решетки при нагреве рельсов днем происходил не резко, не за доли секунд, и составлял не десятки сантиметров, а куда меньшие значения. Другие эксперименты показали, что перемещения под действием продольных сил и сил угона также протекают под каждым поездом и составляют доли миллиметров.

Продольные силы в подвижном составе при торможении складываются, и достигают максимальной величины сразу за локомотивом в голове поезда, где чаще всего происходит вкатывание гребня колеса на головку рельса.

В работах В.О. Певзнера и Ю.С. Ромена [101] исследованы сопротивления и перемещения рельсошпальной решетки в щебеночном балласте и их влияние на расчетную модель устойчивости пути.

В работе [102] определено условие устойчивости колеи против сдвига рельсошпальной решетки, по которому рамная сила в самом неблагоприятном случае составляет 141 кН, что в два раза больше, чем в работе [101].

Статические опыты в пределах теории упругости и пластичности не могли объяснить происходящие процессы роста стрел, поскольку в них не фигурирует фактор времени, учитываемый в теории ползучести, где диссипативные силы оцениваются через вязкое трение. Таким образом, сдвиги рельсов со шпалами происходят под действием продольных и поперечных сил только под поездом во

время движения. Наиболее опасными местами железнодорожного пути являются неровности рельсовых нитей в плане, которые контролируются путеизмерителями. Однако своевременно обнаружить их и ликвидировать удастся не всегда. При расследовании обычно, судя по внешнему виду разрушений железнодорожного полотна, делают вывод о боковом сдвиге как причине схода. Но такой сдвиг в принципе невозможен [97], как и невозможен выброс под поездом. С учетом приведенных выше результатов исследований предлагалось закрепление бесстыковых плетей производить при достаточно большой температуре закрепления. А рельсовые плети применять длиной не менее протяженности перегона.

1.4. Выводы по главе 1

– Все известные статические методы расчета бесстыкового пути на устойчивость сводятся к решению двух уравнений, отличающихся только коэффициентами, зависящими от конфигурации изгиба.

– Стендовые опыты определения устойчивости бесстыкового пути под действием продольных сил не могут служить основой для нормативной базы, поскольку они не отражают реальные процессы деформирования железнодорожного пути, ввиду того что не учитывают воздействие поездов.

– Опыты, проведенные ВНИИЖТом на Экспериментальном кольце, показали, что изгиб рельсошпальной решетки при нагреве происходит медленно и составляет относительно малые значения стрел изгиба. После каждого прохода поезда максимальные поперечные перемещения рельсошпальной решетки увеличивались, а при остывании рельса уменьшались, но при этом возникали растущие остаточные деформации. В результате происходило образование остаточных стрел изгиба рельсов, превышающих ранее установленные стендовыми опытами нормативные значения в 0,2...0,4 мм.

– Исследования показали, что площадь поперечного сечения в большой степени негативно влияет на устойчивость бесстыкового пути, поэтому рекомендуются к внедрению более легкие рельсы Р58.

– Для обеспечения устойчивости пути рекомендуется внедрение сверхдлинных рельсовых плетей до длины перегона, существенно облегчающих текущее содержание бесстыкового пути.

– При сварке рельсовых плетей бесстыкового пути следует преимущественно пользоваться нагревателями, так как натяжители ГНУ имеют ограниченный диапазон применения.

– Закреплять рельсовые плети с вводом в установленный температурный режим необходимо как во время укладки бесстыкового пути, так и сразу при ликвидации нарушений целостности плети сваркой.

– Процессы роста стрел изгиба в плане нельзя объяснить с помощью известных теорий упругости и пластичности, которые не учитывают фактор времени. Эти явления могут быть объяснены только с помощью теории ползучести, учитывающей воздействие поездов.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ И ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЕ В РЕЛЬСАХ

Механико-математической моделью, отражающей основные свойства конструкции, является дифференциальное уравнение [103]. Решение дифференциального уравнения дает расчетные формулы, с помощью которых можно определить в элементах конструкции силы и деформации. В модели должны быть определены взаимные расположения элементов конструкции. Необходимо также определить механические характеристики каждого из элементов.

В бесстыковом железнодорожном пути основным элементом конструкции верхнего строения пути является рельс. Рельс считается идеально упругим, и еще считается, что он соединен со шпалами так, чтобы его перемещения вдоль и поперек оси пути были возможны только вместе со шпалами. Этим перемещениям (рельса со шпалами вдоль или поперек оси пути) сопротивляется балласт, если он несмерзшийся. При смерзшемся балласте возможно продольное перемещение рельса относительно шпал, однако сопротивления этим перемещениям в несколько раз больше (в промежуточных скреплениях), чем в несмерзшемся балласте. Практическая необходимость в расчетах бесстыкового пути на устойчивость при смерзшемся балласте отсутствует, поэтому в данной работе будем рассматривать механические характеристики щебеночного балласта в несмерзшемся состоянии.

Рельс обладает всеми тремя механическими характеристиками – упругостью, пластичностью и вязкостью [103], однако в расчетах верхнего строения пути обычно учитываются только его упругие свойства.

Балласт также имеет все три механических свойства, но в расчетах продольных сил и перемещений бесстыкового пути обычно пренебрегают его упругими свойствами, которые проявляются только при малых горизонтальных деформациях. Но пластичность или вязкость щебеночного балласта учитывается в зависимости от условий, для которых производится расчет.

2.1. Определение погонных сопротивлений сдвигу шпал в балласте поперек оси пути

Если расчет сил и деформаций в бесстыковом пути производится без учета воздействия поездов, то щебеночный балласт обычно считают пластичным и, таким образом, этот расчет выполняется с использованием теории пластичности.

Ранее, в начале XX века, когда при расчете сооружений использовалась исключительно теория упругости, т. е. все элементы конструкций подчинялись закону Гука, К. Циммерманн [104] решил задачу об устойчивости упругого стержня в упругой среде. По Циммерманну, критическая сила, при которой упругий стержень под действием продольной сжимающей силы, теряя устойчивость, изгибался, определялась по следующей формуле:

$$F_{\text{кр}} = \frac{EJ(n\pi)^2 + U_y l^4}{(n\pi l)^2}, \quad (2.1)$$

где n – число полуволин изогнутой оси стержня (рельса);

U_y – коэффициент, характеризующий модуль упругости среды, Н/м².

Формулу (2.1) С.П. Тимошенко [105] преобразовал, получив выражение для длины полуволин S :

$$S = \pi^4 \sqrt{\frac{EJ}{U_y}}, \quad (2.2)$$

тогда критическая сила

$$F_{\text{кр}} = 2\sqrt{U_y EJ}. \quad (2.3)$$

Уже по формулам (2.1)–(2.3) можно было делать некоторые практические выводы, например, чем больше U_y , т. е. сопротивление среды, в которой находится упругий стержень, тем большее число волн будет на одной и той же его длине. Или что эти волны будут более короткими и, значит, более крутыми при одинаковых продольных силах. Если $F_{\text{кр}}$ становится большой, то устойчивость можно сохранить, увеличивая U_y . Если для сохранения устойчивости упругого стержня предъявить требование к величине упругого сопротивления среды U_y , то

$$U_y > \frac{F_{\text{кр}}^2}{4EJ}. \quad (2.4)$$

Это значит, что на устойчивость упругого стержня в упругой среде критическая сжимающая продольная сила влияет значительно больше ($F_{\text{кр}}^2$), чем жесткость стержня (EJ). Если считать продольную силу температурной ($F = \alpha E \omega \Delta t$), то при сведении всех остальных членов в (2.4), кроме зависящих от площади и формы поперечного сечения упругого стержня, к постоянной величине

$$A = \frac{\alpha \Delta t E}{4} \quad (2.5)$$

получим

$$U_y = A \frac{\omega^2}{J}. \quad (2.6)$$

Если этот стержень прямоугольного сечения, т. е. $\omega = bh$ и $J = \frac{bh^3}{12}$, то из (2.6) получим:

$$U_y = 12A \frac{b}{h}. \quad (2.7)$$

Из (2.7) можно сделать вывод, относящийся к рельсовому пути: если считать балласт упругим телом и изгиб рельсошпальной решетки произойдет в горизонтальной плоскости, то потеря устойчивости тем вероятнее, чем меньше ширина подошвы рельса и чем больше его высота.

Однако щебеночный балласт имеет весьма незначительную упругость, проявляющуюся только при малых деформациях (при сдвиге шпал в горизонтальной плоскости). Как установил Е.М. Бромберг [106], эти упругие свойства можно учитывать, если сдвиг шпал составляет не более 0,2...0,4 мм. При более значительных сдвигах шпал величину сопротивления балласта принимали постоянной, т. е. считали это сопротивление фрикционным или жесткопластическим, подчиняющимся закону Кулона.

Если такое сопротивление балласта представить в виде модели, то она будет иметь вид, представленный на рисунке 2.1.

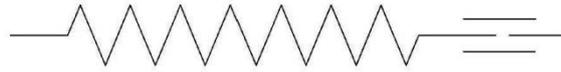


Рисунок 2.1 – Механическая модель, характеризующая упругопластические свойства балласта

Этой модели соответствует диаграмма зависимости сопротивления от величины сдвига, представленная на рисунке 2.2. Такая диаграмма $q(y)$ известна как «диаграмма Прандтля».

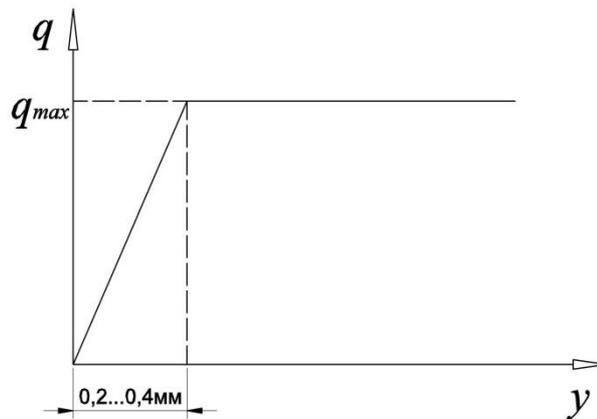


Рисунок 2.2 – Диаграмма Прандтля

При расчетах, учитывающих закономерность, представленную на рисунке 2.2, пользуются следующей аналитической зависимостью:

$$\begin{cases} q < q_{\max}, & q = U_y y \\ q \geq q_{\max}, & q = \text{const.} \end{cases} \quad (2.8)$$

В расчетах бесстыкового пути чаще пренебрегают упругой составляющей и принимают просто $q = \text{const}$.

Фактически в результате статических опытов по сдвигу шпал в балласте всегда [95] получали вид диаграммы, представленный на рисунке 2.3.

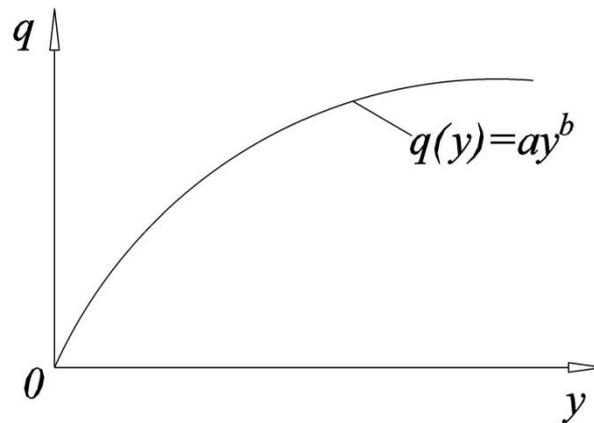


Рисунок 2.3 – Диаграмма опытной зависимости $q(y)$

Зависимость $q(y)$ обычно аппроксимируют степенной функцией вида $q = ay^b$, где a и b эмпирические коэффициенты. Иногда эту функцию аппроксимируют зависимостью вида $q = q_0 + ay^b$, где q_0 – начальное сопротивление (рисунок 2.4).

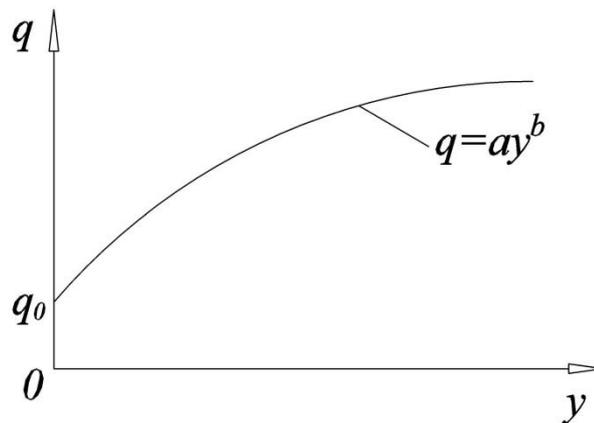


Рисунок 2.4 – Зависимость $q(y)$ с начальным сопротивлением q_0

Аналитические зависимости для $q(y)$ на рисунке 2.4 имеют следующий вид:

$$\begin{cases} q < q_0, & y = 0 \\ q \geq q_0, & q = q_0 + ay^b. \end{cases} \quad (2.9)$$

Иногда опытную степенную зависимость аппроксимируют прямой – зависимостью $q = q_0 + U_y y$. График этой зависимости представлен на рисунке 2.5.

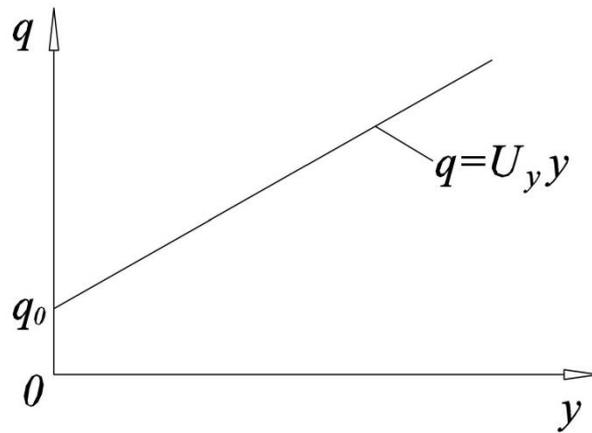


Рисунок 2.5 – Упрощенная зависимость $q = q_0 + U_y y$

Аналитическая зависимость $q(y)$ на рисунке 2.5 имеет следующий вид:

$$\begin{cases} q < q_0, y = 0 \\ q \geq q_0, y = q_0 + U_y y. \end{cases} \quad (2.10)$$

Аналитической зависимости (2.10) соответствует механическая модель, представленная ниже на рисунке 2.6.

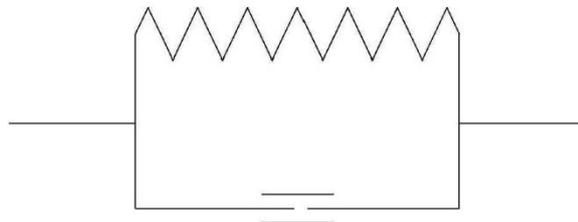


Рисунок 2.6 – Механическая модель характеризующая упругопластические свойства балласта

Здесь мы подробно остановились на статической зависимости $q(y)$ с целью отметить ее особенность в отношении наличия или отсутствия начального сопротивления q_0 . В экспериментах q_0 имеет обычно малые значения. Начальное сопротивление q_0 в экспериментах при сдвиге шпал в балласте поперек оси пути может быть принято или упругим, тогда $q_0 = U_y y$, или жесткопластическим, тогда $q_0 = \text{const}$.

В расчетах, применяемых для определения сил и деформаций в бесстыковом пути, практически почти всегда можно из-за малости q_0 принимать $q_0 = 0$. Однако из-за такого допущения у некоторых специалистов возникало мнение, что в этом случае в бесстыковом пути якобы не может быть устойчивого равновесия, поскольку тогда при любых малых силах может возникать большая деформация. Чаще всего в расчетах бесстыкового пути пользуются аппроксимацией степенной зависимости (см. рисунок 2.3) с помощью прямой, параллельной оси абсцисс

$$q = \frac{\int_0^{y_{\max}} ay^b dy}{y_{\max}} = \text{const}. \quad (2.11)$$

В статических расчетах будем пользоваться (2.11). Однако если учитывать воздействие поездов, то, как показали опыты на действующих участках железнодорожного пути [60], диссипативные силы сопротивления балласта сдвигам шпал становятся вязкими, т. е. подчиняющимися закону Ньютона $q = \xi \dot{y}$, где ξ – коэффициент вязкости $\left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}\right)$, а \dot{y} – скорость деформации $\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$.

В опытах «на ползучесть» на шпалу воздействуют силами $q = \text{const}$ и за определенное время фиксируют зависимость $y(\tau)$ [60]. При этом погонная сила сопротивления сдвигу q и деформация должны быть в пределах реальных величин.

Графики $y(\tau)$ при $q = \text{const}$ могут быть различными в зависимости от свойств материала. Последние характеризуются математической моделью, которой является соответствующее дифференциальное уравнение. Механическая или математическая модель, учитывающая фактор времени, называется реологической моделью.

В теории ползучести [67] для определения реологической модели, характеризующей механические свойства конструкции или каких-либо ее элементов, необходимо провести опыты «на ползучесть» и «на релаксацию». С помощью этих опытов определяют не только саму реологическую модель, но и реологиче-

ские константы, такие, например, как мгновенный и длительный модули упругости, время релаксации, коэффициент вязкости.

Простейшими реологическими моделями являются модель Максвелла, модель Фойгта и модель Кельвина.

Модель Максвелла отличается от статической модели, представленной на рисунке 2.1, всего лишь тем, что диссипативные силы сопротивления учитываются не жесткопластическим элементом, а вязким (рисунок 2.7).

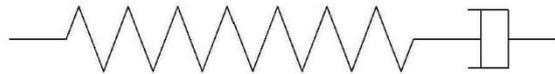


Рисунок 2.7 – Реологическая модель Максвелла

Математической моделью Максвелла является дифференциальное уравнение следующего вида:

$$q + \dot{q}m = \xi \dot{y}, \quad (2.12)$$

где m – время релаксации, с.

Если (2.12) проинтегрировать при $q = \text{const}$, то $\dot{q} = 0$ и, значит, получим:

$$y = y_0 + \frac{q}{\xi} \tau. \quad (2.13)$$

График функции (2.13) представлен на рисунке 2.8.

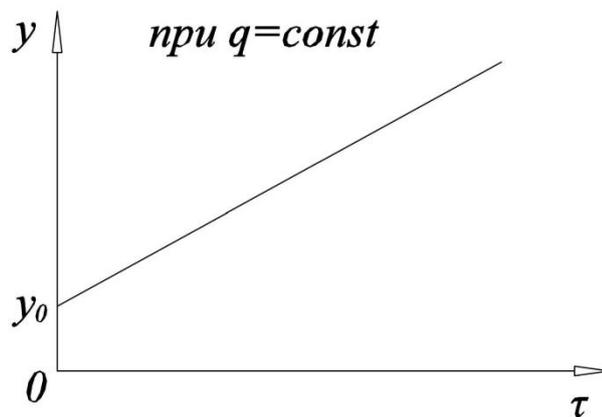


Рисунок 2.8 – График $y(\tau)$ при $q = \text{const}$, соответствующий модели Максвелла

Решение дифференциального уравнения (2.12) при $y = \text{const}$, и, значит, $\dot{y} = 0$ даст нам:

$$q = q_0 e^{-\tau/m}. \quad (2.14)$$

График функции (2.14) представлен на рисунке 2.9.

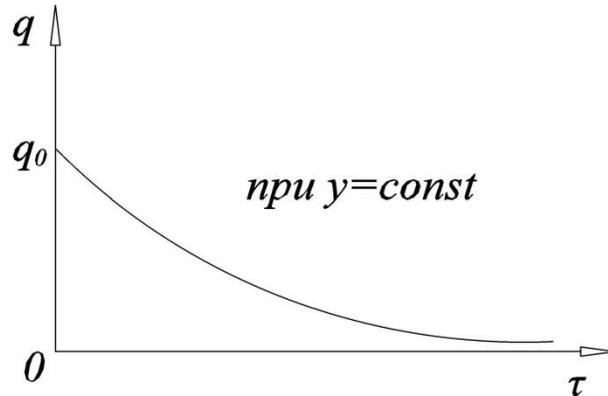


Рисунок 2.9 – График $q(\tau)$ при $y = \text{const}$, соответствующий модели Максвелла

Аналогичной механической модели, характеризующей упругопластические свойства балласта и представленной на рисунке 2.6, будет упруго-вязкая модель Фойгта, показанная на рисунке 2.10 [67].

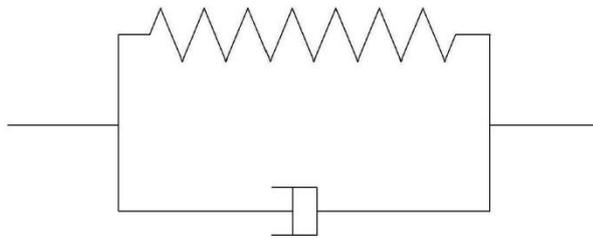


Рисунок 2.10 – Реологическая модель Фойгта

Этой модели соответствует математическая модель в виде следующего дифференциального уравнения:

$$q = \xi \dot{y} + H_y y, \quad (2.15)$$

где H_y – длительный модуль упругости при сдвиге шпалы в балласте поперек оси пути, МПа.

Решение уравнения (2.15) при $q = \text{const}$ дает:

$$y = \frac{q}{H_y} \left(1 - e^{-H\tau/\xi} \right). \quad (2.16)$$

График функции (2.16) представлен на рисунке 2.11.

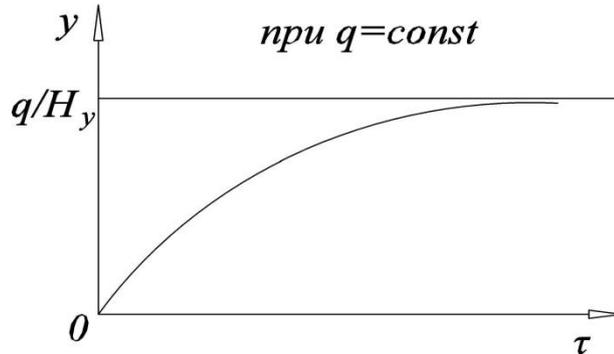


Рисунок 2.11 – График $y(\tau)$ при $q = \text{const}$, соответствующий модели Фойгта

График (см. рисунок 2.11) отличается тем, что $y(\tau)$ – это экспонента, стремящаяся к асимптоте $\frac{q}{H_y}$.

Решение (2.15) при $y = \text{const}$ получим в виде $q = H_y \lambda = \text{const}$, что свидетельствует об отсутствии релаксации (рисунок 2.12).

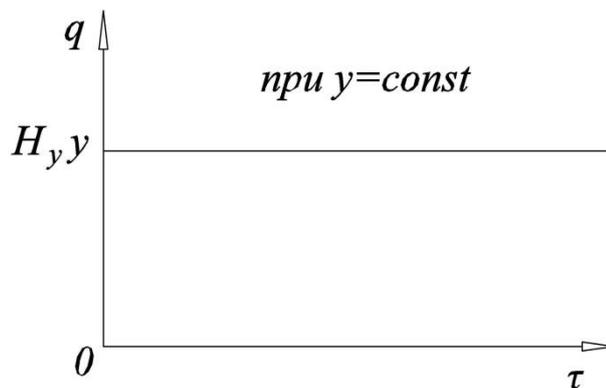


Рисунок 2.12 – График $q(\tau)$ при $y = \text{const}$, соответствующий модели Фойгта

Более общей реологической моделью, чем модели Максвелла и Фойгта, является модель Кельвина (рисунок 2.13) [67].

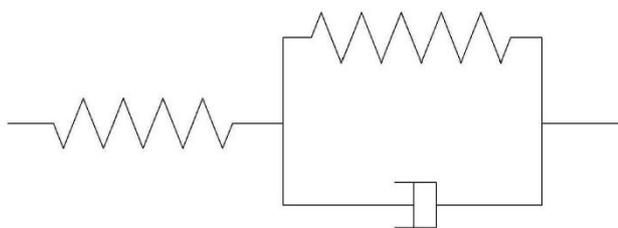


Рисунок 2.13 – Реологическая модель Кельвина

Этой модели соответствует следующее дифференциальное уравнение:

$$q + \dot{q}m = \xi \dot{y} + H_y y, \quad (2.17)$$

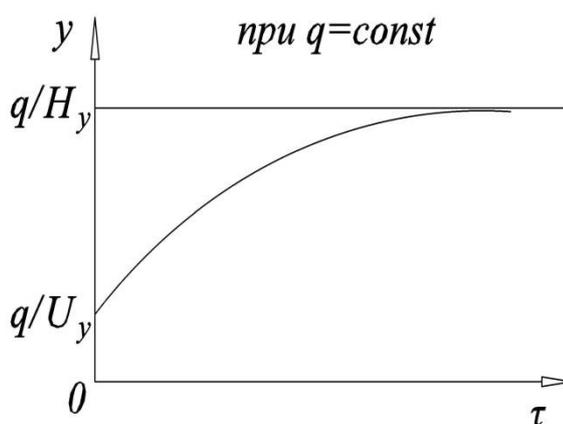
где $m = \xi/U_y$ – время релаксации, с;

U_y – мгновенный модуль упругости при сдвиге в балласте поперек оси пути.

Решение дифференциального уравнения Кельвина при $q = \text{const}$ будет:

$$y = \frac{q}{H_y} + q \left(\frac{1}{U_y} - \frac{1}{H_y} \right) e^{-H\tau/\xi}. \quad (2.18)$$

График функции (2.18) приведен ниже на рисунке 2.14.

Рисунок 2.14 – График $y(\tau)$ при $q = \text{const}$, соответствующий модели Кельвина

Решением дифференциального уравнения (2.17) при $y = \text{const}$ будет:

$$q = H_y y_0 + (U_y - H_y) y_0 e^{-\tau/m}. \quad (2.19)$$

График функции (2.19) ниже приведен на рисунке 2.15.

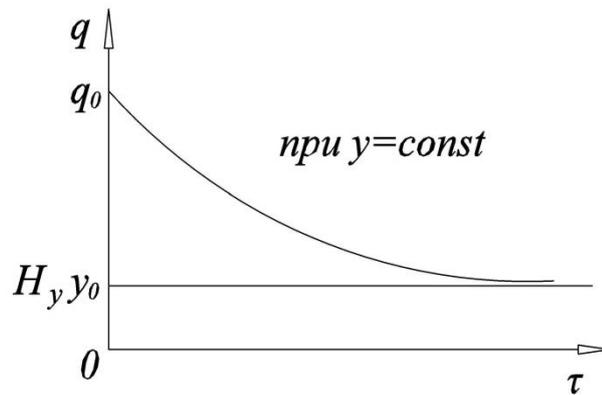


Рисунок 2.15 – График $q(\tau)$ при $y = \text{const}$, соответствующий модели Кельвина

Выражение (2.18) и соответствующий ему график отличаются тем, что экспонента $e^{-H\tau/\xi}$ стремится к асимптоте q/H_y , а начинается с точки $\tau = 0$, $y = q/U_y$.

Выражение (2.19) отличается тем, что экспонента $e^{-\tau/m}$ стремится к асимптоте $H_y y_0$, а начинается с точки $\tau = 0$, $q = q_0$.

Приведенные реологические модели Максвелла, Фойгта и Кельвина и соответствующие им решения при $q = \text{const}$ и $y = \text{const}$ являются эталонными для последующего их сравнения с фактически наблюдаемыми процессами $q(\tau)$ и $y(\tau)$, получаемыми при проведении опытов «на ползучесть» и «на релаксацию».

Выше приведенные выражения (2.13), (2.16) и (2.18) должны соответствовать фактическим результатам эксперимента «на ползучесть», а выражения (2.14) и (2.19) должны соответствовать фактическим результатам эксперимента «на релаксацию».

В.В. Ершовым [74] была проведена большая серия опытов «на ползучесть» с одиночными шпалами при различной степени уплотнения балласта (при различном объеме пропуска поездов после его разрыхления щебнеочистительными машинами) и при различных q , равных 8, 6, 4 и 2 кН/м. Эти опыты приведены нами в таблице 2.1 в несколько преобразованном виде (вместо пропущенного числа осей подвижного состава, как у В.В. Ершова, нами учитывается время, пересчитанное к грузонапряженности 40 млн ткм/км брутто одиночного пути в год), что не меняет сути процесса.

Результаты определения реологических констант по данным В.В. Ершова

Обкатка пути до приложе- ния силы (тыс. т. брутто)	q (кН/м)	За период действия сил			Коэффициент ξ		Коэффи- циент корреля- ции $r(q, \bar{y})$	Коэффициент ξ	
		q_0 (кН/м)	\bar{y} (мм)	$\bar{\dot{y}}$ (мм/тыс. т)	$\frac{\text{кН} \cdot \text{тыс. т}}{\text{м} \cdot \text{мм}}$	среднее значение		$\frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \cdot 10^8$	среднее значение
1,65	2	1,315	3,82	9,25	74,0	80,8	0,95	0,569	0,615
	4		14,04	29,90	90,0			0,695	
	6		24,74	47,80	98,0			0,754	
	8		24,30	110,20	61,0			0,469	
16,35	4	1,327	6,95	40,2	66,5	86,7	0,92	0,512	0,667
	6		10,84	45,10	103,6			0,797	
	8		12,90	73,80	90,0			0,692	
657,85	4	1,801	7,69	21,60	101,0	136,0	0,97	0,777	1,046
	6		10,46	24,80	169,0			1,300	
	8		15,63	44,50	139,0			1,069	
734,05	4	2,108	2,14	12,10	239,0	203,0	0,99	1,838	1,562
	6		2,08	24,90	196,0			1,507	
	8		8,46	41,00	168,0			1,292	

Сравнение результатов опытных данных полученных В.В. Ершовым, с приведенными выше эталонными моделями свидетельствует о том, что они в большей степени соответствуют модели Кельвина. Это следует из того, что в опытах В.В. Ершова зафиксированы начальные сопротивления q_0 , которые имеют значения в пределах от 0,1 до 1,0 кН/м. Тогда модель Фойгта не соответствует результатам экспериментов, т. к. при экспериментах было установлено, что при изменениях $q(\tau)$ $y \neq \text{const}$.

Для упрощенных расчетов можно считать, что упругий элемент параллельный вязкому, как (2.12), который есть в модели Кельвина, отсутствует. В пределах реальных деформаций с достаточной точностью можно заменить экспоненту в (2.18) прямой, не имеющей асимптоты q/H_y .

Тогда можно считать, что реологической моделью, определяющей процесс деформирования балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, является модель Максвелла.

В модели Максвелла $q_0 = U_y y_0$. Экспериментами, проведенными в РГУПС [107], было установлено, что $U_y \approx 2,25$ МПа. Это значит, что время релаксации $m = \xi / U_y \approx 0,93$ ч. По другим данным, $m \approx 0,5$ ч, оно имеет, как и другие механические характеристики балласта, большую дисперсию, однако этого времени релаксации недостаточно, чтобы существенно влиять на процессы изменения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути, определяемого без учета упругой составляющей, т. е. при допущении, что мгновенный модуль упругости U_y относительно большая величина. Это значит, что жесткость балласта по сравнению с его вязкостью при малых деформациях в начальный момент действия сил достаточно большая величина, она оказывает существенное влияние на процесс деформирования балласта, сдвигаемого шпалами, с учетом воздействия поездов только в первые часы от начала действия поперечных сил.

2.2. Вывод и решение дифференциальных уравнений, отражающих процессы деформирования рельсошпальной решетки, при знакопеременной продольной температурной силе и с учетом воздействия поездов

Моделью бесстыкового пути, как было определено выше, является упругий стержень в упруго-вязкой или идеально вязкой среде.

Расчетная схема – это упругий стержень, имеющий начальный изгиб на длине l со стрелой f_0 , на который воздействует продольная сила (со знаком «+» – растягивающая, и со знаком «-» – сжимающая). Изгибу и выпрямлению упругого стержня сопротивляется погонная распределенная сила q ; q может быть чисто вязким погонным сопротивлением ($q = \xi \dot{y}$) или упруго-вязким сопротивлением ($q = q_0 + \xi \dot{y}$), где $q_0 = U_y y_0$. Стрела не превышает 100 мм, в этом случае можем пренебречь изменением продольной силы F [39].

Расчетная схема при продольной сжимающей силе представлена на рисунке 2.16.

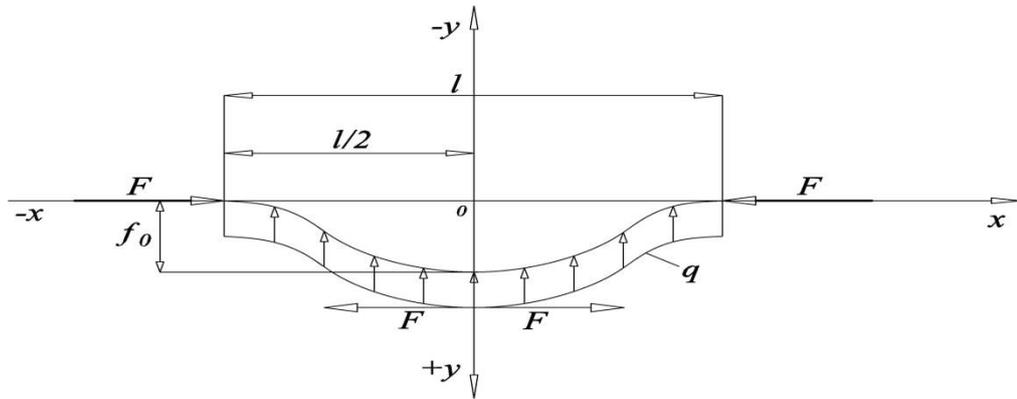


Рисунок 2.16 – Расчетная схема изгиба упругого стержня

Изгибу стержня сопротивляются внутренние силы, зависящие от максимальной кривизны изогнутой оси стержня [39]:

$$\frac{1}{\rho} = y'' = \frac{M}{EJ}. \quad (2.20)$$

Уравнением равновесия является сумма моментов, равная нулю: $\sum M_i = 0$

$$\sum M = EJy'' - Fy + \frac{qx^2}{2} = 0. \quad (2.21)$$

В (2.21) продольная сжимающая сила F является активной силой, а погонное сопротивление q и внутренние силы сопротивления изгибу упругого стержня – это реактивные силы. Краевые условия: при $x = 0$, $y = f_0$; при $x = l/2$, $y = 0$.

Для большей общности дважды дифференцируя по x (2.21) получим:

$$EJy^{IV} - Fy'' + q = 0. \quad (2.22)$$

Найдем решения дифференциального уравнения (2.22) с учетом зависимости $q = \xi \dot{y}$. Тогда начальным и краевым условиями будут: при $y(0,0) = f_0$; $y(l/2,0) = 0$.

Решение однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (2.22) может быть найдено методом Фурье, как произведение двух функций:

$$y(x, \tau) = U(x) f(\tau), \quad (2.23)$$

где $U(x)$ – функция, определяющая положение упругого стержня в двухмерном пространстве;

$f(\tau)$ – функция, представляющая изменение положения упругого стержня во времени.

Подставляя (2.23) в (2.22), получим

$$EJU^{IV}(x)f(\tau) - FU''(x)f(\tau) + \xi U(x)\dot{f}(\tau) = 0. \quad (2.24)$$

Разделяя переменные, получим:

$$EJ \frac{U^{IV}(x)}{U(x)} - F \frac{U''(x)}{U(x)} = -\xi \frac{\dot{f}(\tau)}{f(\tau)}. \quad (2.25)$$

Если обозначить левую и правую части (2.25) через $-Q$, будем иметь два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\left. \begin{aligned} EJU^{IV}(x) - FU''(x) + QU(x) &= 0 \\ \xi \dot{f}(\tau) - Qf(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.26)$$

В первом уравнении (2.26) обозначим:

$$p = F/4EJ, \quad r = Q/4EJ. \quad (2.27)$$

Тогда характеристическим уравнением будет:

$$z^4 - 4pz^2 + 4r = 0. \quad (2.28)$$

Корнями (2.28) будут:

$$z = \pm \sqrt{2} \sqrt{p \pm \sqrt{p^2 - r}}. \quad (2.29)$$

В общем случае

$$z = \pm(\alpha \pm i\beta). \quad (2.30)$$

Выраженное через гиперболические и тригонометрические функции общее решение первого дифференциального уравнения (2.26) будет:

$$U(x) = A \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x + B \operatorname{ch} \alpha x \sin \beta x + C \operatorname{sh} \alpha x \cos \beta x + D \operatorname{sh} \alpha x \sin \beta x. \quad (2.31)$$

Необходимо определить значения произвольных постоянных интегрирования методом начальных параметров.

При граничных условиях в соответствии с выбором системы координат при $x = 0$ $U(0) = A = f_0$. При $x = l/2$ $U(\pm l/2) = 0$. Тогда $B = C = D = 0$. Таким образом,

$$U(x) = A \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x. \quad (2.32)$$

Поскольку $A \operatorname{ch}(\alpha l/2) \cos(\beta l/2) = 0$, $\cos(\beta l/2) = 0$, $\beta = \frac{\pi}{l}$, то, зная β , можно найти α и r :

$$z^2 = \alpha^2 - \beta^2 \pm 2i\alpha\beta = 2\left(p + \sqrt{p^2 - r}\right) = 2p \pm 2i\sqrt{r - p^2}. \quad (2.33)$$

Приравнивая действительные и мнимые части комплексных чисел (2.33), найдем:

$$\alpha = \sqrt{\frac{F}{2EJ} + \frac{\pi^2}{l^2}}; \quad r = \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{\pi^2}{l^2}\right)^2. \quad (2.34)$$

Тогда

$$Q = 4EJr = 4EJ \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{\pi^2}{l^2}\right)^2. \quad (2.35)$$

Решением второго дифференциального уравнения (2.26) будет:

$$f(\tau) = C \exp \frac{Q\tau}{\xi}, \quad (2.36)$$

где C – константа интегрирования.

Можно принять без нарушения общности постоянную интегрирования в (2.36) равной единице.

Таким образом, общее решение имеет вид:

$$y(x, \tau) = A \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot C \exp \frac{Q\tau}{\xi}; \quad (2.37)$$

$$y(x, \tau) = A_0 \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot \exp \frac{Q\tau}{\xi}, \quad (2.38)$$

где $A_0 = AC$.

Используя начальное условие $y(0,0) = f_0$, получим $A_0 = f_0$.

Тогда

$$y(x, \tau) = f_0 \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot \exp \frac{Q\tau}{\xi}. \quad (2.39)$$

А с учетом (2.35) и (2.36) можем записать:

$$y(x, \tau) = f_0 \operatorname{ch} x \left(\sqrt{\frac{F}{2EJ} + \frac{\pi^2}{l^2}} \right) \cos \frac{\pi x}{l} \exp \left(\frac{4EJ}{\xi} \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2 \tau \right). \quad (2.40)$$

Найденное решение интересует в точке $x = 0$, где максимальная стрела изгиба рельсов в плане:

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left(\frac{4EJ}{\xi} \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2 \tau \right). \quad (2.41)$$

Если, как в [39], $l^2 = 8\pi^2 EJ/F$, что найдено по экстремуму при $\frac{df}{dl} = 0$, то

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left(\frac{4EJ}{\xi} \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{F}{8EJ} \right)^2 \tau \right);$$

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left(\frac{4EJ}{\xi} \left(\frac{F}{8EJ} \right)^2 \tau \right);$$

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left(\frac{F^2 \tau}{16EJ\xi} \right). \quad (2.42)$$

График функции (2.42) имеет вид, представленный на рисунке 2.17.

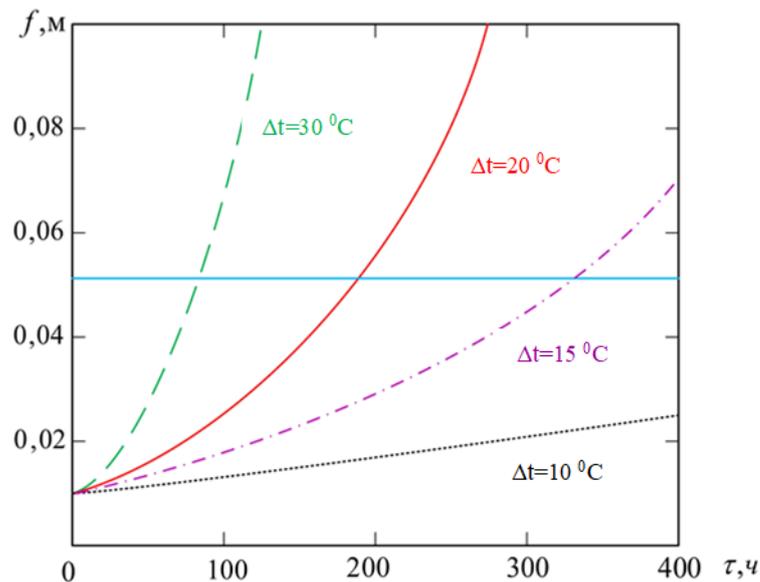


Рисунок 2.17 – Зависимость роста во времени при $\Delta t = 10, 15, 20, 30^\circ\text{C}$

При растягивающей продольной силе F соответствующая расчетная схема выпрямления упругого стержня будет иметь вид, представленный на рисунке 2.18.

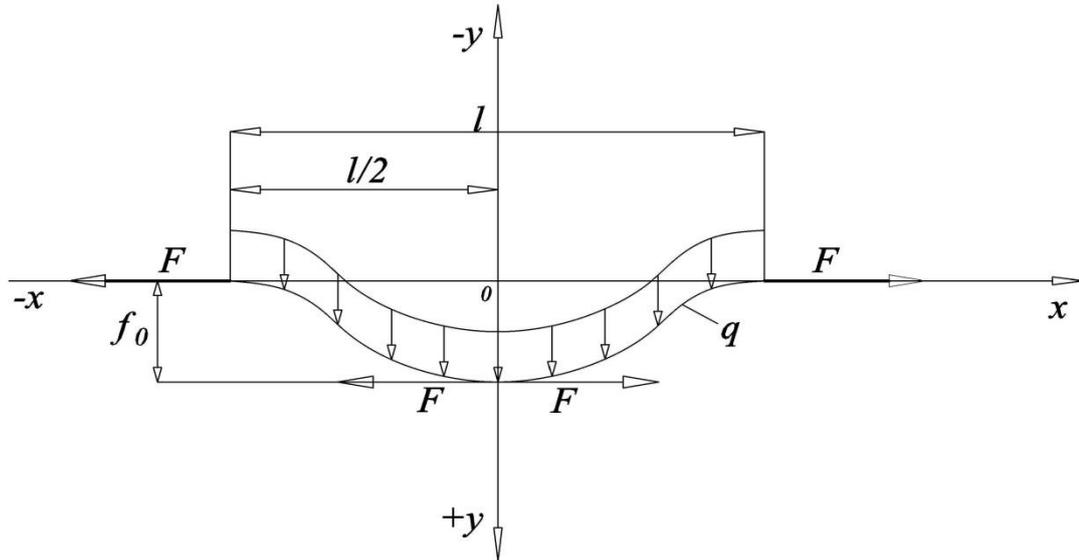


Рисунок 2.18 – Расчетная схема выпрямления упругого стержня

$$EJy'' + Fy - \frac{qx^2}{2} = 0. \quad (2.43)$$

При тех же начальных и краевых условиях, дважды дифференцируя по x (2.43), получим:

$$EJy^{IV} + Fy'' - q = 0. \quad (2.44)$$

В (2.44) продольная растягивающая сила F является активной силой, погонное сопротивление q – реактивная сила. В данном случае внутренние силы изогнутого стержня будут способствовать выпрямлению стержня, так как считаем, что стержень был изогнут в пределах упругих деформаций.

Если в рельсах действует растягивающая сила, то при начальном изгибе со стрелой f_0 будет происходить выпрямление рельсов, тогда дифференциальным уравнением, определяющим процесс выпрямления рельсов будет (2.44).

Решение (2.44) также будем искать в виде (2.23), тогда получим:

$$EJU^{IV}(x)f(\tau) + FU''(x)f(\tau) - \xi U(x)\dot{f}(\tau) = 0. \quad (2.45)$$

Разделяя переменные, имеем:

$$EJ \frac{U^{IV}(x)}{U(x)} + F \frac{U''(x)}{U(x)} = \xi \frac{\dot{f}(\tau)}{f(\tau)}. \quad (2.46)$$

Если, как и в (2.25), обозначим левую и правую части (2.46) через $-Q$, то будем иметь два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\left. \begin{aligned} EJU^{IV}(x) + FU''(x) + QU(x) &= 0 \\ \xi \dot{f}(\tau) + Qf(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.47)$$

Введя ранее принятые обозначения (2.27), получим характеристическое уравнение:

$$z^4 + 4pz^2 + 4r = 0. \quad (2.48)$$

Его корни

$$z = \pm \sqrt{2} \sqrt{-p \pm \sqrt{p^2 - r}}, \quad (2.49)$$

а в общем случае z являются комплексными числами (2.30).

Тогда общее решение первого дифференциального уравнения (2.47) запишется аналогично в виде (2.31).

Также воспользуемся теми граничными условиями, которые принимали при сжимающей силе, т. е. $A = f_0$, а $B = C = D = 0$, тогда общее решение примет вид

$$(2.32). \text{ И снова получаем } A \operatorname{ch}\left(\frac{\alpha l}{2}\right) \cos\left(\frac{\beta l}{2}\right) = 0, \text{ т. е. } \cos\left(\frac{\beta l}{2}\right) = 0, \text{ а } \beta = \frac{\pi}{l}.$$

Но в этом случае

$$z^2 = \alpha^2 - \beta^2 \pm 2i\alpha\beta = -2p \pm 2i\sqrt{r - p^2}. \quad (2.50)$$

$$\begin{cases} \alpha^2 - \beta^2 = -2p \\ 2\alpha\beta = 2\sqrt{r - p^2} \end{cases}. \quad (2.51)$$

$$\begin{cases} \alpha^2 = \beta^2 - 2p \\ \alpha = \frac{1}{\beta} \sqrt{r - p^2}; \end{cases}$$

$$\alpha^2 = \frac{\pi^2}{l^2} - \frac{F}{4EJ};$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\pi^2}{l^2} - \frac{F}{4EJ}}. \quad (2.52)$$

$$\sqrt{r - p^2} = \alpha\beta;$$

$$r - p^2 = \alpha^2\beta^2;$$

$$r = p^2 + \alpha^2\beta^2;$$

$$r = \frac{F^2}{16E^2J^2} + \left(\frac{\pi^2}{l^2} - 2\frac{F}{4EJ} \right) \frac{\pi^2}{l^2};$$

$$r = \left(\frac{F}{4EJ} \right)^2 - 2\frac{F}{4EJ} \frac{\pi^2}{l^2} + \left(\frac{\pi^2}{l^2} \right)^2;$$

$$r = \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2. \quad (2.53)$$

Так как $r = \frac{Q}{4EJ}$ (2.27), т. е. $Q = 4EJr$, получаем, что

$$Q = 4EJ \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2. \quad (2.54)$$

При $l^2 = 8\pi^2 EJ/F$

$$Q = \frac{F^2}{16EJ}. \quad (2.55)$$

Решение второго дифференциального уравнения (2.47):

$$y(\tau) = C \exp\left(-\frac{Q\tau}{\xi}\right); \quad (2.56)$$

$$y(x, \tau) = A \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot C \exp\left(-\frac{Q\tau}{\xi}\right). \quad (2.57)$$

Начальное условие $y(0,0) = f_0$, отсюда следует $A_0 = f_0$.

$$y(x, \tau) = f_0 \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot \exp\left(-\frac{Q\tau}{\xi}\right). \quad (2.58)$$

Тогда

$$y(x, \tau) = f_0 \operatorname{ch} x \left(\sqrt{\frac{\pi^2}{l^2} - \frac{F}{2EJ}} \right) \cos \frac{\pi x}{l} \exp \left(-\frac{F^2 \tau}{16EJ\xi} \right). \quad (2.59)$$

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left(-\frac{4EJ}{\xi} \left(\frac{F}{4EJ} - \frac{F}{8EJ} \right)^2 \tau \right);$$

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left(-\frac{4EJ}{\xi} \frac{F^2 \tau}{64E^2 J^2} \right).$$

Таким образом, в точке $x = 0$:

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left(-\frac{F^2 \tau}{16EJ\xi} \right). \quad (2.60)$$

Полученные решения: (2.42) для продольной сжимающей силы в рельсах при их нагреве и (2.60) для продольной растягивающей силы при охлаждении рельсов – объясняют полученные закономерности изменения стрел изгиба в опытах на экспериментальном кольце ВНИИЖТа. Рост стрелы изгиба происходит одновременно с ускорением. Расчеты по (2.60) показали, что интенсивность изменения стрелы (выпрямления рельсов) происходит с замедлением. В результате при знакопеременном суточном изменении температуры рельсов с каждым циклом происходит накопление остаточной стрелы.

Можно отметить, что изменения стрел изгиба рельсов в плане появятся при условии, что неровности в плане будут напряженными [87]. Чтобы не происходило накопление остаточной стрелы, необходимо иметь достаточно высокую температуру закрепления рельсовых плетей.

В 30-е годы прошлого столетия итальянский ученый Ф. Корини [33] указывал, что бесстыковой путь имеет «крайнюю неустойчивость» и потому при закреплении рельсовых плетей необходимо использовать их искусственный подогрев. К.Н. Мищенко, приводя в своей монографии [33] высказывания Ф. Корини, критикует их, считая необоснованными, поскольку он «не учитывает падение давления в сжатом стержне при переходе его в изогнутое положение». В этом отношении К.Н. Мищенко сам допускал существенную ошибку. В пределах стрел

изгиба рельсов в плане, которые еще не угрожают безопасности движения, падение продольной сжимающей силы пренебрежимо мало.

2.3. Решение дифференциальных уравнений с учетом начального погонного сопротивления сдвигу шпал поперек оси пути

Если учесть начальное погонное сопротивление сдвигу шпал в щебеночном балласте поперек оси пути, то необходимо вместо $q = \xi\dot{y}$ в уравнения (2.22) и (2.44) подставить $q + \dot{q}m = \xi\dot{y}$, т. е. решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} EJy^{IV} - Fy'' + q &= 0 \\ q + \dot{q}m &= \xi\dot{y} \end{aligned} \right\} \quad (2.61)$$

– это при сжимающей продольной силе и

$$\left. \begin{aligned} EJy^{IV} + Fy'' - q &= 0 \\ q + \dot{q}m &= \xi\dot{y} \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

– при растягивающей продольной силе.

Решение систем (2.61) и (2.62) возможно, если бы была известна скорость изменения погонного сопротивления \dot{q} , но поскольку ее определение экспериментом практически невозможно, то нужно исключить ее при совместной подстановке.

В результате алгебраических преобразований вместо системы уравнений (2.61) получим дифференциальное уравнение пятой степени в частных производных:

$$EJ \left(m \frac{\partial^5 y}{\partial^4 x \partial \tau} + \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right) - F \left(m \frac{\partial^3 y}{\partial^2 x \partial \tau} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \xi \frac{\partial y}{\partial \tau} = 0, \quad (2.63)$$

а вместо (2.62):

$$EJ \left(m \frac{\partial^5 y}{\partial^4 x \partial \tau} + \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right) + F \left(m \frac{\partial^3 y}{\partial^2 x \partial \tau} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \xi \frac{\partial y}{\partial \tau} = 0. \quad (2.64)$$

Решение (2.63) и (2.64) возможно численными методами с параллельным решением дифференциальных уравнений (2.22) и (2.44) при $q = \xi\dot{y}$.

Наличие начального погонного сопротивления поперечным оси пути перемещениям q_0 вызывает возникновение напряженной неровности с большей начальной стрелой f_0 , т. е. q_0 способствует под действием продольной сжимающей силы некоторому повышению устойчивости рельсошпальной решетки, однако затем кривые при $q = \xi \dot{y}$ и $q = q_0 + \xi \dot{y}$ относительно быстро сходятся. Решение с учетом q_0 для сжимающей продольной силы – это лучший для условий устойчивости вариант. Но решение с учетом q_0 для растягивающей продольной силы – это в некоторой степени худший вариант в отношении условий устойчивости, поскольку процесс выпрямления рельсошпальной решетки несколько отстает по сравнению с $q_0 = 0$. Это значит, что накопление остаточной стрелы изгиба будет происходить более интенсивно.

В принципе, в решениях с учетом q_0 и без его учета мало разницы прежде всего потому, что фактические значения погонных сопротивлений q имеют большую дисперсию, а повлиять на величину q с помощью технических средств и технологических способов производства путевых работ практически очень сложно.

Проще всего высокую устойчивость бесстыкового пути следует обеспечивать за счет достаточно высокой температуры закрепления. Тогда образование напряженных неровностей рельсов в плане практически будет исключено.

Существует ошибочное мнение, что низкую температуру закрепления можно компенсировать высоким погонным сопротивлением сдвигу шпал поперек оси пути за счет большого плеча балластной призмы, уплотнением щебня или скреплением его вяжущими материалами. Такая ошибка ведет к риску получить потерю устойчивости рельсошпальной решетки по следующим причинам. Во-первых, чем больше погонное сопротивление, тем более крутые, а значит, более опасные для движения поездов неровности рельсов в плане будут соответствовать ее напряженной конфигурации [87]. Во-вторых, во время эксплуатации неравномерность погонных сопротивлений вдоль пути по многим причинам изменяется, в том числе в сторону их уменьшения. В-третьих, погонные сопротивления сдвигу шпал поперек оси пути весьма в незначительной степени зависят от ширины балластной призмы (менее 7 %). В-четвертых, а это самое главное, даже если считать, что

высокое погонное сопротивление может обеспечить устойчивость бесстыкового пути, при его возможном во время текущего содержания пути уменьшении, не всегда и везде это уменьшение удастся вовремя заметить и при необходимости достаточно быстро увеличить.

Более действенными мерами увеличения погонного сопротивления без удорожания конструкции верхнего строения пути и без использования роли балласта, которая очень изменчива и ненадежна, было бы применение предлагаемых [108] железобетонных шпал с выступом по нижней их опорной поверхности. Применение такой шпалы сразу создает погонное сопротивление в два раза большее, чем оно есть при стандартной конструкции [109].

Еще одним весьма действенным средством повышения устойчивости бесстыкового пути было бы применение рельсов Р58 вместо Р65 [81]. Такая мера еще примерно в два раза уменьшает требуемое для обеспечения устойчивости бесстыкового пути погонное сопротивление сдвигу шпал поперек оси пути. Этот вывод следует из учета зависимости (2.6). Необходимое для сохранения устойчивости бесстыкового пути сопротивление определяется площадью и формой поперечного сечения рельса в зависимости от соотношения ω^2/J .

Применение названных мер, можно считать, полностью снимает проблему обеспечения устойчивости бесстыкового пути, но при сохранении требований по температуре закрепления рельсовых плетей в пределах «оптимальной» установленной Инструкцией № 2544 [82, 139].

2.4. Выводы по главе 2

– На основе экспериментальных данных были определены расчетная схема и математическая модель бесстыкового пути, с учетом воздействия поездов и фактора времени.

– Полученные решения для продольной сжимающей и растягивающей силы в рельсах бесстыкового пути объясняют закономерности изменения стрел изгиба и накопление остаточной стрелы в плане в процессе эксплуатации.

– Учет упругой составляющей, сопротивления балласта сдвигу железобетонных шпал, мало влияет на результат решения, поэтому в расчетах бесстыкового пути на устойчивость ее можно не учитывать.

3. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ПО УСЛОВИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ МЕСТ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ

3.1. Статический метод определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути на концевых участках рельсовых плетей при знакопеременном изменении температуры

Начиная с 1956 г. проводились опыты по укладке бесстыкового пути в различных условиях эксплуатации [110]. Так, за этот период бесстыковой путь был уложен на Московской, Белорусской, Юго-Западной, Октябрьской, Донецкой дорогах.

С 1956 г. были проведены первые опыты температурно-напряженного бесстыкового пути на б. Московско-Курско-Донбасской дороге, где были уложены две рельсовые плети длиной 711 м, сваренные электроконтактным способом из рельсов Р50. Для усиления конструкции были уложены эшпора шпал 2000 шт/км и поперечный профиль балластной призмы с валиками щебня на торцах шпал и плеч шириной 25 см (рисунок 3.1). Однако для обеспечения прочности и устойчивости пути приходилось производить сезонное снятие температурных напряжений. Для чего применялись на концах плетей уравнильные приборы.

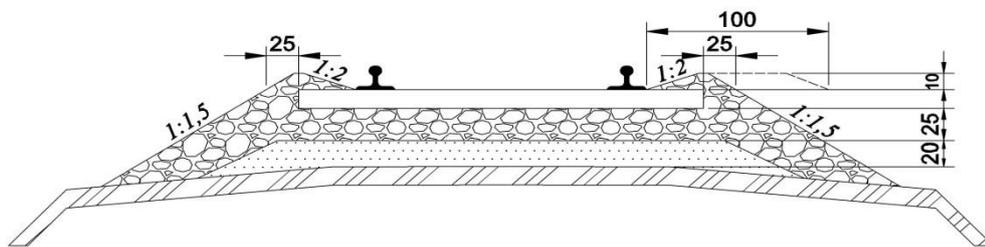


Рисунок 3.1 – Опытный поперечный профиль балластной призмы для бесстыкового пути на б. Московско-Курско-Донбасской дороге

В 1957 г. на Белорусской дороге были уложены опытные участки бесстыкового пути с рельсами Р50 на железобетонных шпалах. Здесь также была предусмотрена сезонная разрядка напряжений и применялись уравнильные приборы.

Однако, как показал опыт, вместо уравнильных приборов можно применять три уравнильных рельса.

В 1959 г. на Гатчинской дистанции Октябрьской дороги были уложены 4 плети по 800 м на железобетонных шпалах, сваренные из рельсов Р50 и соединенные уравнильными рельсами. В том же году на Донецкой дороге появился первый участок температурно-напряженного бесстыкового пути без разрядок напряжений. Он располагался на грузонапряженном электрифицированном участке. Здесь были уложены рельсовые плети длиной 800 м, сваренные из рельсов Р65, на деревянных шпалах со скреплением марки К, которые были соединены тремя уравнильными рельсами, с высокопрочными болтами.

На опытных участках лабораторией бесстыкового пути [110] применялись три вида наблюдений: 1) за температурой рельсов; 2) за продольными перемещениями пути; 3) за температурными напряжениями в рельсах.

При проведении измерений, как постоянные точки, от которых производились отсчеты, использовались опоры контактных сетей. Между реперами натягивался тонкий шнур. На наружных гранях головок рельсов делались керны, от которых производился отсчет металлической линейкой. Для определения взаимного перемещения рельсов и шпал использовались индикаторы часового типа. Продольные перемещения концов плетей определялись измерением зазоров в стыках с помощью измерительного клина.

При несмерзшемся балласте в летний период М.С. Боченковым [111] были проведены записи перемещений при прямом и обратном ходе изменения температуры. Перемещения одного конца рельсовых плетей были в виде графика, который имеет форму петли. Аналогичная закономерность была получена и при других записях. При перемещениях от 0,4 до 0,6 см сопротивления уже неупругие. Причем перемещения при первом ходе больше, чем при обратном, и их отношение в пределах 19° равно 1,7. Теоретически при неупругом сопротивлении, не зависящем от перемещения, это соотношение равно 2, а при упругом – 1.

Самописцами было зафиксировано явление, которое описывало перемещение концов плетей вдоль пути при проходе поезда. При достижении постоянной

ется балласт, и III – от температуры, при которой происходит смерзание балласта, до минимальной температуры. В первые два периода действовало летнее погонное сопротивление r , в третий период проявлялось зимнее сопротивление p .

М.С. Боченков [111] применил графический метод расчета, который основывался на построении эпюр продольных сил в рельсовой плети, где в каждом сечении рельса определялось значение продольной температурной силы.

Максимальную продольную силу при присутствии в каждом сечении рельсовой плети погонного r и стыкового сопротивления R_c можно было найти по формуле:

$$F_{\max} = R_c + rl, \quad (3.1)$$

где l – расстояние от концевого участка плети до рассматриваемого сечения, м.

На рисунке 3.3, а представлена эпюра максимальных продольных сил при наличии сопротивлений. Однако температурные силы не всегда могли преодолеть сопротивления на всей длине плети, что возникало при большой длине плети и больших сопротивлениях. Эпюра продольных температурных сил для этих условий показана на рисунке 3.3, б. В этом случае максимальная температурная сила была больше стыкового сопротивления R_c и меньше максимальных сил сопротивления $r \frac{L}{2} + R_c$.

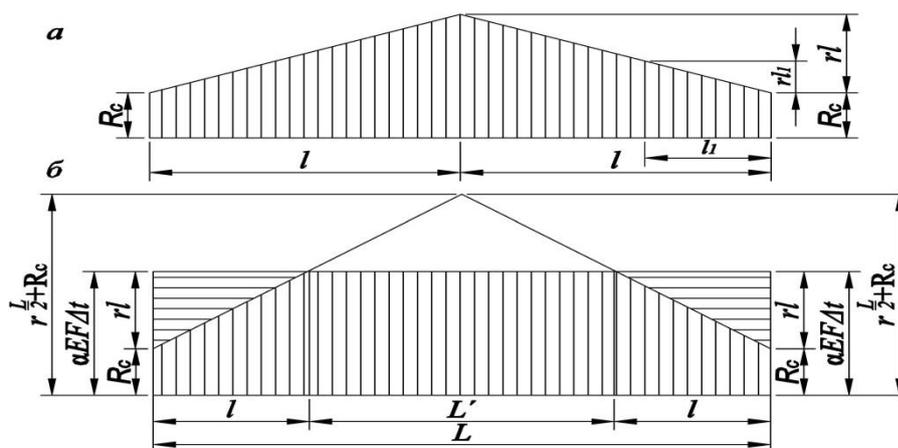


Рисунок 3.3 – Эпюры продольных сил [111]:

а – максимальных; б – в рельсовой плети большой длины

Поэтому на участке плети $L' = L - 2l$ силы сопротивления не проявлялись, а на концевых участках длиной l продольные силы были меньше максимальных температурных сил. На этих участках рельсовая плеть преодолевала сопротивление балласта, шпал и креплений и изменяла свою длину. Удлинение плети под действием температурных сил показано на эпюре горизонтальной штриховкой.

Для определения величины перемещения по эпюре продольных сил, активный участок был разделен на участки δ_i . На каждом из этих элементарных участков продольную силу можно считать величиной постоянной. Фактически же продольная сила на каждом участке меньше на величину x_i .

Сумма площадей эпюр элементарных участков была равна площади S_N эпюры продольных сил, вызывавших изменение длины всего активного участка:

$$\Delta l = \frac{S_N}{E\omega}. \quad (3.2)$$

Следовательно, для расчета перемещений и температурных напряжений рельсовой плети бесстыкового пути необходимо построить эпюру продольных сил. Измерением площади эпюры продольных сил и делением ее на жесткость рельса $E\omega$ можно определить длину плети. Можно получить изменение длины плети и из эпюры напряжений

$$\Delta l = \frac{S_\sigma}{E}, \quad (3.3)$$

где S_σ – площадь эпюры напряжений, реализовавшихся в изменение длины плети, м^2 .

Последовательное создание эпюр на основе анализа изменений продольных сил под действием температуры приведены в [111]. Увеличение температуры в середине рельсовой плети оказалось пропорциональным максимальным температурным силам. При этом на конце рельсовой плети силы сопротивления вдоль оси пути эквивалентны максимальным продольным силам.

Если температура после укладки и закрепления рельсовой плети достигла максимального значения t_{\max} , а затем понизилась, то эпюра продольных сил примет вид, показанный на рисунке 3.4, эпюра I , при наличии погонного r и стыково-

го сопротивления R_c . В случае понижения температуры на $\Delta t_{R_c} = \frac{R_c}{\alpha E \omega}$ продольная сила уменьшится на величину R_c (эпюра 2 на рисунке 3.4).

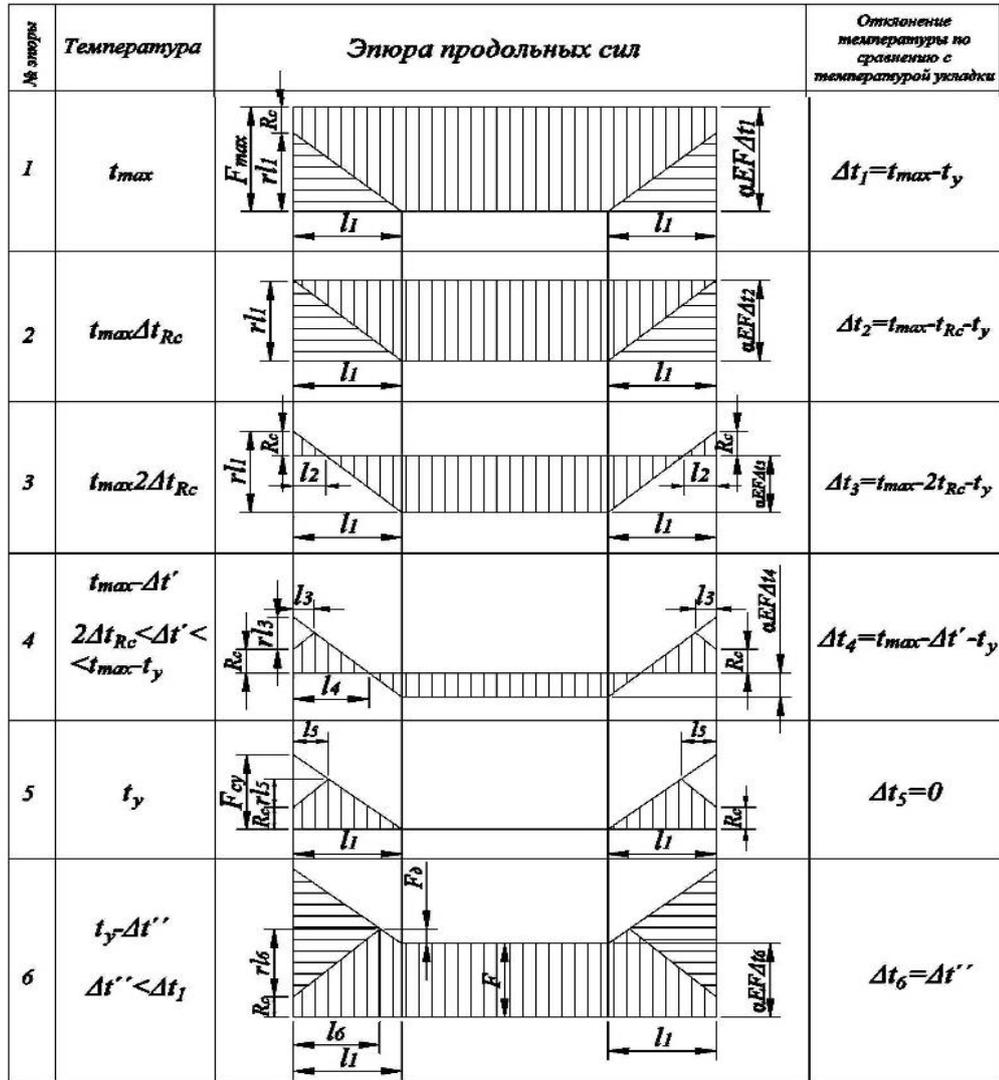


Рисунок 3.4 – Последовательные изменения эпюры продольных сил при изменении температуры, приведено в [111]

Далее при понижении температуры еще на величину $2\Delta t_{R_c}$ (эпюра 3) плет, так же как и при эпюре 2, не изменит своей длины. При этом на концевом участке длиной l_2 появятся растягивающие силы, а продольные сжимающие температурные силы уменьшаются на величину R_c .

Длина плети начнет уменьшаться, когда стыковое сопротивление будет преодолено. Эпюра 4 на участке l_3 отражает момент преодоления стыкового и погон-

ного сопротивления. В зоне активной работы действовали растягивающие силы, в зоне пассивной температурной работы имелись сжимающие напряжения.

При понижении температуры рельса до температуры закрепления продольные температурные силы равны нулю в середине плети (эпюра 5). На активных участках будут действовать продольные силы, противоположные по знаку. На чертеже (см. рисунок 3.4) видно, что максимальное значение продольной силы на расстоянии l_5 от конца плети равно половине максимальных напряжений при максимальной температуре.

Максимальные продольные силы при максимальной температуре были равны:

$$F_{oy} = 0,5F_{max}. \quad (3.4)$$

Если же температура станет ниже температуры закрепления, то в пассивной зоне возникнут растягивающие силы. Превышение температурных сил в активной зоне над температурными силами в пассивной зоне обозначено F_d (рисунок 3.4, эпюра б). Эти дополнительные продольные силы показывают переход от эпюры 5 к эпюре б.

Величина дополнительных сил равна полуразности максимальных температурных сил в предыдущем периоде и температурных сил в данный момент:

$$F_d = \frac{F_{max} - F}{2}. \quad (3.5)$$

М.С. Боченковым [111] была рассмотрена температурная работа концевого участка рельсовой плети в период оттаивания балласта. Перемещение конца плети определялось площадью треугольника, деленной на модуль упругости рельсовой стали. Наблюдалось сокращение длины плети, т. к. присутствовали растягивающие напряжения.

Другой случай уменьшения погонного сопротивления – когда температура рельсов достигла минимального значения и затем повысилась до температуры закрепления. При этом на всем протяжении плети, кроме концевого, напряжения равны нулю. Когда это не конец плети, а конец эпюры напряжений, смещение вызовет напряжение на прилегающем участке плети и перемещение произойдет не на полную величину Δl .

В общем случае, наблюдается после достижения минимума повышение температуры рельса на некоторую величину Δt , и она становится равной t'' . При этом напряжения по всей длине плети равны некоторой величине σ_1 . На концевых участках максимальные напряжения σ_2 равны полуразности максимальных зимних напряжений σ_{\max} и напряжений σ_1 , оставшихся в данный момент:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_1}{2}. \quad (3.6)$$

Графический метод расчета напряжений и температурных перемещений с учетом изменения погонного сопротивления при оттаивании и смерзании балласта, может быть использован, когда летнее погонное сопротивление принимается зависящим от величины перемещения, а также для годового цикла температурной работы плетей. В летний период времени для этого необходимо построить методом, предложенным А.Я. Коганом [32], эпюру продольных сил.

Подробному рассмотрению напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути, коротких и длинных рельсов посвящена книга немецкого профессора И. Ватманна [112], которая в переводе на русский язык В.Д. Никифоровским и А.М. Шкитиной была издана в 1959 году. Е.М. Бромберг в предисловии к книге [112] настоятельно рекомендовал «всем отечественным специалистам, так или иначе связанным с устройством, укладкой, содержанием и ремонтом бесстыкового пути, внимательно изучить этот труд и применять данные в нем рекомендации, основанные на германском опыте». На то время в Германии был накоплен наибольший опыт применения бесстыкового пути. В теоретическом осмыслении закономерностей изменений продольных сил и деформаций в бесстыковом пути германские ученые также преуспели в большей степени, чем это было в других странах.

В лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТа под руководством Е.М. Бромберга в начале 60-х годов прошлого века были проведены большие исследования, направленные на определение особенностей работы бесстыкового пути в отечественных условиях. Отечественные эксплуатационные условия работы железнодорожного пути от германских отличались главным образом высокой грузона-

пряженностью и более континентальным климатом – со значительно большей амплитудой годовых температурных колебаний. Эти обстоятельства накладывали на исследователей особую ответственность.

В сборнике трудов ВНИИЖТа [113], выпуск № 244 за 1962 год, сотрудниками лаборатории бесстыкового пути были довольно подробно изложены результаты их работы, которые позволили разработать первые в СССР постоянные Технические условия на укладку и содержание бесстыкового пути, утвержденные МПС 18.04.1962 [114].

Для данного раздела диссертации особый интерес представляют статьи А.М. Маркарьяна и Н.Б. Зверева «Соппротивление бесстыкового пути перемещениям» [115, с. 19–45], Н.Б. Зверева «Экспериментальное исследование работы бесстыкового пути» [110, с. 46–60], М.С. Боченкова «Исследование температурной работы концевых участков рельсовых плетей бесстыкового пути» [111, с. 61–96] и Н.Б. Зверева «Стыкование длинных рельсовых плетей» [116, с. 97–120].

Содержание и результаты приведенных исследований послужили фундаментальной основой для последующих нормативных документов в области бесстыкового пути: утвержденных МПС в 1969 г. [117], в 1979 г. [118], в 1991 г. [17], в 2000 г. [63] и утвержденных ОАО «РЖД» в 2012 г. [82]. Перечисленные нормативные документы в своей основе, за некоторыми исключениями, зиждутся на исследованиях, проведенных в начале 60-х годов прошлого века. В принципе эти исследования не противоречат и несущественно по своей методике отличаются от подобных исследований, проводившихся ранее и в те же годы в Германии, Франции, Голландии, Великобритании, Японии, Венгрии и других странах, а также в СССР и России в последующее полу столетие.

Практика показала, что удлинения лежащих в пути рельсов стандартной длины составляет лишь часть свободного удлинения. Было найдено, что их удлинения составляют от 40 до 60 % удлинения, подсчитанного для свободного стержня такой же длины. Позже выяснилось, что удлинение плети зависит лишь от части длины этой плети – от длины участка «дыхания», которая в разных странах составляет всего 35–160 м. Н.Б. Зверев справедливо отмечает: «До настояще-

го времени все расчетные характеристики и параметры пути определялись лишь в статических условиях». Необходимо установить влияние на эти характеристики вибрации от проходящих поездов, разработав специальную методику для определения указанного фактора. К сожалению, за свою жизнь такую методику автору [110] создать не довелось, ее пришлось разрабатывать другим, и оказалось, что, действительно, ограничиться статикой в ряде случаев нельзя. Однако, чтобы создать методику, учитывающую фактор воздействия проходящих поездов, необходимо было сначала процессы деформирования изучить с помощью статических методов. В связи с этим здесь следует более подробно остановиться на законах деформирования бесстыкового пути под действием температурных сил, возникающих в рельсовых плетях, определяемых статическими методами.

При заделанных концах упругого стержня (рельса), как и в средней части рельсовой плети (исключая концевые участки), продольные силы, если нет других внешних воздействий кроме изменяющейся температуры рельсов, изменяются в зависимости $F_t = \alpha E \omega \Delta t$. На концевых участках по законам статики равновесие с этой температурной силой определяется следующим уравнением:

$$R_c + r l_k = F_t, \quad (3.7)$$

где R_c – сопротивление в стыке, кН;

r – погонное сопротивление продольным перемещениям при $r = \text{const}$, кН/м;

l_k – длина концевого участка, м.

В рассматриваемом случае при одностороннем и разовом изменении температуры рельсов (растяжении, тогда ординаты имеют знак «+»), эпюра продольных сил выглядит так, как на рисунке 3.5.

Стыковые сопротивление зависят от силы прижатия накладок к концам рельсов стыковыми болтами. Отмечая, что при высоком стыковом сопротивлении R_c концевой участок значительно уменьшается, Н.Б. Зверев рекомендует применять нестандартные накладки и высокопрочные болты. С точки зрения статического метода расчета такой вывод абсолютно верен, и он подтвержден описанными в статье [110] лабораторными испытаниями стыков на растяжение, по которым оказалось, что $R_c = 400$ кН (40 т). Именно такую силу стыкового сопротивления берет

в расчет М.С. Боченов в статье [111]. При этой большой силе стыкового сопротивления у него в [111] при учете перемены знака продольной силы длина концевой участка оказалась равной 120 м.

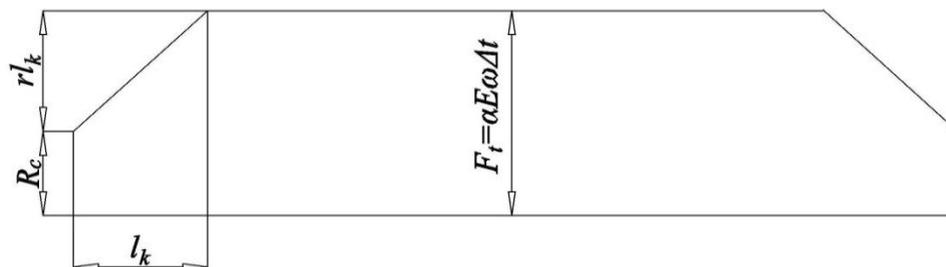


Рисунок 3.5 – Эпюра продольных сил в рельсовой плети

Что касается «сопротивления шпал повороту относительно рельса в узлах промежуточных скреплений», то далее это сопротивление авторы [113] никак в расчетах не применяют. Причин этого авторы [113] не указывают, но, по видимому, они справедливо посчитали, что этими сопротивлениями можно пренебречь, поскольку если температура закрепления в двух рельсах железнодорожной колеи не будет сильно отличаться, то эти сопротивления станут пренебрежимо малыми.

3.2. Графоаналитический метод определения изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути при знакопеременных изменениях температуры рельсов с учетом воздействия поездов

Графоаналитический способ определения изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути приходится применять на концевых участках рельсовых плетей при изменениях температуры рельса с переменной знака [127, 128, 129]. Эта необходимость связана с тем, что стыковые зазоры на концах рельсовых плетей вместе с зазорами между рельсов, уложенных в уравнительных пролетах, то полностью закрываются при повышении температуры, то максимально раскрываются при понижении температуры в сравнении с температурой закрепления. Как показали наблюдения А.С. Хадукаева [119], от полного

закрытия зазоров до их максимального раскрытия достаточно изменить температуру рельсов всего лишь на 40 °С. Это значит, что, пока зазоры свободно изменяются в пределах конструктивной их ширины, концевые участки рельсовых плетей перемещаются в продольном направлении по одному закону деформирования. Когда же зазор исчезает или максимально увеличивается, то в первом случае на концах рельсов возникает торцевое давление, а во втором случае болтовые отверстия своими краями упираются в болты. В том и другом случае концевые участки прекращают свою работу, подчиняющуюся одним законам, и начинают работать по другому закону деформирования. Одним и тем же аналитическим методом описать напряженно-деформированное состояние рельсовых плетей в пределах концевых участков невозможно [130, 138]. По существу, при предельном раскрытии или закрытии зазоров между концами смежных рельсовых плетей при дальнейшем изменении температуры бесстыковой путь станет работать, как будто концов уже не стало – они оказались ликвидированы так же, как если бы рельсы в стыках были сварены.

Графоаналитический метод приходится применять не только в вышеупомянутом случае. Этот метод оказывается необходимым и в случае знакопеременного перехода температуры рельсов через рубеж, которым является температура закрепления. Это необходимо даже в том случае, когда зазоры еще позволяют перемещаться концам рельсовых плетей. Вариант применения графоаналитического статического метода определения продольных сил и деформаций в бесстыковом пути в 1961 г. опубликовал А.Я. Коган [32]. Необходимость использования графоаналитического метода при определении напряжений и перемещений рельсов бесстыкового пути и в статике, и в динамике вызвана, прежде всего, явлением гистерезиса при учете реальной зависимости погонных сопротивлений от продольных перемещений шпал в балласте. Более точные измерения погонных сопротивлений проводили на действующих участках бесстыкового пути.

Теория, подтвержденная экспериментами и эксплуатационной практикой, показала, что рельсошпальная решетка железнодорожного пути под действием

температурных продольных сил работает как упругий стержень, находящийся в упруго-вязкой среде (в балласте) [60].

Расчеты [59], учитывающие и не учитывающие упругую составляющую сопротивления балласта продольным перемещениям, показали, что для реальных условий работы железнодорожного пути в России (при грузонапряженности более 3 млн ткм/км брутто в год) этой составляющей, вследствие ее слабого влияния на результаты, следует пренебречь. Для практических целей в расчетах достаточно считать, будто рельс (упругий стержень) находится в идеально вязкой среде.

В бесстыковом пути все сечения рельсовых плетей, за исключением их концевых участков при изменениях температуры, не имеют продольных перемещений. Но в рельсах возникают продольные температурные силы, которые определяются известным [60] выражением:

$$F_t = \alpha E \omega \Delta t, \quad (3.8)$$

где α – коэффициент температурного расширения стали, $1/^\circ\text{C}$;

E – модуль упругости рельсовой стали, МПа;

ω – площадь поперечного сечения рельсов, м^2 ;

$\Delta t = t - t_s$ – разница температуры рельсов и температуры их закрепления на подрельсовых опорах, $^\circ\text{C}$.

Если продольная сила в рельсах распределена вдоль их оси неравномерно, то в этом случае ее градиент (погонное сопротивление продольным перемещениям, r , кН/м)

$$r = \frac{dF}{dx}. \quad (3.9)$$

Это погонное сопротивление продольному сдвигу шпал в балласте. Сдвигу рельса относительно шпал сопротивляются промежуточные рельсовые скрепления, их сопротивления при нормальном состоянии примерно в два раза превышают сопротивления сдвигу шпал в балласте.

Продольная сила в рельсах бесстыкового пути по закону Гука может быть представлена следующим выражением:

$$F = E\omega \frac{d\lambda}{dx}. \quad (3.10)$$

Совместное решение (3.9) и (3.10) дает в статике дифференциальное уравнение продольных деформаций (1.28).

Если учесть влияние воздействия поездов, то из экспериментов [60], проведенных в действующем пути следует, что

$$r = K \frac{d\lambda}{d\tau}. \quad (3.11)$$

Законы изменения продольных сил и деформаций в бесстыковом пути отражаются параболическим дифференциальным уравнением второй степени в частных производных, которое известно из математической физики, как уравнение теплопроводности (1.31) [60].

Дифференцируя (3.9) и (3.11) по x , а (3.10) по τ , получим (1.31).

В середине рельсовых плетей бесстыкового пути (как упругий стержень в расчетной схеме рельсы считаются бесконечной длины $[-\infty < x < \infty]$), все решения при любом законе $\Delta t(\tau)$ сводятся к результатам, получаемым по формуле (3.8).

На концевых же участках чисто аналитическим способом определить изменения продольных сил и деформаций невозможно [131]. При знакопеременном изменении температуры рельсов, происходящем во время суточных и сезонных ее колебаний, сопротивления вязкой среды изменяются по закону гистерезиса [67].

Площадь петель гистерезиса равна работе по преодолению диссипативных сил вязкого сопротивления балласта. Силы сопротивления являются случайными, они существенно разнятся при перемене знака Δt . Большая разница в величине сопротивлений балласта происходит при его смерзании и оттаивании, меньшая, но значительная эта разница возникает при увлажнении и высыхании балласта, особенно если он загрязнен. Значительное изменение закона деформирования рельсовых плетей произойдет, если на концах плетей при их удлинении торцы рельсов упрутся друг в друга или при их укорочении зазоры предельно раскроются и стыковые болты начнут работать на срез и смятие.

В перечисленных случаях найти универсальное аналитическое решение практически невозможно. Тогда приходится обратиться к графоаналитическому методу определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути [127, 128, 129].

Наиболее типичный случай, когда требуется применение графоаналитического метода определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути. – это период перехода железнодорожного пути в осенний период в смерзшееся состояние балласта. В этом случае необходимо определить, когда начнется работа стыковых болтов на срез и смятие. Не менее важным с точки зрения обеспечения устойчивости рельсошпальной решетки периодом является время перехода железнодорожного пути весной к началу работы рельсовых плетей бесстыкового пути, когда при повышении температуры в торцах рельсов на концах возникают продольные сжимающие силы.

Рассмотрим приведенные выше два примера изменения продольных сил и перемещений на концевых участках рельсовых плетей бесстыкового пути. При этом параллельно проведем расчеты по еще применяемому статическому методу и по методу, учитывающему фактор времени и воздействия поездов. Будем рассматривать участок бесстыкового пути в пределах двух концов рельсовых плетей, между которыми уложены три уравнильных рельса по 12,5 м каждый. Температуру закрепления рельсовых плетей примем равной 35 °С. При этой температуре зазоры в стыках должны быть нулевыми.

Предположим, что осенью температура понизилась до нуля и такой остается. По статическому методу, в соответствии с действующей Инструкцией по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [82], зазоры на концах рельсовых плетей раскроются для рельсов типа Р65 на величину, определяемую по формуле:

$$\lambda_3 = \frac{\alpha^2 E \omega \Delta t^2}{r} = 0,005 \cdot (\Delta t_p - 7)^2 = 0,005 \cdot (35 - 7)^2 = 4 \text{ мм}, \quad (3.12)$$

где r – погонные сопротивления продольным перемещениям по одной рельсовой нити, кН/м.

В данном расчете по [82] предполагается, что $r = 25$ кН/м, т. е. балласт смерзшийся. Но при температуре рельсов 0 °С балласт еще не смерзся, тогда $r = 4,8$ кН/м [69] и, значит, по (3.12) $\lambda_3 = 20$ мм. Три рельса по $12,5$ м укоротятся на

$$\Delta l = \alpha 3l_{12,5}(\Delta t_p - 7 - 0,75) = 11,8 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 12,5 \cdot 10^3 \cdot 27,25 = 12 \text{ мм.}$$

Здесь учтено, что Δt уменьшается на 7 °С за счет бытового сопротивления сдвигу в стыковых накладках и на $0,75$ °С за счет погонных сопротивлений продольным перемещениям. Таким образом, при уменьшении температуры рельсов на $\Delta t_p = 35$ °С сумма четырех зазоров увеличится на $\lambda_3 = 20 \cdot 2 + 12 = 52$ мм. Далее, при уменьшении температуры при смерзшемся балласте до -40 °С зазоры увеличатся в соответствии с расчетом (3.12) еще на 5 мм на концах рельсовых плетей и на уравнильных рельсах еще на $\Delta l = 11,8 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 12,5 \cdot 10^3 \cdot 31,5 = 14$ мм. В сумме это составит $\lambda_3 = 52 + 2 \cdot 5 + 14 = 76$ мм, если эту величину поделить на четыре стыка, то ее можно считать допустимой. Однако такой расчет даже в пределах статики следует считать недостаточно реальным. Ведь в инженерных расчетах необходимо принимать реальные худшие для прочности или устойчивости условия. В приведенном расчете приняты не средние условия, а возможные лучшие.

Эпюра продольных растягивающих сил по статическому методу будет иметь вид, показанный на рисунке 3.6.

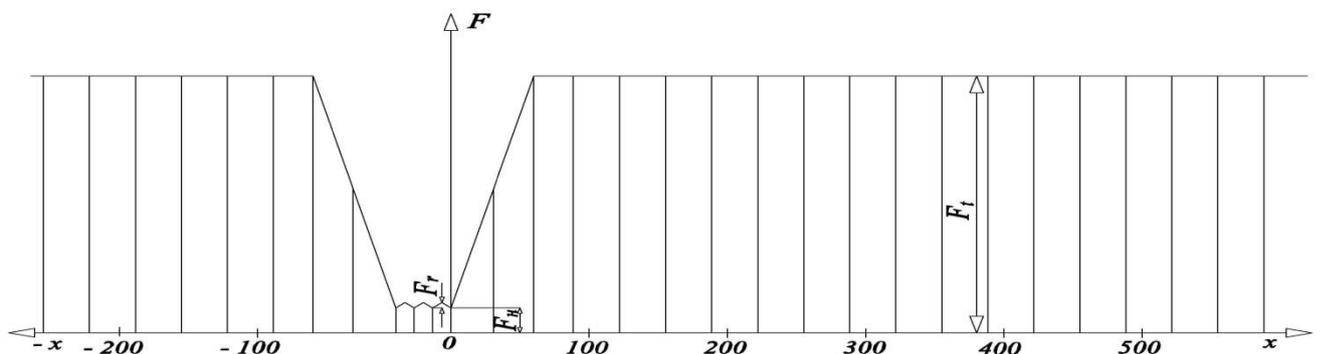


Рисунок 3.6 – Эпюра продольных растягивающих сил на уравнильных рельсах и концевых участках бесстыкового пути (статический метод)

На рисунке 3.6 F_t определяется по формуле (3.8), F_n – сопротивления продольному перемещению в стыковых накладках, $F_r = \frac{12,5 \cdot r}{2} = \frac{12,5 \cdot 4,8}{2} = 30$ кН.

Если принять в статическом расчете типичные реальные условия, когда железнодорожный путь изношен, то зазоров в уравнительном пролете не хватит. Тогда в морозные дни, а лучше еще до смерзания балласта, для недопущения разрыва стыковых болтов придется заменить уравнительные рельсы на удлиненные.

В [63] такая замена была предусмотрена, но только для железных дорог с суровым климатом, т. е. где низкие температуры зимой могут достигать -45 °С и даже -60 °С. При замене уравнительного рельса весной, при повышении температуры, для обеспечения устойчивости бесстыкового пути следует немедленно заменить удлиненные рельсы на прежние. Если такая работа будет требоваться сразу во многих местах, то ее осуществить будет проблематично из-за большого объема срочных трудовых затрат.

Решим ту же задачу с учетом фактора времени и воздействия поездов (рисунок 3.7). В этом случае эпюра продольных сил при одной и той же температуре рельсов в разное время будет разной. Рассмотрим эпюры продольных сил в пределах четырех этапов: 1-я эпюра – начало осеннего понижения температуры рельсов от 35 до 0 °С; 2-я эпюра – конец этого этапа; 3-я эпюра – продолжение работы при температуре рельсов 0 °С, но при уже предельно раскрытых стыковых зазорах; 4-я эпюра – при замене уравнительных рельсов на удлиненные.

Эпюра продольных сил в середине рельсовой плети, определяется зависимостью (3.8). На концевом участке (справа от нуля и слева – аналогично) эпюра для 1 и 2 определяется выражением, найденным при решении дифференциального уравнения (1.31) при следующих граничных и начальных условиях:

$$F|_{x=0} = 0, F|_{x=\infty} = F_t. \quad (3.13)$$

Эпюра продольной силы для этапов 1 и 2 имеет следующий вид:

$$F(x, \tau) = \frac{NF_t}{2\sqrt{\pi\tau}} \int_0^\infty \left\{ \exp\left[-\frac{N^2(x-\xi)}{4\tau}\right] - \exp\left[-\frac{N^2(x+\xi)}{4\tau}\right] \right\} d\xi. \quad (3.14)$$

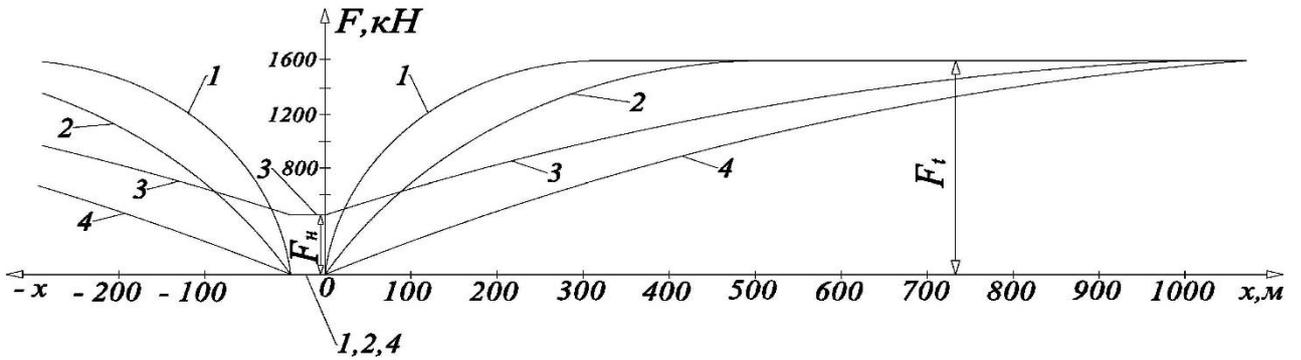


Рисунок 3.7 – Эпюры продольных растягивающих сил в уравнительном пролете и на концевых участках бесстыкового пути (с учетом воздействия поездов и фактора времени):

1, 2, 3, 4 – эпюры на разных этапах рассмотренных случаев при низких температурах рельсов

Обозначив $\frac{N(x-\xi)}{2\sqrt{\tau}} = z$ и имея в виду, что для функции

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-z^2} dz, \quad (3.15)$$

называемой интегралом вероятности или функцией ошибок Гаусса, составлены таблицы $\operatorname{erf}(z)$, получим:

$$F(x, \tau) = F_t \operatorname{erf}\left(\frac{Nx}{2\sqrt{\tau}}\right). \quad (3.16)$$

Здесь по принятому нами условию $F_t = \text{const}$.

Площадь эпюры продольной силы на концевом участке рельсовой плети (см. рисунок 3.7) отличается от площади в ее середине (на такой же длине) на $\lambda E \omega$, где λ – перемещение на конце в точке $x = 0$.

Поскольку функцию (3.15) можно разложить в ряд:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3} + \frac{1}{2!} \cdot \frac{z^5}{5} - \frac{1}{3!} \cdot \frac{z^7}{7} + \dots \right), \quad (3.17)$$

то с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2z}{\sqrt{\pi}} = \frac{Nx}{\sqrt{\pi\tau}}. \quad (3.18)$$

Тогда зазор с учетом (3.16) и (3.8) получим [69] равным:

$$\lambda_3 = \frac{F_t \sqrt{\pi \tau}}{NE\omega} = \frac{\alpha \sqrt{\pi \tau \Delta t}}{N}. \quad (3.19)$$

По формуле (3.19), если в расчете принять $N = 1,5 \text{ м}^{-1} \text{с}^{1/2}$, получим в течение суток ($24 \cdot 3600 = 86,4 \cdot 10^3 \text{ с}$):

$$\lambda_3 = \frac{11,8 \cdot 10^{-6} \sqrt{3,14 \cdot 86,4 \cdot 10^3 \cdot 35}}{1,5} = 0,143 \text{ м} \approx 143 \text{ мм}.$$

Такая сумма зазоров в четырех стыках явно не может быть допущена. Значит, стыковые болты начнут еще раньше работать на срез и смятие. Тогда закон изменения напряженно-деформированного состояния не будет соответствовать граничному и начальному условиям (3.13). Закон изменения продольной силы в уравнильных рельсах будет подчиняться уже другим начальному и граничному условиям, а именно:

$$\text{Для } \tau = 0, F_0(x) = \frac{F_0(l - |x|)}{l} \text{ при } |x| \leq l \text{ и } -\infty < x < \infty, \tau > 0, \quad (3.20)$$

где l – длина концевого участка рельсовой плети в момент предельного раскрытия зазоров в стыках уравнильного пролета, м.

Тогда при условиях (3.20) решение дифференциального уравнения (1.31) будет следующим:

$$F(x, \tau) = F_t + \frac{F_0}{2} \left\{ \left(1 + \frac{x}{l} \right) \operatorname{erf} \left[\frac{N(x+l)}{2\sqrt{\tau}} \right] - \frac{2x}{l} \operatorname{erf} \left(\frac{Nx}{2\sqrt{\tau}} \right) + \left(1 - \frac{x}{l} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{N(x-l)}{2\sqrt{\tau}} \right) \right\} + \\ + \frac{F_0}{Nl} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \left\{ \exp \left[-\frac{N^2(x+l)^2}{4\tau} \right] - 2 \exp \left(-\frac{N^2 x^2}{4\tau} \right) + \exp \left[-\frac{N^2(x-l)^2}{4\tau} \right] \right\}. \quad (3.21)$$

Чтобы найти конфигурацию эпюры по этапу 3, придется применить графо-аналитический метод, т. е. ординаты эпюры (3.14), полученные при этапе 2, следует сложить с ординатами эпюры полученной по (3.21) (см. рисунок 3.7).

Очевидно, что конфигурация эпюры по этапу 3 показывает, что продольная сила в рельсах неприемлема по условию обеспечения прочности стыковых болтов. Тогда потребуется заменить уравнильные рельсы на удлиненные. В последнем случае эпюра продольных сил опять станет соответствовать выражению

(3.14), определяющему ее конфигурацию (этап 4). Поскольку процесс увеличения зазоров будет продолжаться, хотя и более медленно (из-за уположения эпюры продольных сил на концевых участках рельсовых плетей), возможно, потребуются повторное увеличение длины уравнильных рельсов. При этом на рисунке 3.7 учтено, что в стыковых накладках сопротивления продольным перемещениям с учетом динамики равны нулю [120], а продольные силы в уравнильных рельсах, зависящие от погонных сопротивлений, также в процессе эксплуатации быстро исчезают в результате их релаксации [121].

Рассмотрим период весеннего повышения температуры рельсов для того же конечного участка, на котором происходили изменения эпюры продольных сил и изменялась величина зазоров в осенний период времени.

По статическому методу расчета при тех идеализированных условиях эксплуатации, когда погонные сопротивления продольному сдвигу рельсов и сопротивления в стыковых накладках достаточно велики, следует, что замены уравнильных рельсов не требуется. Если эти сопротивления относительно малы, то замена уравнильных рельсов потребуются, прежде всего, на участках железных дорог с суровым климатом. Такая замена предусмотрена в [82]. Конфигурация эпюры продольных сил по статическому методу расчета не претерпевает изменений в процессе эксплуатации. Это вытекает из того, что погонные сопротивления продольным перемещениям шпал в балласте в статическом методе расчета считаются не зависящими ни от времени, ни от частоты воздействия поездной нагрузки.

Эпюра продольных сил, построенная на основании расчетов ее координат по статическому методу, показана на рисунке 3.8.

На рисунке 3.8 показаны эпюры, соответствующие четырем этапам повышения температуры рельсов в весенний период. 1-я эпюра – при понижении температуры рельсов от t_3 до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2-я эпюра – при достижении рельсами температуры их закрепления $35\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3-я эпюра – при дальнейшем повышении температуры рельсов – выше $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Все три эпюры построены при остающихся удлиненных уравнильных рельсах.

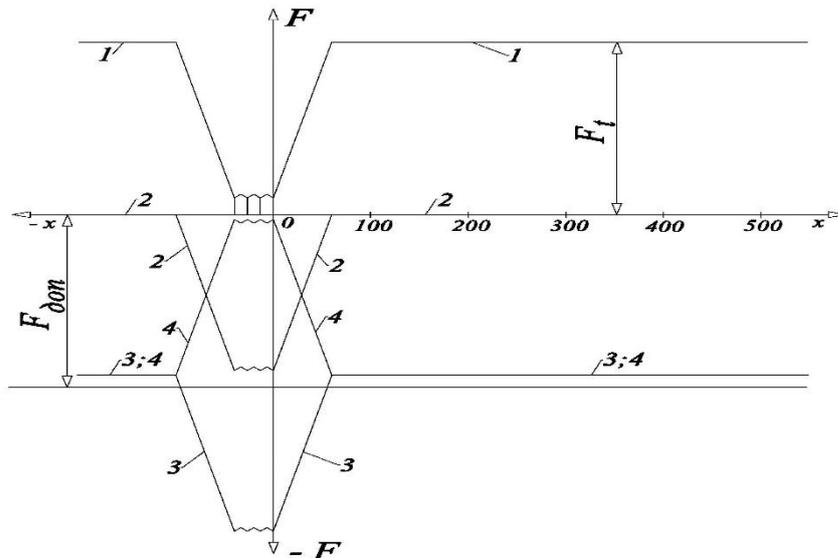


Рисунок 3.8 – Эпюры продольных сжимающих сил в пределах концевых участков рельсовых плетей и уравнительного пролета (статический метод)

Как видно (см. рисунок 3.8), конфигурация эпюры на 1, 2 и 3-м этапах остается одинаковой, только ординаты параллельно смещаются, как это было бы в середине рельсовой плети. На 3-й эпюре ординаты превысили критические значения, т. е. в этом случае может произойти потеря устойчивости. 4-я эпюра построена, когда уравнительные рельсы заменены на укороченные с обеспечением продольного перемещения на концах.

С учетом воздействия поездов и фактора времени эпюра в зимний период (1-й этап) отличается от найденной статическим методом тем, что концевые участки значительно длиннее (рисунок 3.9).

Для построения эпюр продольных сил с учетом воздействия поездов и фактора времени придется пользоваться графоаналитическим методом [132]. На рисунке 3.9 эпюры на 1, 2 и 3-м этапах практически не отличаются по своей конфигурации. Незначительным отличием, заключающимся в том, что со временем наклон (градиент $F(x)$) уменьшается по формуле (3.21), в данном случае следует пренебречь, поскольку между 1, 2 и 3-м этапами времени прошло немного. На 4-м этапе графоаналитическим методом получаем конфигурацию эпюры на концевом участке, пользуясь формулой (3.16). В результате определяем опасные места с по-

вышенными продольными сжимающими силами (или с пониженной фактической температурой закрепления).

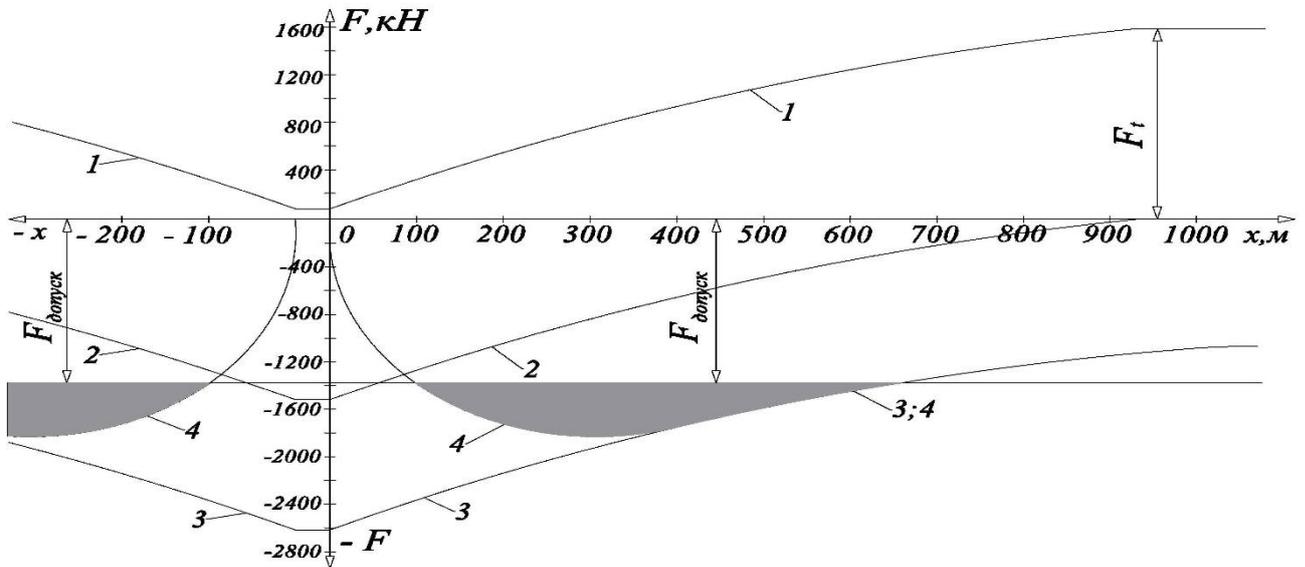


Рисунок 3.9 – Эпюры продольных сжимающих сил в пределах концевых участков рельсовых плетей и уравнительного пролета (с учетом воздействия поездов и фактора времени)

В статическом методе расчета такие участки не выявляются, а это значит, что статикой не определяются опасные по условию устойчивости места на концевых участках рельсовых плетей [143]. Для построения эпюр продольных сил, получаемых статическим методом, достаточно знать только градиент продольной силы $F(x)$ по длине, т. е. угол наклона графика (см. рисунок 3.9) $r = \frac{\Delta F}{\Delta x}$.

Если рельсовые плети бесстыкового пути имеют длину до 800 м или до протяженности блок-участка, что ненамного больше, то на перегоне оказывается значительное количество уравнительных пролетов. На основании статического расчета для дорог с суровым климатом, принимая в качестве исходных данных даже идеальные условия эксплуатации, нельзя применять рельсовые плети длиной менее перегона. Реально хорошо содержать бесстыковой путь и при этом дважды в год своевременно менять уравнительные рельсы и перезакреплять концевые участки бесстыкового пути возможно, только если таких участков на перегоне не

более двух. Еще лучше – чтобы этих концевых участков, примыкающих к стрелочным переводам, совсем не было, но для этого на отечественных железных дорогах пока еще не имеется необходимых условий.

Расчет, определяющий напряженно-деформированное состояние бесстыкового пути с учетом фактора времени и воздействия поездов для весеннего периода, особенно отчетливо показывает необходимость ликвидации уравнительных пролетов. При этом такая необходимость существует не только для железных дорог с суровым климатом, но и для всех остальных. Если после зимнего периода весной интенсивно начинается повышение температуры рельсов, а из уравнительного пролета не успели изъять удлиненные уравнительные рельсы, то и по статическому методу расчета это место становится весьма опасным с точки зрения обеспечения устойчивости рельсошпальной решетки. Но опыт показывает, что этот период проходит, а, несмотря на то что уравнительные рельсы своевременно изъять не были, потери устойчивости не происходит. Такие случаи иногда повторяются, создавая у персонала, обслуживающего путевое хозяйство, впечатление, что можно и не выполнять срочную замену удлиненных уравнительных рельсов на нормальные или укороченные. Тогда укореняется ошибочное мнение о том, что обеспечение температурного режима работы рельсовых плетей бесстыкового пути не так важно, а можно обойтись увеличением плеча балластной призмы, дополнительным уплотнением щебня или его закреплением вяжущими материалами. Это заблуждение, подрывающее условие надежности обеспечения безопасности движения поездов по критерию устойчивости.

Чтобы не иметь опасных мест по условиям устойчивости бесстыкового пути, возникших при смене уравнительных рельсов на укороченные (см. рисунок 3.9, этап 4), необходимо вместе с заменой уравнительных рельсов еще произвести и перезакрепление концевых участков на длине по 400 м от концов плетей. В этом случае трудоемкость работ повышается. При большом количестве уравнительных пролетов на перегоне дистанция пути реально и своевременно такой объем работ выполнить не в состоянии.

3.3. Выводы по главе 3

Исследования сопротивлений бесстыкового пути перемещениям позволили сделать следующие выводы:

– Величина сопротивления шпалы определялась многими физическими факторами, которые необходимо было учитывать в действующем пути. Решающее влияние на сопротивление оказывали трение и сцепление по подошве шпалы; ширина плеча балластной призмы – второстепенный фактор. В настоящее время, как показали наблюдения, увеличение плеча балластной призмы более 0,25 м существенно не повышает сопротивление, но значительно увеличивает материальные и трудовые затраты. Увеличение вертикальной нагрузки на шпалы присыпкой валиков щебня на концах также незначительно позволяет повысить сопротивление сдвигу шпал.

– Закрепление щебня на откосах балластной призмы вяжущими материалами позволяет несколько увеличить сопротивление сдвигу шпал поперек оси пути, но это увеличение сопротивления вызовет появление более коротких неровностей рельсов в плане. Такое увеличение погонных сопротивлений нельзя использовать для понижения температуры закрепления, так как в процессе эксплуатации невозможно сохранить его повсеместно и на длительный срок.

– При проектировании бесстыкового пути для определения величины возможных перемещений конца рельсовой плети, а также дополнительных продольных сил на концевых участках необходимо пользоваться графоаналитическим методом.

– Значительные дополнительные продольные силы на концевых участках рельсовых плетей могут возникать в период резкого потепления после периода длительного похолодания. С помощью графоаналитического метода расчета можно определять нахождение опасных по условиям устойчивости мест в бесстыковом пути.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКИХ СВОЙСТВ БАЛЛАСТА, СДВИГАЕМОГО ШПАЛАМИ ВДОЛЬ И ПОПЕРЕК ОСИ ПУТИ

4.1. Определение вязких свойств щебеночного балласта, сдвигаемого шпалами вдоль и поперек оси пути, по испытаниям в действующем пути одиночных шпал

Реологические испытания железобетонных шпал, сдвигаемых в балласте вдоль оси пути, проводились с помощью пары устройств, которые устанавливались с внутренней стороны колеи [60]. Через упоры на смежные шпалы передавалось усилие с помощью сжимаемых пружин. Одна из шпал прикреплялась к рельсу, а другая, которая подвергалась испытанию, ослаблялась клеммными болтами. Винт с расположенным внутри направляющим стержнем прикреплялся к одному упору и шарнирно – к другому упору. Втулка, перемещаемая гайкой, насаживалась на винт, а тарированная пружина устанавливалась между шайбой и частью втулки. По вынесенному на кронштейне индикатору определялось расстояние между упорами, и вторым индикатором между вторым упором и частью втулки.

Для установки устройства часть шпального ящика освобождали от щебня, под шпалы заводились упоры, чтобы на уровне одной трети их высоты передавалась сила сжатия пружины. С помощью гайки перемещали шайбу через тарированную пружину и втулку в неподвижную шайбу. Вращением гайки сжимали пружину, после того как на индикаторах устанавливались нулевые отметки. Чтобы после прохода поезда усилие на шпалу уменьшилось не более чем на 5 %, была специально подобрана жесткость пружины. В среднем время проведения каждого опыта было равно продолжительности рабочего дня. Применялось несколько пар пружинно-винтовых устройств, чтобы за короткий промежуток времени получить достаточно большое количество опытных данных.

Для реологических испытаний шпал под действием сил, направленных поперек оси пути, были использованы пружинно-винтовые устройства [60], для чего была изготовлена специальная рама с упорами под головку и захватами за подошву рельса.

Несколько позже были разработаны и изготовлены более удобные и совершенные устройства [57]. В комплект этих устройств входили пружинно-винтовой прибор с измерительными устройствами, определяющими степень сжатия пружины, т. е. величину перемещения и силу, передаваемую на шпалу, и специальные подкладки, устанавливаемые вместо типовых. Эти подкладки состояли из двух частей: нижняя часть крепилась к железобетонной шпале, а верхняя – к рельсу. Поскольку отрыв этих двух частей друг от друга невозможен, то свободно может происходить продольное смещение шпалы поперек оси пути. Шпала могла перемещаться поперек оси пути, когда рельс оставался неподвижным, не нарушая его нормальную эксплуатацию. Упираясь в рельс, пружинно-винтовое устройство анкерилось на шпале и передавало силу на нее через сжимаемые пружины.

Опыты по определению закона деформирования $\lambda(\tau)$ при $r = \text{const}$ продолжались 5–6 ч или ограничивались перемещением $\lambda_{\text{max}} = 0,3$ см. При этом каждая шпала перемещалась сначала в одном, а затем в противоположном направлении ($r = \text{const}$). По результатам экспериментов для значений $r = 3,3; 7,3$ и $10,0$ кН/м были построены графики в виде опытных зависимостей $\lambda(\tau)$ при $r = \text{const}$ (рисунки 4.1, 4.2). На этих рисунках представлены графики зависимости средних перемещений $\lambda(\tau)$ по показаниям двух приборов при сдвиге одной шпалы.

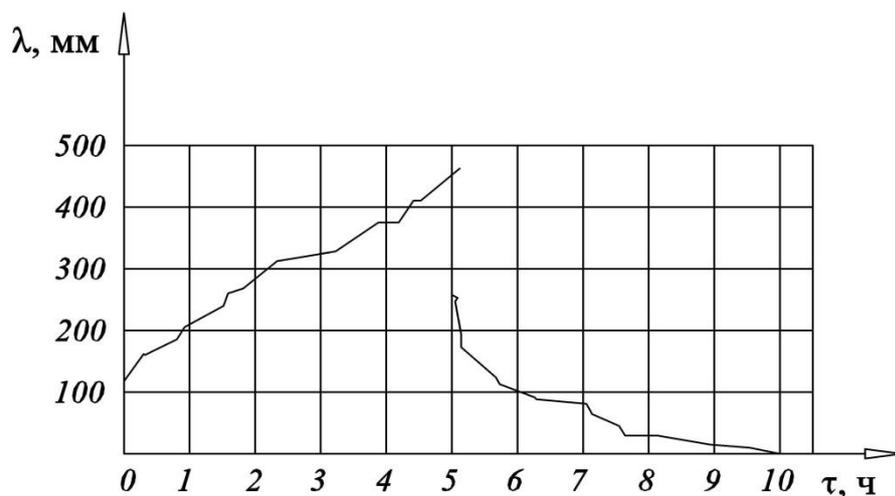


Рисунок 4.1 – График экспериментальной зависимости $\lambda(\tau)$ при $|r| = 3,3$ кН/м ($r = \text{const}$)



Рисунок 4.2 – График экспериментальной зависимости $\lambda(\tau)$
при $|r| = 7,3$ кН/м ($r = \text{const}$)

Экспериментами было проведено не менее 12 опытов для пяти разных значений $r = \text{const}$. Результаты цикла испытаний [60], состоящего из 60 опытов на ползучесть, приведены на рисунке 4.3, на котором представлены опытные данные о $r(\dot{\lambda})$

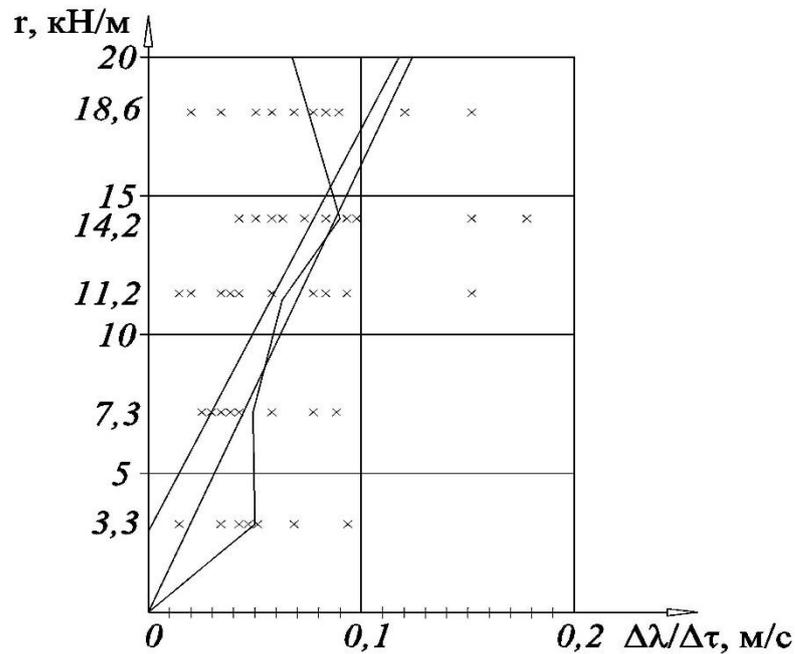


Рисунок 4.3 – Эмпирическая зависимость $r(\dot{\lambda})$

Из графиков (см. рисунок 4.3) видно, что аппроксимация ломаной регрессии, которая проходит через точку начала координат и строится по средним зна-

чениям r , дает $r = 177,7\dot{\lambda}$. При этом коэффициент корреляции 0,959, и ошибка составляет 1,53 кН/м. Если аппроксимировать ту же ломаную регрессии функцией $r = 3 + 165\dot{\lambda}$, то коэффициент корреляции станет 0,981. Использование функции типа $r = r_0 + a\dot{\lambda}$ усложняет задачу, но несущественно приближает к реальным данным.

Для того чтобы уточнить закон деформирования, необходимо определить $r(\tau)$ при $\lambda = \text{const}$, т. е. провести опыты на релаксацию, особенно при малых значениях погонных сил r [60]. Экспериментальные значения времени релаксации n можно получить, используя опыты на релаксацию. Значения мгновенного модуля упругости U_x из графиков $\lambda(\tau)$ (см. рисунки 4.1, 4.2) невозможно получить по значениям λ_0 и $r = \text{const}$, поскольку не учитывалось влияние поездов при начальном нагружении шпалы.

Поэтому нельзя было определить из данных, полученных опытами на ползучесть, время релаксации из отношения $n = K / U_x$. При учете воздействия поездов из опыта на релаксацию при известном n , из этого соотношения можно было найти значение U_x . Такие опытные графики зависимости в [60] $r(\tau)$ при $\lambda = \text{const}$ показаны на рисунке 4.4.

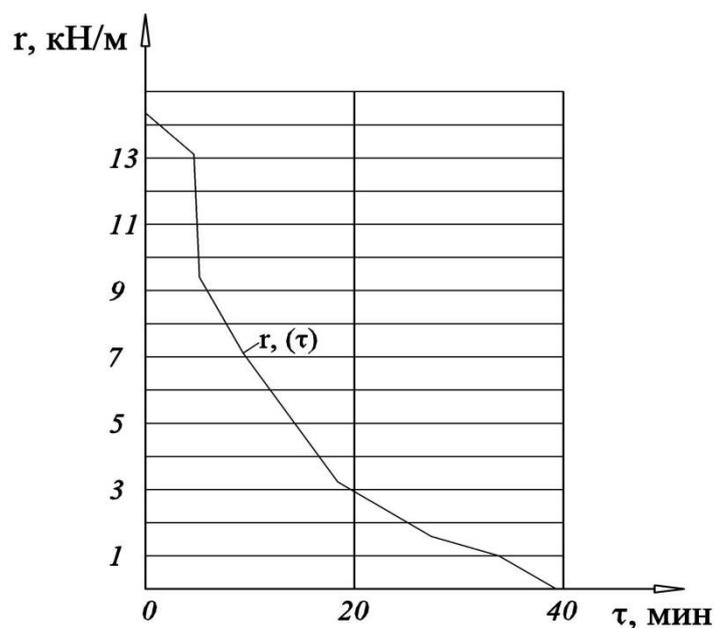


Рисунок 4.4 – График экспериментальной зависимости $r(\tau)$ при $\lambda = \text{const}$

Величина перемещения в опытах на релаксацию была не постоянна за счет того, что она увеличилась из-за несовершенства упора в процессе эксперимента, которым служила пара противоугонов. Таким образом, время релаксации составило от 0,1 до 1,5 ч и было вычислено с ошибкой. Так, при проходе от 1 до 5 поездов для описанных условий эксплуатации начальное усилие r_0 при $\lambda = \text{const}$ уменьшилось в $e = 2,72$ раза (e – основание натурального логарифма). При этом было обнаружено, что полная релаксация сопротивлений, передаваемых от балласта на шпалу, происходила после прохода от 1 до 5 поездов, или через 1–3.

На эксплуатируемом участке бесстыкового пути опытами на ползучесть получено около 60 экспериментальных значений коэффициента вязкости K . Эти эксперименты были проведены сразу после прохода ЩОМ-4 и ВПО-3000. После первых суток значения коэффициента вязкости составили от $1,1 \cdot 10^6$ до $3,6 \cdot 10^6$ кН·с/м², после вторых суток – от $1,8 \cdot 10^6$ до $21,6 \cdot 10^6$ кН·с/м². Затем по истечении двух суток движения поездов значения коэффициента вязкости увеличились от $2,21 \cdot 10^6$ до $108 \cdot 10^6$ кН·с/м² [60].

Также при смиршемся балласте было проведено несколько опытов. В данном случае значения коэффициента вязкости составили от $3,6 \cdot 10^8$ до $7,2 \cdot 10^8$ кН·с/м².

В.В. Ершовым было проведено около 350 опытов по определению коэффициента вязкости ξ с использованием пружинно-винтовых устройств [122]. Опыты проводились после пропуска 1,7; 21 и 230 млн т. брутто на железобетонных шпалах. При этом на шпалу воздействовала сила от 0,3 до 4,0 кН. На рисунке 4.5 представлена диаграмма $q(\tau)$, на которой самописцем фиксировались перемещения.

Были вычислены минимальное и среднее арифметическое значения коэффициента вязкости по данным, полученным из опытов: $\xi_{\min} = 0,27 \cdot 10^8$ кН·с/м², $\xi_{\text{ср}} = 1,4 \cdot 10^8$. Значения коэффициентов вязкости K и ξ необходимо уточнять при более обширных экспериментах с различными условиями эксплуатации.

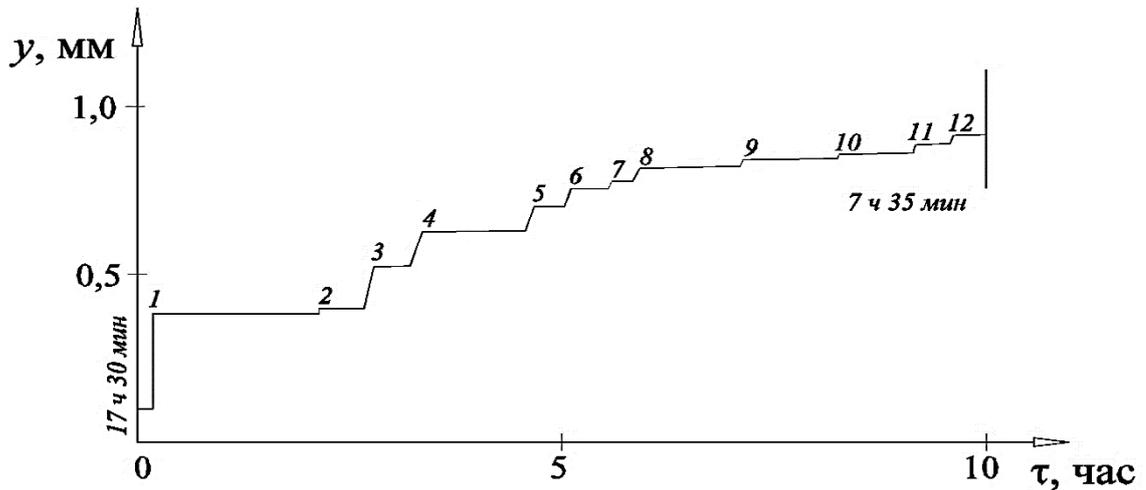


Рисунок 4.5 – Диаграмма, фиксируемая самописцем при испытании сдвигу в балласте железобетонных шпал поперек оси пути; экспериментальной зависимостью $y(\tau)$ при $q = \text{const}$

4.2. Определение вязких свойств щебеночного балласта, сдвигаемого рельсошпальной решеткой, на конечном участке рельсовой плети бесстыкового пути

На основе экспериментальных данных, которые были получены при перемещениях на конечном участке рельсовой плети или изменениях эпюры продольных сил в процессе эксплуатации, при разнице температуры рельсов и температуры закрепления бесстыкового пути, коэффициент относительной вязкости может быть определен из выражения (3.16) [60].

Для определения значения коэффициента относительной вязкости N опытные данные о величине продольных сил необходимо получить в моменты времени τ_1 и τ_2 в двух точках x_1 и x_2 на конечном участке рельсовой плети. Проще, если принять $x_1 = \tau_1 = 0$. Погрешность определения коэффициента относительной вязкости весьма велика, если в условиях проведения эксперимента недостаточно точно выполнено начальное условие $F(x) = F_0 = \text{const}$.

$$F|_{x=0} = 0, F|_{\tau=0} = F_0. \quad (4.1)$$

В действующем пути выполнение начального и граничного условия (4.1) трудно осуществить, поэтому необходимо найти экспериментальный метод опре-

деления коэффициента относительной вязкости, при котором возникала бы необходимость обеспечения заданного начального условия.

При суточных колебаниях температуры рельсов при экспериментальной проверке закона изменения продольных перемещений и продольных сил по формулам (4.2) и (4.3) учитывается, что по сравнению с уравнением $\sigma_k = \frac{fP^1_{\text{ЭКВ}}}{4W_k}$ разница в величине максимальной продольной силы составит 4,3 % [60].

$$\lambda(x, \tau) = \lambda_0 \exp\left(-N\sqrt{\frac{\theta}{2}}x\right) \sin\left(\theta\tau - N\sqrt{\frac{\theta}{2}}x\right). \quad (4.2)$$

$$F(x, \tau) = F_0 \left[\sin\theta\tau - \exp\left(-N\frac{\theta}{2}x\right) \sin\left(\theta\tau - N\sqrt{\frac{\theta}{2}}x\right) \right]. \quad (4.3)$$

Качественным отличием полученного процесса от ранее известных являлось одновременное перемещение на концевом участке рельсовой плети разных сечений в противоположные направления при суточных колебаниях температуры. Такие перемещения были обнаружены при записи перемещений на экспериментальных участках пути на концевом участке в точках, расположенных через 20 м (рисунок 4.6). Зафиксировать по показаниям мессур максимальные значения перемещений в каждом сечении рельсовой плети не всегда было возможно при дискретной записи закона $\lambda(x_i, \tau)$.

В связи с этим использовали показания самописцев для определения времени запаздывания $\Delta\tau_i$ по достижении максимумов перемещений λ_{max} для сечений, которые находились на расстоянии 40, 80, 120, 160 м.

На рисунке 4.7 на концевом участке рельсовой плети по пяти сечениям показаны копии диаграмм самописцев. Таким образом, из уравнения (4.4) можно определить значение коэффициента относительной вязкости по величине запаздывания $\Delta\tau_i$. При этом $\Delta\tau_i = 2,4$ ч и соответственно $N = 0,7 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$.

$$\Delta\tau_i = \tau_{\lambda_0} - \tau_{\lambda_i} = \frac{Nl_i}{\sqrt{2\theta}}. \quad (4.4)$$

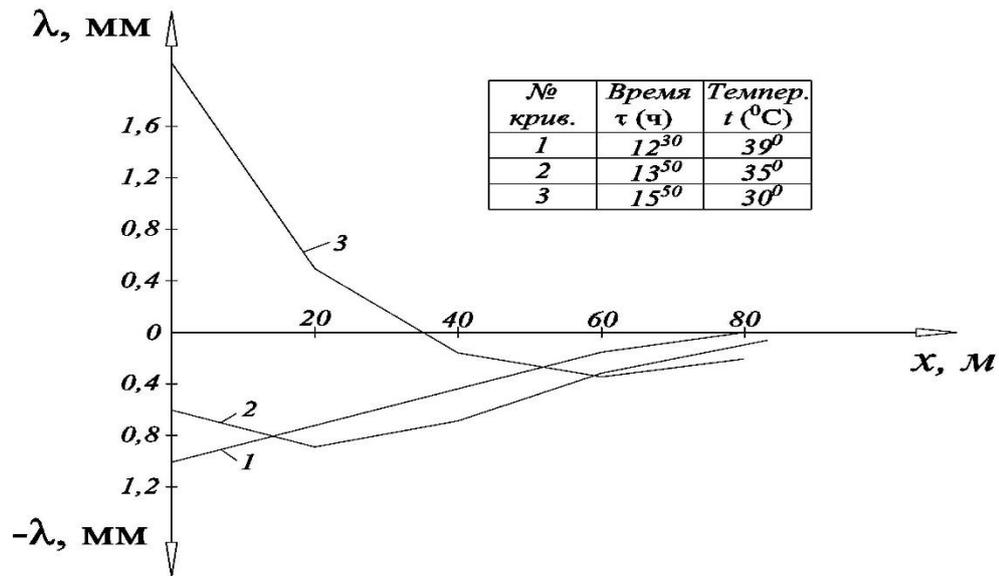


Рисунок 4.6 – Типичные результаты измерения продольных перемещений мессурами на конечном участке рельсовой плети

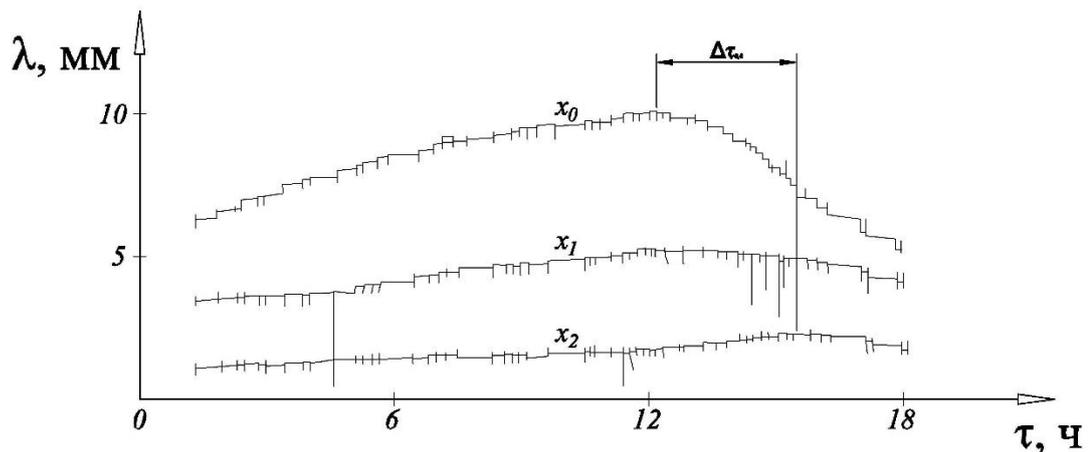


Рисунок 4.7 – Диаграммы записей самописцев $\lambda(x, \tau)$ на конечном участке рельсовой плети

Значение коэффициента относительной вязкости соответствовало определяемому в тех же условиях при испытаниях с одиночными шпалами [60]. По сравнению с ранее определенными средними значениями незначительное его уменьшение объясняется разуплотнением балласта в шпальных ящиках при знакопеременных перемещениях шпал на конечном участке рельсовой плети.

Опыты с созданием регулярного режима по методике, приведенной в [60], было предпринято несколько попыток, и только две из десяти оказались удачными. После установки в зазор на конце плети вкладыша в 5–6 ч утра темпера-

тура рельсов достигала максимума к 11–12 ч дня и оставалась определенное время (4–5 ч) постоянной. На рисунке 4.8 представлен пример измерения $\lambda(x_i, \tau)$.

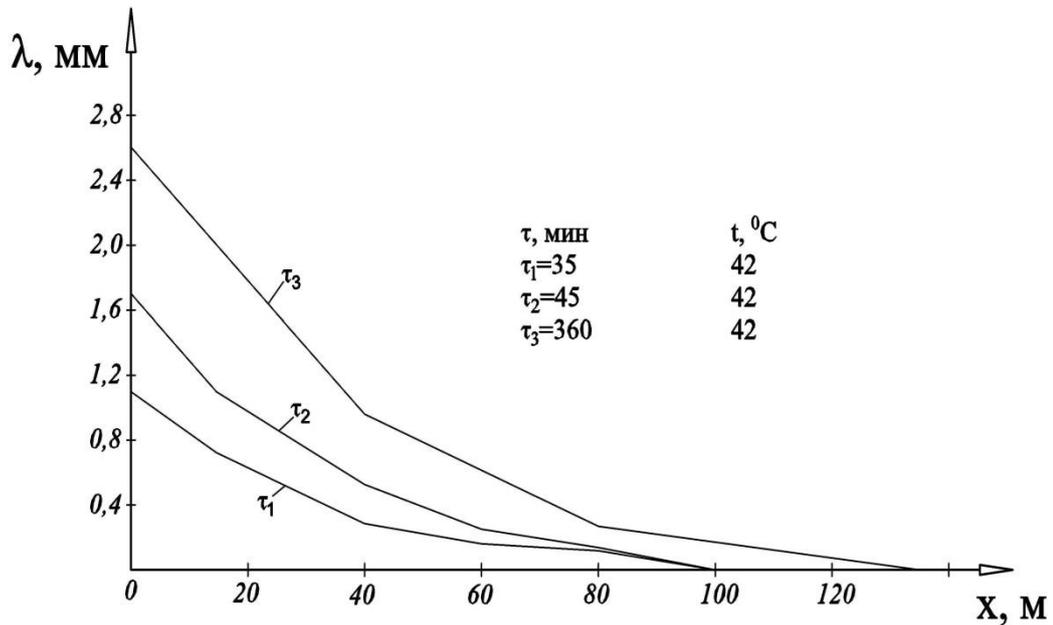


Рисунок 4.8 – График опытной зависимости $\lambda(x, \tau)$ при $F \approx \text{const}$

На участке 120 м через каждые 20 м от конца рельсовой плиты располагались сечения с мерными створами. Измерения перемещений производились мессурами с ценой деления 0,01 мм. После прохода поезда по опытному участку брались отсчеты с фиксацией времени, которое отсчитывалось после удаления вкладыша. На графике опытной зависимости приведены значения времени и температуры.

В полулогарифмической системе координат построены графики $\ln \lambda = \psi(\tau)$ (рисунок 4.9) по экспериментальным данным, по которым вычисляется темп изменения перемещений.

В данном случае $m \approx 0,150 \text{ ч}^{-1}$. Тогда при $L_0 = 110 \text{ м}$ по формуле (4.5) получим $N \approx 1,6 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$.

$$L_b = \frac{2,68\pi}{N\sqrt{\theta}} = 2 \frac{\sqrt{\pi\tau_c}}{N} = 17,4N^{-1}. \quad (4.5)$$

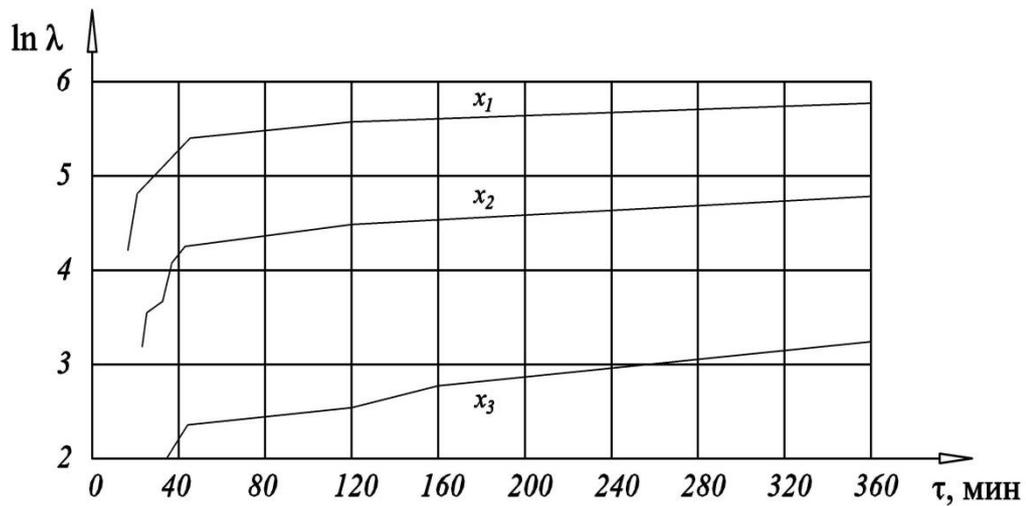


Рисунок 4.9 – График опытной зависимости $\ln \lambda(\tau)$ при $F \approx \text{const}$ (регулярный режим)

Опытное определение описанными способами коэффициента относительной вязкости трудоемко. Эти эксперименты через эмпирический коэффициент относительной вязкости дали приближенную количественную оценку и подтвердили качественную сторону процессов. В связи с этим целесообразнее производить для различных условий эксплуатации статистическую коррекцию величины коэффициента относительной вязкости описанными испытаниями одиночных шпал.

4.3. Определение вязких свойств щебеночного балласта, сдвигаемого железобетонными шпалами, с использованием опытных данных, полученных на экспериментальном кольце ВНИИЖТа

Обеспечение устойчивости – одно из главных требований, предъявляемых к состоянию железнодорожной колеи. Для обеспечения устойчивости бесстыкового пути при действии в рельсовых плетях продольных сжимающих сил считалось необходимым [33] иметь достаточное погонное сопротивление сдвигу рельсошпальной решетки в поперечном оси пути направлении.

При отсутствии погонных сопротивлений определение условий устойчивости рельсошпальной решетки под действием продольной сжимающей силы сводится к задаче Эйлера об устойчивости продольно сжатых упругих стержней

[105]. В таком случае упругий стержень (рельсошпальная решетка) имеет бесконечную длину, а критическая сжимающая продольная сила $F_{кр}$, при которой он, по Эйлеру, теряет устойчивость, зависит от квадрата длины l стержня (1.18).

На основании (1.18) предполагали, что устойчивость бесстыкового пути при отсутствии или недостаточности погонного сопротивления может быть легко потеряна.

Из (2.2) следует, что, чем больше сопротивление среды, в которой упругий стержень теряет устойчивость, тем короче волны его изогнутой оси. А из (2.3) еще следует, что чем больше сопротивление среды, тем больше величина критической силы.

Для железнодорожного пути такие выводы означают, что не следует допускать возникновения в рельсах больших продольных сжимающих сил, которые могут вызвать появление коротких неровностей в плане – особенно нежелательных для обеспечения безопасности движения поездов.

Модель для расчета железнодорожного пути на устойчивость, состоящая из упругого стержня в упругой среде, применения не получила, поскольку среда, в которой находится рельсошпальная решетка (балласт), существенно неупругая. Эту среду подавляющее большинство исследователей считали жесткопластической [39], щебеночный балласт при статических испытаниях нагружением шпал силами, направленными поперек оси пути, давал зависимость сил от деформаций в виде степенной функции вида $q = ay^b$, где a и b – эмпирические коэффициенты. Эту зависимость обычно аппроксимировали прямой [123], параллельной оси y , т. е. принимали $q = \text{const}$.

Принятие $q = \text{const}$ означало, что расчетная физическая модель железнодорожного пути представляет собой упругий стержень в идеально жесткопластической среде (рисунок 4.10).

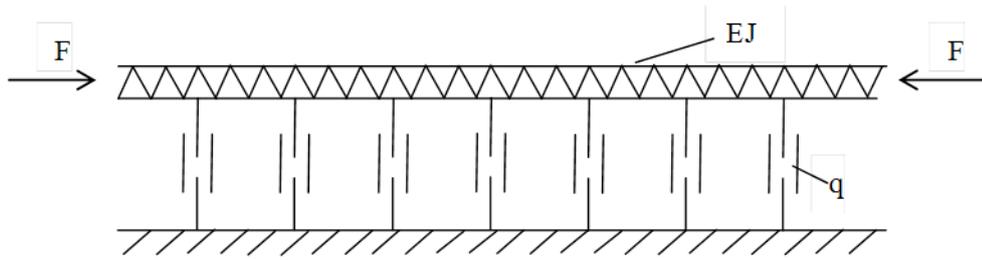


Рисунок 4.10 – Упругий стержень в жесткопластической среде

В (2.22) приведено дифференциальное уравнение изогнутой оси упругого стержня, находящегося под действием сжимающей продольной силы.

Задача состоит в определении неизвестной силы (F) и конфигурации изогнутой оси (y, x).

Решение этого дифференциального уравнения дает, как известно [39], два уравнения, из них первое – для критической сжимающей продольной силы, и второе – для стрелы изгиба и его длины (1.18).

В результате имеем, например, графики функций $F(l)$ и $f(l)$, вид которых представлен на рисунке 1.7. Решение получено неоднозначное.

Решение дифференциального уравнения (2.22) для пути, по которому не ходят поезда или ходят очень редко, найдено статическим методом. Для отечественных условий работы железнодорожного транспорта характерна высокая грузонапряженность, т. е. частое воздействие на путь проходящих поездов.

Г.М. Шахунянц в своем учебнике [123] писал, что когда по пути движется поезд, то погонные сопротивления сдвигам шпал уменьшаются на 30...50 %.

Однако если погонные сопротивления балласта сдвигу рельсошпальной решетки уменьшаются во время движения поезда, то в это же время происходят и ее перемещения в сторону действия сил, передаваемых на шпалы от рельсов.

В опытах В.В. Ершова на ползучесть для определения коэффициента вязкости ξ были приняты $q = 6$, $q = 4$ и $q = 2$ кН/м. Во всех случаях оказалось, что зависимость этих сил от скорости деформации в достаточной точности соответствует закону Ньютона (сила прямо пропорциональна скорости перемещения):

$$q = \xi \dot{y} . \quad (4.6)$$

У некоторых специалистов [64] новое название механической характеристики балласта, сдвигаемого шпалами при учете воздействия поездов, вызывало отторжение. Это неприятие, как видно, возникло из-за ассоциации с привычным понятием о том, что балласт достаточно твердая среда, а понятие «вязкость» ассоциируется со свойствами таких материалов, как, например, бетон и т. п. Но известно, что такой довольно твердый материал, как битум, также имеет вязкие свойства. Вязкости бетона посвящено много исследований, просто для бетона коэффициент вязкости относительно велик. В конце концов, можно было бы применять такое понятие, как «квасивязкость» или «псевдовязкость». Но от этого суть не меняется, зависимость (4.6) найдена экспериментами, проведенными на действующих участках железнодорожного пути с учетом воздействия проходящих поездов [133].

Чтобы неопровержимо доказать или опровергнуть утверждение о том, что вязкие свойства балласта при учете воздействия поездов имеют место, можно провести так называемые «прямые опыты» на действующем пути. Достаточно, например, повысить температуру рельсовой плети на некоторую величину, сохранять эту температуру некоторое время и при этом измерять за это время изменение стрелы в плане на напряженной неровности. Если стрела будет расти, то вязкость есть, если стрела не будет расти, то вязкости нет [134–136, 141].

На экспериментальном кольце ВНИИЖТа на ст. Щербинка в начале 80-х годов прошлого века были проведены эксперименты с нагревом рельсовых плетей бесстыкового пути и пропуском по искусственно нагретым рельсовым плетям подвижного состава. При этом проводились измерения изменяющейся стрелы рельсов напряженной неровности. Эта напряженная неровность, как видно, возникала только во время движения поезда, ибо без воздействия поездов рост стрелы практически не наблюдается (рисунок 4.11).

При учете (4.6) дифференциальное уравнение изогнутой оси рельсов имеет следующий вид [64]:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \xi \frac{\partial y}{\partial \tau} = 0. \quad (4.7)$$

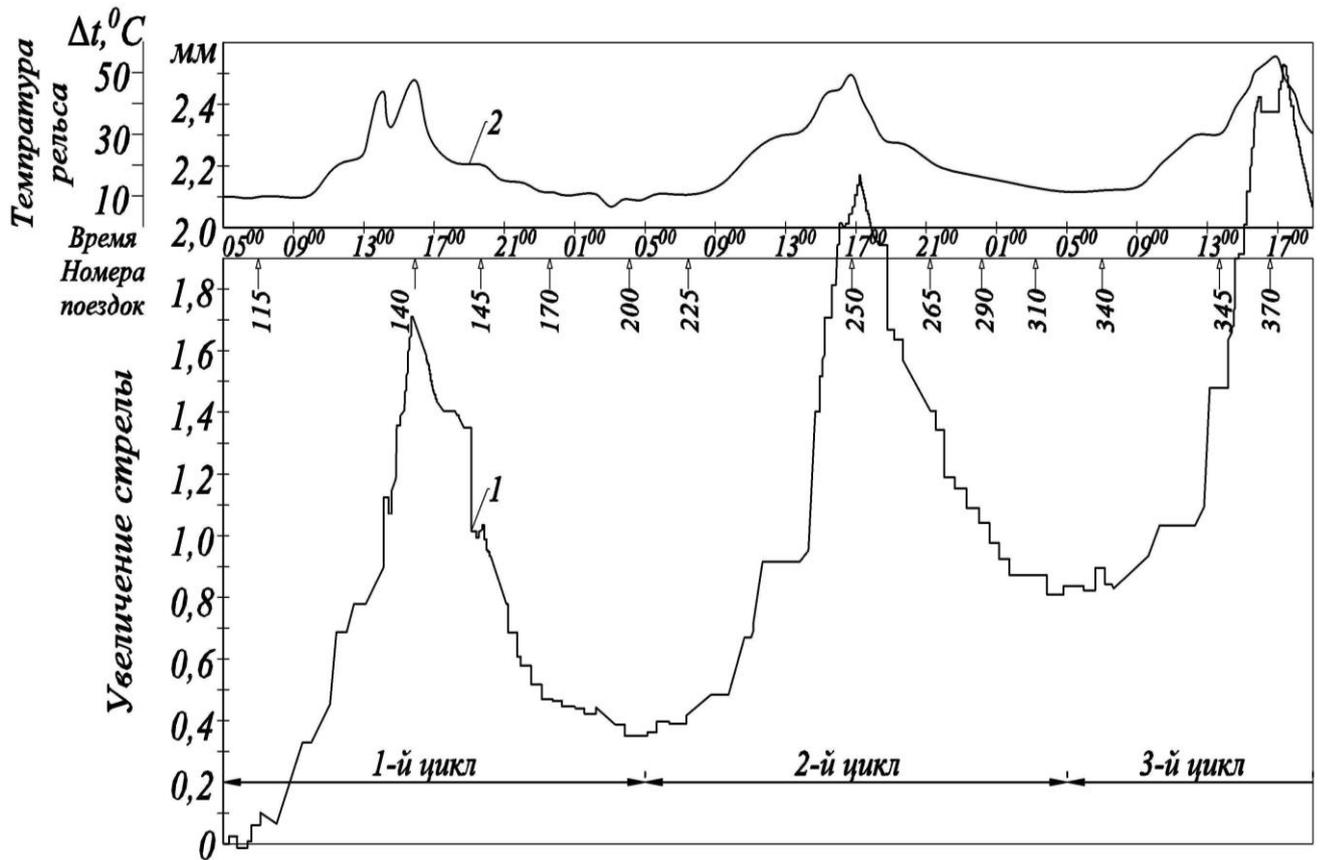


Рисунок 4.11 – Сдвиг рельсошпальной решетки после одновременного действия поездной и температурной нагрузки на кривом участке пути ($R = 600$ м)

Этому уравнению соответствует расчетная физическая модель – упругий стержень в вязкой среде (рисунок 4.12).

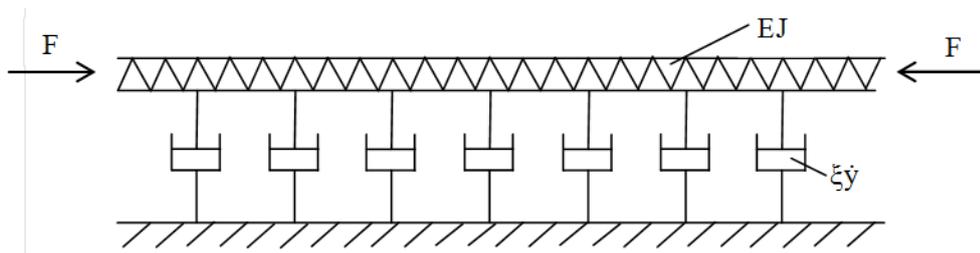


Рисунок 4.12 – Упругий стержень в вязкой среде

Его решение в [39] определяет закономерность роста стрелы изгиба при стрелах, позволяющих двигаться поездам и при которых продольная сжимающая сила еще может считаться постоянной (1.33).

В (4.7) $F = \text{const}$, а в опытах ВНИИЖТа – см. рисунок 4.11. Продольная сила изменялась во времени, что несколько затрудняет анализ результатов опыта, имеющего целью доказательство или опровержение гипотезы о наличии вязких свойств щебня, сдвигаемого шпалами поперек оси пути. В связи с этим высказывались мнения [64], что рост стрелы происходит под действием боковых сил, передаваемых на рельсы колесами подвижного состава. Но тогда куда же делись эти боковые силы, когда продольная сжимающая сила стала уменьшаться и при этом уменьшалась стрела изгиба рельсов? Делалась попытка объяснить это тем, что уменьшение стрелы происходит под влиянием упругих сил в балласте [64]. Но упругие свойства щебеночного балласта при движении поездов, как показали опыты [123], исчезают в результате релаксации. И как было показано выше, в разделе 2 настоящей диссертации, не оказывают существенного влияния на процесс деформирования.

Если проводить опыты на ползучесть в действующем пути с учетом влияния проходящих поездов, то нельзя найти U_y , как обычно делается в лабораторных условиях, первоначальную нагрузку на испытываемый образец материала или конструкции поделив на деформацию. Необходимо сначала полностью провести опыт на ползучесть, а затем при снятии нагрузки определить упругую отдачу. Нами были проведены такие опыты [109], где были определены коэффициенты вязкости ξ и мгновенные модули упругости U_y . При делении ξ на U_y получим время релаксации $t = \xi/U_y$. В этом случае вместо модели, соответствующей рисунку 4.12, получили бы модель в виде упругого продольно сжимаемого стержня не в идеально вязкой, а в упруго-вязкой среде. При этом, как показывали опыты [60], упругий и вязкий элементы, характеризующие реологические свойства балласта [137], должны располагаться последовательно. Это свойство балласта может быть описано моделью Максвелла (2.12) [60].

Учитывая (2.22) и (2.12), вместо (4.7) получим дифференциальное уравнение (2.63).

Из опытов [109] следует, что время релаксации – относительно малая величина – не более 2000 с. Решение уравнения (2.63) возможно только численными

методами. Опираясь на решение такого рода задачи, приведенное в [59], можно установить, что влияние смешанных производных пятого и третьего порядков на результат решения (2.63) может быть существенным только первые 5–10 часов. За такой короткий промежуток времени практически нельзя успеть заметить эту разницу, тем более принять какие-либо меры технологического характера. Результаты решения уравнений (4.7) и (2.63) не имеют существенных отличий. Таким образом, упругие свойства балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, можно не учитывать.

Чтобы определить вязкие свойства балласта, можно воспользоваться результатами опытов ВНИИЖТа, приведенными на рисунке 4.11. Для этого можно воспользоваться зависимостью $\xi(\tau)$ (1.37).

На каждом малом участке графика $F(\tau)$ (см. рисунок 4.11), осреднив значение температурной сжимающей продольной силы, нами были по (1.37) вычислены значения коэффициента вязкости ξ . Величина ξ в значительной степени зависит от количества поездов, прошедших на каждом из временных участков опытов ВНИИЖТа на Экспериментальном кольце. В те промежутки времени (до 2 часов), когда поездов не было, стрела изгиба f не изменялась. Значения ξ , по нашим расчетам по (1.37), оказались равными от $0,5 \cdot 10^6$ до $5 \cdot 10^6 \frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$. Средняя величина составила $2,75 \cdot 10^6 \frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$. Эти значения ξ оказались примерно на два порядка меньшими, чем значения, найденные опытами с одиночными шпалами на действующих участках бесстыкового пути. Объясняется эта разница тем, что на экспериментальном кольце более интенсивное движение поездов, а балласт в данном опыте был менее уплотненным. Таким образом, получено еще одно доказательство наличия вязких свойств балласта.

4.4. Выводы по главе 4

Опытами, проведенными на действующих участках пути с одиночными шпалами, сдвигаемыми в балласте вдоль и поперек оси пути, были найдены реологические константы, учитывающие фактор времени и воздействия поездов.

– Были проведены опыты на целых участках бесстыкового пути, подтверждающие наличие вязких свойств балласта при изменении продольных сил и деформаций.

– На основании опытов, проведенных на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа, был определен коэффициент вязкости балласта, еще раз было доказано существование вязких свойств в балласте. Это в свою очередь доказывает необходимость в расчетах бесстыкового пути на устойчивость использовать теорию ползучести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании решения задачи определения условий устойчивости бесстыкового пути при знакопеременном действии продольных сил в рельсовых плетях при суточных колебаниях температуры с учетом воздействия поездов раскрыт механизм и выявлены причины роста остаточных стрел изгиба рельсов в плане.

2. Учет упругой составляющей сопротивления балласта сдвигу шпал поперек оси пути показал, что механизм роста стрел изгиба рельсов бесстыкового пути в плане несущественно отличается от механизма, не учитывающего свойств упругости балласта.

3. Расчеты по методике, учитывающей воздействие поездов, показали, что при достаточно высокой температуре закрепления рельсовых плетей в течение нормативного периода между очередными проверками бесстыкового пути и при минимально удовлетворительной оценке его состояния, определяемой путеизмерителем, возможная скорость роста стрел изгиба рельсов в плане не представляет опасности для движения поездов.

4. В работе показано, что во время эксплуатации происходят изменения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути в зависимости от фактора времени и воздействия поездов. Особую опасность для движения поездов представляют концевые участки рельсовых плетей бесстыкового пути, где при изменениях температуры могут возникать значительные отступления от температуры закрепления в сторону ее понижения, особенно в период повышения температуры рельсов после длительного похолодания.

5. Значительные отступления от температуры закрепления в пределах концевых участков при изменениях температуры можно определить с помощью применения предложенного в работе графоаналитического метода построения эпюр продольных сил.

6. По предложенной в настоящей работе методике можно определить наличие вязких свойств балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, и через коэффициент вязкости дать их количественную оценку.

7. Из проведенных в работе исследований следует общий вывод о том, что наименьшая вероятность возникновения опасных для движения поездов отступлений в напряженно-деформированном состоянии бесстыкового пути обеспечивается применением рельсовых плетей длиной до перегона с сезонным перезакреплением их 400-метровых концевых участков.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы:

1. Представленные в работе результаты исследования изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и фактора времени могут быть использованы при корректировке нормативных требований для определения мест, опасных по условию устойчивости.

2. Результаты исследований могут быть использованы при корректировке нормативов для повышения устойчивости бесстыкового пути, они позволят персоналу, обслуживающему железнодорожный путь, при высоких температурах закрепления применять рельсовые плети длиной до перегона. При такой конструкции бесстыкового пути при сезонном перезакреплении только двух 400-метровых концевых участков существенно снижаются материальные и трудовые затраты на устройство, текущее содержание и ремонт бесстыкового пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новакович, В.И. Проблемы и перспективы развития бесстыкового пути / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 8, 9. – С. 8–11; 2–4.
2. Стецевич, И.Р. Об устойчивости железнодорожного пути / И.Р. Стецевич. – СПб. : Типография Ю.Н. Эрлих, 1897. – 73 с.
3. Кюннер, К.Э. Стабилизация рельсового пути, уничтожение зазоров и сварка стыков на магистральных железных дорогах / К.Э. Кюннер // Железнодорожное дело. – 1925. – № 8, 9. – 28 с.
4. Чистяков, Б.П. Термитная сварка рельсовых стыков на железнодорожных путях в СССР и за границей / Б.П. Чистяков. – М. : Транспечать НКПС, 1929. – 91 с.
5. Митюшин, Н.Т. Динамические напряжения в рельсах железнодорожного пути в кривых / Н.Т. Митюшин. – М., 1917. – 38 с.
6. Боченков, М.С. Исследование температурной работы концевых участков рельсовых плетей бесстыкового пути / М.С. Боченков // Труды ВНИИЖТа. – М., 1962. – Вып. 244. – С. 61–97.
7. Боченков, М.С. Продольные силы и деформации в бесстыковом пути с автоматической разрядкой температурных напряжений / М.С. Боченков // Вестник ВНИИЖТа. – 1957. – № 7. – С. 12–15.
8. Новакович, В.И. Быль и мысли инженера-путейца. Студенческие годы / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 37–40.
9. Новакович, В.И. Быль и мысли инженера-путейца. Дорожный мастер / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 7. – С. 35–40.
10. Новакович, В.И. Быль и мысли инженера-путейца. Заместитель начальника Красноармейской дистанции / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 38–40.
11. Итоги 17-й сессии Международной ассоциации железнодорожных конгрессов // Бюл. Международной ассоциации ж.д. конгрессов. – 1958. – № 11.

12. Бромберг, Е.М. Устойчивость бесстыкового пути / Е.М. Бромберг. – М. : Транспорт, 1964. – С. 66.
13. Ваттманн, И. Продольные силы в рельсовом пути. Бесстыковой железнодорожный путь / И. Ваттманн. – М. : Трансжелдориздат, 1959. – 183 с.
14. Бромберг, Е.М. Устойчивость бесстыкового пути под поездами. Совершенствование конструкции и эксплуатации бесстыкового пути / Е.М. Бромберг // Тр. ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1988. – С. 13–20.
15. Шульга, В.Я. Слово в пользу плетей длиной с перегон // В.Я. Шульга, В.А. Лаптев, В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 1985. – № 10. – С. 28–30.
16. Новакович, В.И. Бесстыковой путь с рельсовыми плетями неограниченной длины / В.И. Новакович. – Львов : Высшая школа, 1984. – 98 с.
17. Технические указания по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути : утв. 03.10.1991 / МПС. – М. : Транспорт, 1992. – 72 с.
18. Ермаков, В.М. Эффективность удлинения рельсовых плетей / В.М. Ермаков // Путь и путевое хозяйство. – 1998. – № 5. – С. 7–9.
19. Новакович, В.И. Рельсы для бесстыкового пути / В.И. Новакович, Л.А. Григорьева // Путь и путевое хозяйство. – 2001. – № 9. – С. 28–32.
20. Воробьев, Э.В. Особенности устройства и работы бесстыкового пути / Э.В. Воробьев, В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2003. – № 4. – С. 15–19.
21. Научные разработки, проложившие путь к «бархатному пути» / В.И. Новакович, А.Н. Игнатъев, Н.И. Залавский, Г.В. Карпачевский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2004. – № 3. – С. 102–104.
22. Новакович В.И. Об избыточной мощности современной конструкции верхнего строения железнодорожного пути / В.И. Новакович // Наука и транспорт. – СПб. : НП Принт, 2006. – С. 29–31.
23. Железнодорожный транспорт : энциклопедия / гл. ред. Н. С. Конарев. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1994. – 559 с.

24. Нужен рельс типа P58 / М.В. Новакович, Л.А. Кармазина, Г.В. Карпачевский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2006. – № 9. – С. 13–15.
25. Еще аргументы в пользу P58 / М.В. Новакович, Л.А. Кармазина, Г.В. Карпачевский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 1. – С. 11–12.
26. Боченков, М.С. Зазоры при изломе рельсовой плети / М.С. Боченков // Труды ЦНИИ МПС. – М., 1962. – Вып. 244. – С. 164–172.
27. Шахунянец, Г. М. Путь и путевое хозяйство / Г. М. Шахунянец. – М. : Трансжелдориздат, 1949. – 632 с.
28. Miklosi, C. Die Theorie des luckenlose Gleises als Grundlage lur die Durchfuhung von Versuchen / C. Miklosi // Deutsche Eisenbahntechnik. – 1958. – № 12.
29. Nemesdy, E.A. Sinvegek mozgaza es kialakitasa hezagmentes vasuti palyaknal / E.A. Nemesdy. – Budapest, 1958.
30. Сакмауэр, Л. Теоретические исследования бесстыкового пути / Л. Сакмауэр // Материалы конференции по бесстыковому пути в Татрах / перевод с чешского ЦНТБ МПС П7522.
31. Першин, С.П. Определение смещений концевого участка бесстыкового пути / С.П. Першин // Вестник ЦНИИ МПС. – 1960. – № 6. – С. 52–56.
32. Коган, А.Я. Графоаналитический метод определения продольных сил и деформаций в бесстыковом пути / А.Я. Коган // Вестник ЦНИИ МПС. – 1961. – № 3.
33. Мищенко, К.Н. Бесстыковый рельсовый путь / К.Н. Мищенко. – М. : Трансжелдориздат, 1950. – 88 с.
34. Amman, O. Langskrafte im Eisenbahngleis / O. Amman, C. Grunewaldt // VDI Zeitschrift. – 1929. – № 5.
35. Блох, А. Устройство бесстыкового пути / А. Блох // Organ. – 1932. – № 9.
36. Мартине, М.А. Продольный изгиб бесстыкового пути и рельсы большой длины / М.А. Мартине // Revue General des Chemen de Fer. – 1936. – № 4. – С. 212–231.

37. Брокман, В. Устойчивость пути против изгиба / В. Брокман // Delft, Waltman, 1913.
38. Corini, F. Track laying for high speeds / F. Corini // Bul. Int. Ry Congr. Assn. – 1936. – № 4.
39. Першин, С.П. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути / С.П. Першин // Путь и путевое хозяйство: труды МИИТа / ред. Г.М. Шахунянц. – М., 1962. – Вып. 147. – 97 с.
40. Новакович, В.И. Расчет устойчивости бесстыкового пути неоправданно усложнен / В.И. Новакович, Н.И. Залавский // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – № 10. – С. 27–28.
41. Сакмауэр, Л. Теоретические исследования бесстыкового пути при разных способах и системах верхнего строения пути в ЧССР / Л. Сакмауэр / Исследовательский институт железнодорожного транспорта. – Братислава, 1958/59. – 123 с.
42. Немчек, И. Н. О выбросе бесстыкового пути / И.Н. Немчек // ETR. – 1960. – № 12. – С. 9–12.
43. Леви, Р. Продольная устойчивость бесстыкового пути / Р. Леви // Genie civil. – 1932. – № 2610.
44. Мейер, Г. Упрощенный метод теоретического исследования выброс рельсового пути / Г. Мейер // Organ. – 1937. – № 20. – С. 65.
45. Грюневальдт, К. Теория устойчивости и предложения по повышению устойчивости бесстыкового пути / К. Грюневальдт // Organ. – 1931. – № 4.
46. Рубин, Г. Устойчивость новых и старогодных сплошь сваренных рельсов против выброса / Г. Рубин // Eisenbahntechnische Rundschau. – 1955. – № 9.
47. Рааб, Ф. Устойчивость бесстыкового пути / Ф. Рааб // ETR. – 1958. – № 11/12.
48. Нумато, М. Устойчивость железнодорожного пути / М. Нумато // Ry Engineering Research. – 1957. – № 9.
49. Немешди, Э. Расчет горизонтальной устойчивости бесстыкового пути / Э. Немешди // Ordan. – 1932. – № 7. – С. 58.

50. Кривободров, А.А. Устойчивость железнодорожного пути при температурном воздействии на рельсы / А.А. Кривободров // Труды ЛИИЖТа. – 1952. – Вып. 144. – С. 23–47.
51. Энгель, Э. Устойчивость бесстыкового пути в условиях изменения температуры / Э. Энгель // Zeitschrift Bd. 102. – 1960. – № 10. – С. 41.
52. Новакович, В.И. О влиянии площади и формы поперечного сечения рельсов на устойчивость бесстыкового пути / В.И. Новакович // Труды ХИИТа. – Харьков, 1963. – Вып. 66. – С. 21–26.
53. Новакович, В.И. Устойчивость бесстыкового пути / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 12. – С. 2–5.
54. Вериго, М.Ф. Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути / М.Ф. Вериго // Труды ВНИИЖТа. – М. : Интекст, 2000. – 184 с.
55. Вериго, М.Ф. Создание нормативной базы для повышения устойчивости бесстыкового пути и расширения сфер его применения / М.Ф. Вериго // Железные дороги мира. – 1996. – № 6. – С. 41–49.
56. Коган, А.Я. Продольные силы в железнодорожном пути / А.Я. Коган // Труды ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1967. – Вып. 332. – 168 с.
57. Новакович, В.И. Сопротивление железобетонных шпал поперечным осевым перемещениям с учетом воздействия поездов / В.И. Новакович, В.В. Ершов // Труды ДИИЖТ. – 1981. – Вып. 216. – С. 18–25.
58. Новакович, В.И. Исследование продольных сил и перемещений в плетях / В.И. Новакович, В.В. Ершов, Г.В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – № 9. – С. 10–12.
59. Новакович, М.В. Реологическая модель бесстыкового пути / М.В. Новакович, Л.В. Данилова, В.Г. Плахова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 3. – С. 141–145.
60. Новакович, В.И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями : учеб. пособие / В.И. Новакович. – М. : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 166 с.

61. Новакович, В.И. А воз и ныне там / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 10.
62. Дутаев, Х.Х. Особенности устройства, укладки, содержания и ремонта бесстыкового пути на конечных участках рельсовых плетей и с их учетом разработка технических решений : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Дутаев Хаважи Хамзатович ; науч. консультант В.И. Новакович. – Ростов н/Д ; РГУПС, 2006. – 120 с.
63. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утв. 31.03.2000 / МПС. – М. : Транспорт, 2001. – 94 с.
64. Еще раз о теории ползучести в расчетах бесстыкового пути / Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский, Х.Х. Дутаев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 7. – С. 8–9.
65. Ангелейко, В.Н. О целесообразности применения теории ползучести к расчету устойчивости бесстыкового пути / В.И. Ангелейко, Н.М. Зоткин // Вестник ВНИИЖТа. – 1990. – № 2. – С. 46–47.
66. Коган, А.Я. Еще раз о целесообразности применения теории ползучести в расчетах устойчивости бесстыкового пути / А.Я. Коган, М.Ф. Вериго // Вестник ВНИИЖТа. – 1999. – № 5. – С. 12–17.
67. Ржаницын, А.Р. Теория ползучести / А.Р. Ржаницын. – М. : Наука, 1968. – 419 с.
68. Новакович, М.В. О двух основных задачах расчета бесстыкового пути / М.В. Новакович, Г.В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 13–15.
69. Новакович, М.В. Зазор при учете времени эксплуатации / М.В. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 11. – С. 15
70. Новакович, В. И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 11. – С. 2–4.
71. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утв. 14.11.2016, № 2288р / ОАО «РЖД». – 286 с.

72. Вериго, М.Ф. Динамические модели устойчивости бесстыкового пути / М.Ф. Вериго // Железные дороги мира. – 1994. – № 10. – С. 3–9.
73. Виногоров, Н.П. Устойчивость бесстыкового пути / Н.П. Виногоров // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 7, 8. – С. 7–13; 20–25.
74. Ершов, В.В. Устойчивость бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и разработка технологий по ее обеспечению : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.06 / Ершов Валентин Васильевич ; науч. консультант В.И. Новакович. – Самара : СамГАПС, 2003. – 288 с.
75. Залавский, Н.И. Устранить ошибки и противоречия в ТУ / Н.И. Залавский // Путь и путевое хозяйство – 2005. – № 10. – С. 27–29.
76. А.с. 312914 СССР. Путьеизмеритель железнодорожного транспорта / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган, Д.С. Ромен. – № 1404209/27-11 ; Заявл. 06.11.70 ; Оpubл. 31.08.71. – Бюл. № 26. – 6 с.
77. Ершов, В.В. Аналитический метод определения устойчивости бесстыкового пути / В.В. Ершов // Путь и путевое хозяйство. – 2006. – № 6. – С. 10–12.
78. Новакович, В.И. О принципах обеспечения устойчивости бесстыкового пути при расширении сфер его применения / В.И. Новакович // Вестник ВНИИЖТа. – 1999. – № 1. – С. 8–12.
79. Новакович, В.И. Короткие неровности в плане – фетиш / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 9. – С. 19.
80. Возможно ли содержание пути с 25-метровыми рельсами без температурных напряжений? / Г. В. Карпачевский, М.В. Новакович, Е.Н. Зубков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 31–32.
81. Влияние формы и площади поперечного сечения рельса на устойчивость бесстыкового пути / Н.И. Залавский, М.В. Новакович, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 22–23.
82. Инструкция по устройству, укладке и содержанию, и ремонту бесстыкового пути : утв. 14.12.2016, № 2544 / ОАО «РЖД». – 176 с.

83. Об опасностях невидимой части «айсберга» / Г.В. Карпачевский, Б.С. Бабадеев, А.В. Варданын [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 30–33.
84. Хошино, И. Перемещения длинных рельсовых плетей на эксплуатируемых участках / И. Хошино // Permanent Way. – 1960. – № 7.
85. Несвит, В.А. О некоторых результатах эксплуатационных наблюдений за поведением плетей бесстыкового пути / В.А. Несвит // Строительство и эксплуатация железнодорожного пути. – Киев, 1975.
86. Натяжители или нагреватели? / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 6. – С. 21–22.
87. Напряженные и ненапряженные неровности / Н.И. Залавский, М.В. Новакович, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 23–25.
88. Когда может быть потеряна температура закрепления? / Г.В. Карпачевский, М.В. Новакович, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 29–30.
89. Как восстанавливать плети сваркой, обеспечивая температурный режим? / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко, А.В. Варданын [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 5–6.
90. А.с. 226754 СССР. Способ сварки стержней / Е.В. Мазница, В.Ф. Сушков, А.М. Литвинов, В.И. Новакович, Г.А. Худяков. – Оpubл. 00.00.1972, Бюл. № 27.
91. Пат. № 2291240 РФ. Способ соединения рельсовых плетей бесстыкового пути / В.И. Новакович, А.Н. Игнатьев, Н.И. Залавский, А.Б. Киреевнин, Г.В. Карпачевский. – 2004. – 5 с.
92. Вкатывание гребня колеса на рельс или сдвиг рельсошпальной решетки? / В.И. Новакович, Н. И. Залавский, Г. В. Карпачевский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 16–19.

93. Шахунянец, Г.М. Железнодорожный путь / Г.М. Шахунянец. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.
94. Вериго, М.Ф. Установление норм боковых динамических нагрузок подвижного состава по условию устойчивости пути поперечному сдвигу / М.Ф. Вериго, С.С. Крепкогорский // Труды ЦНИИ МПС, 1962. – Вып. 248. – С. 210–302.
95. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е.М. Бромберг, М.Ф. Вериго, В.Н. Данилов, М.А. Фришман // Труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.
96. Марье, Ж. Взаимодействие пути и подвижного состава / Жорж Марье. – Госжелдориздат, 1933. – 338 с.
97. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н.И. Карпущенко, С. И. Клинов [и др.]. – М. : Транспорт, 1999. – 405 с.
98. Проектирование и расчеты железнодорожного пути / В.В. Виноградов, А.М. Никонов [и др.] – М. : Маршрут, 2003. – 486 с.
99. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : утв. 14.10.1997, ЦП-515 / МПС России. – 34 с.
100. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения (взамен ЦП-515). – М., 2013. – 54 с.
101. Певзнер, В.О. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения / В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен // Труды ОАО «ВНИИЖТ». – М. : Интекст, 2013. – 224 с.
102. Коган, А.Я. Устойчивость бесстыкового пути по условию сдвига рельсошпальной решетки под проходящими поездами с учетом трения / А.Я. Коган, О.А. Суслов, И.В. Полищук // Вестник ВНИИЖТа. – 2012. – № 2. – С. 22–26.

103. Новакович, В.И. Методика, метод или методология? / В.И. Новакович, Н.И. Залавский, Г. В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 11. – С. 38–39.
104. Zimmermann, K. Zentralblatt d.Bauverwaltung / K. Zimmermann. – Berlin, 1906.
105. Тимошенко, С.П. Курс сопротивления материалов / С.П. Тимошенко. – 11-е изд. – М.-Л. : Государственное научно-техническое издательство, 1931. – 588 с.
106. Бромберг, Е.М. Экспериментальное изучение устойчивости бесстыкового пути / Е.М. Бромберг // Бесстыковой путь : труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244. – С. 129–163.
107. Карпачевский, В.В. Определение сопротивлений новой железобетонной шпалы сдвигу поперек оси пути / В.В. Карпачевский, И.С. Бабадеев, А.А. Киреевнин // Безопасность движения поездов : тр. XI науч.-практ. конф. / МИИТ. – Москва, 2010. – С. 2.
108. Пат. № 2433218 РФ. Железобетонная шпала / В.И. Новакович, И.С. Бабадеев, А.А. Киреевнин. – Оpubл. Б.И., 10.11.2011. – 1 с.
109. Карпачевский, В.В. Сравнение испытаний железобетонной шпалы / В.В. Карпачевский, И.С. Бабадеев, А.А. Киреевнин // Транспорт-2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф., май 2011 г. В 3 ч. Ч. 2. Технические науки / РГУПС. – Ростов н/Д, 2011. – С. 219–221.
110. Зверев, Н.Б. Экспериментальное исследование работы бесстыкового пути / Н.Б. Зверев // Труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244. – С. 46–60.
111. Боченков, М.С. Исследование температурной работы концевых участков рельсовых плетей бесстыкового пути / М.С. Боченков // Труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244. – 176 с.
112. Ватманн, И. Бесстыковой железнодорожный путь / И. Ватманн. – М. : Трансжелдориздат, 1959.

113. Бесстыковой путь / под ред. Е.М. Бромберга // Труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244. – 215 с.
114. Технические условия на укладку и содержание бесстыкового пути : утв. 18.04.1962 / Главное управление пути и сооружений МПС. – М. : Всесоюз. издат.-полиграф. объединение МПС, 1963. – 85 с.
115. Маркарьян, М.А. Сопротивление бесстыкового пути перемещениям / М.А. Маркарьян, Н.Б. Зверев // Труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244. – С. 19–45.
116. Зверев, Н.Б. Стыкование длинных рельсовых плетей / Н.Б. Зверев // Труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244. – С. 97–120.
117. Технические условия на укладку и содержание бесстыкового пути : утв. 23.05.1969 / Главное управление пути МПС. – М. : Транспорт, 1970.
118. Технические условия на укладку и содержание бесстыкового пути : утв. 03.10.1979 / Главное управление пути МПС. – М. : Транспорт, 1982.
119. Хадукаев, А.С. О необходимости восстановления плетей сваркой и ликвидации уравнильных пролетов / А.С. Хадукаев // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 26–27.
120. Дутаев, Х.Х. Сопротивления продольным перемещениям рельсов в стыках / Х.Х. Дутаев // Путь и путевое хозяйство. – 2006. – № 11. – С. 28–29.
121. Варданян, А.В. Каким должен быть железнодорожный путь в Армении / А.В. Варданян // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 8. – С. 32–33.
122. А.с. 939621 СССР. Устройство для определения сопротивления перемещению шпал / В.И. Новакович, В.В. Ершов – Оpubл. в Б.И., 1982. № 24. – 3 с.
123. Шахунянц, Г.М. Железнодорожный путь / Г.М. Шахунянц. – М. : Трансжелдориздат, 1961. – 616 с.
124. Предложения по изменению проекта Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути / Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 15.

125. Корниенко, Е. В. Эволюция развития методов расчета бесстыкового пути на устойчивость [Текст] / Е. В. Корниенко // Транспорт-2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф., май 2011 г. В 3-х частях / РГУПС. – Ростов н/Д, 2011 – Ч. 2 : Технические науки. – С. 227–229.
126. Реологическая модель расчета бесстыкового пути на устойчивость / М.В. Новакович, В.В. Карпачевский, В.В. Шубитидзе, Е.В. Корниенко [и др.] // Транспорт-2013 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. Естественные и технические науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2013. – С. 46–48.
127. Новакович, М.В. Графоаналитическое определение напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, А.С. Хадукаев // Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России : тр. Междунар. науч.-практ. конф., междунар. форума Транспорт Юга России, посвящ. 85-летию РГУПС, 20–21 ноября 2014 г. В 3 ч. Ч. 2. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 114–116.
128. Новакович, М.В. Графоаналитический метод определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, А.С. Хадукаев // Транспорт-2015 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 64–66.
129. Корниенко, Е.В. Графоаналитический метод определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и фактора времени / Е.В. Корниенко // Труды РГУПС. – 2016. – № 4. – С. 35–42.
130. Новакович, М.В. Напряженно-деформированное состояния бесстыкового пути при учете и без учета воздействия поездов / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, А.С. Хадукаев // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 11–16.
131. Об особенностях работы концевого участка бесстыкового пути / Г.В. Карпачевский, М.В. Новакович, В.Н. Залавский, В.В. Шубитидзе, Е.В. Кор-

- ниенко // Транспорт-2016 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Т. 4. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – С. 52–54.
132. Корниенко, Е.В. Графоаналитический метод определения изменений продольных сил в рельсах бесстыкового пути / Е.В. Корниенко // Транспорт-2016 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Т. 4. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – С. 67–72.
133. Расчет бесстыкового пути на устойчивость энергетическим методом с учетом фактора времени и воздействия поездов / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, В.В. Карпачевский [и др.] // Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава : тр. Междунар. науч.-практ. конф. / ДНУЖТ. – Днепропетровск, 2013. – С. 15–18.
134. Корниенко, Е.В. Устойчивость бесстыкового пути и вязкость балласта / Е.В. Корниенко // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 10–13.
135. Корниенко, Е.В. Устойчивость пути и вязкость щебеночного балласта / Е.В. Корниенко // Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России : тр. Междунар. науч.-практ. конф., междунар. форума Транспорт Юга России, посвящ. 85-летию РГУПС, 20–21 ноября 2014 г. В 3 ч. Ч. 2. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 98–100.
136. Корниенко, Е.В. Устойчивость бесстыкового пути с учетом вязкости щебеночного балласта / Е.В. Корниенко // Транспорт-2015 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 44–46.
137. Корниенко, Е.В. Определение реологических свойств балласта, сдвигаемого железобетонными шпалами поперек оси пути / Е.В. Корниенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2. – С. 82–86.
138. Корниенко, Е.В. Изменение напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути с учетом воздействия поездов / Е.В. Корниенко // Транс-

- порт-2017 : тр. Междунар. науч.-технич. конф., 18–19 апр. Т. 2. Технические науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – С. 269–273.
139. Обоснование «оптимальной» температуры закрепления рельсовых плетей / Г.В. Карпачевский, Е.Н. Зубков, В.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко [и др.] // Наука-2017 : тр. Всерос. нац. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – С. 141–144.
140. Новакович, М.В. О вяжущих материалах для щебеночного балласта / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, В.В. Шубитидзе // Наука–2017 : тр. Всерос. нац. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – С. 161–163.
141. Савин, А.В. Условия применения безбалластного пути : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.06 / Савин Александр Владимирович ; науч. консультант А.Я. Коган ; ВНИИЖТ – М., 2017. – 444 с.
142. Суслов, О.А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.06 / Суслов Олег Александрович ; науч. консультант А.Я. Коган ; ВНИИЖТ. – М., 2017. – 241 с.
143. О способе обнаружения опасных мест в бесстыковом пути по условиям устойчивости / В.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко, В.В. Шубитидзе, [и др.] // Транспорт-2018 : тр. Междунар. науч.-технич. конф., 17–20 апр. Т. 2. Технические науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2018. – С. 266 – 269.



Проректор по учебной работе –
начальник УМУ

М.А. Кравченко

«21» июня 2018 г.

АКТ

об использовании диссертационного исследования Корниенко Елены Владимировны «Особенности напряженно- деформированного состояния бесстыкового пути при учете воздействия поездов» в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС

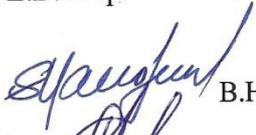
Мы, ниже подписавшиеся, декан Строительного факультета, к.т.н., доц. Малозёмов В.Н., начальника отдела докторантуры и аспирантуры, к.т.н., доц. Костюков А.В., заведующий кафедрой, к.т.н., доц. Карпачевский Г.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования, представленные на соискание учёной степени кандидата технических наук Корниенко Елены Владимировны, используются в учебном процессе по специальности 23.05.06 – «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» в учебно-методическом комплексе для студентов очной и заочной форм обучения в лекциях рабочих программ по дисциплинам «Проектирование и расчет элементов верхнего строения железнодорожного пути» в разделе 3.1. Локальные изменения продольных сил: Решение дифференциальных уравнений при начальном условии локального отступления от равномерного распределения продольной силы в рельсах, а также в дисциплине «Реология бесстыкового пути и ее практические приложения» в разделах 3.1. Изменения продольных сил на концевом участке плети и 4.1. Учет изменений локального пика продольных сил, читаемой магистрантам по направлению 08.04.01 «Строительство» по профилю «Проектирование, сооружение и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры». В учебных пособиях «Проектирование и расчет элементов верхнего строения железнодорожного пути» в разделах 3.3. Законы изменения продольных сил и перемещений в бесстыковом пути (стр. 58-71) и 5. Практические выводы и рекомендации (стр. 106-113), «Реология бесстыкового пути и ее практические приложения» в разделах 2.2.1. Изменения продольных сил на концевом участке плети (стр. 39-44) и 3.2. Учет изменений локального пика продольных сил (стр. 53-54).

Разделы диссертации, использованные в учебном процессе, основаны на материалах, опубликованных в следующих статьях соискателя:

1. Корниенко, Е.В. Определение реологических свойств балласта, сдвигаемого железобетонными шпалами поперек оси пути / Е.В. Корниенко // Вестник РГУПС. – 2014. – № 2. – С. 82-86.

2. Новакович, М.В. Напряженно-деформированное состояния бесстыкового пути при учете и без учета воздействия поездов / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, А.С. Хадукаев // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – №2. – С. 11-16.

3. Корниенко, Е.В. Графоаналитический метод определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и фактора времени / Е.В. Корниенко // Труды РГУПС.– 2016. – №4. – С. 35-42.

Декан Строительного факультета, к.т.н., доц.  В.Н. Малоземов

Начальник отдела «Д и А», к.т.н., доц.  А.В. Костюков

Заведующий кафедрой ППХ, к.т.н., доц.  Г.В. Карпачевский

Утверждаю:
Заместитель начальника по
эксплуатации Северо-Кавказской
дирекции инфраструктуры –
филиал Центральной дирекции
ОАО «РЖД»
К.С. Щерблякин
«09» 2019 г.

АКТ

**использования результатов и рекомендации, разработанных в
диссертационной работе соискателя Корниенко Е.В. на тему
«Особенности напряженно-деформированного состояния бесстыкового
пути при учете воздействия поездов» в Северо-Кавказской дирекции
инфраструктуры по эксплуатации – филиала Центральной дирекции
ОАО «РЖД»**

Мы нижеподписавшиеся: начальник технического отдела службы пути Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры – филиала Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» Кордубайлова Л.П., зав. кафедрой «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС, к.т.н., доцент Карпачевский Г.В., д.т.н., профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС Новакович В.И., автор предложения, инженер Корниенко Е.В. составили настоящий акт о том, что в Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований Корниенко Е.В. в плане внедрения разработанных автором предложений по ограничению допустимых отклонений от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути для обеспечения устойчивости пути.

Выполненные Корниенко Е.В. исследования позволили:

а) сформулировать критерии оценки продольных сил в рельсовых плетях для определения условий устойчивости бесстыкового пути с учётом воздействия поездов и фактора времени при сезонном знакопеременном изменении температуры.

б) определять потенциально опасные места по напряженно-деформированному состоянию бесстыкового пути с помощью графоаналитического метода.

Предложение Корниенко Е.В., основанные на разработанном методе расчёта, заключается в принятии следующих мер по предотвращению негативных последствий:

- в весенний период при повышении температуры рельсов после длительного похолодания на концевых участках рельсовых плетей бесстыкового пути возникают избыточные сжимающие продольные температурные силы, которые могут вызвать потерю устойчивости при производстве путевых работ, в связи с чем рекомендуется планировать работы связанные с ослаблением связи рельсошпальной решётки с балластом во второй половине рабочего дня с обязательным ограждением места работ сигналами остановки поезда;

- в осенний и зимний периоды на концах рельсовых плетей из-за избыточных растягивающих продольных сил при понижении температуры рельсов стыковые болты работают на срез. Для предотвращения разрыва стыка предлагается заменить уравнительный рельс на удлиненный, который весной заменяется на прежде изъятый, что действующими нормами не предусмотрено.

Начальник технического отдела службы пути
Северо-Кавказской дирекции
инфраструктуры – филиала Центральной
дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД»



Л.П. Кордубайлова

Зав. кафедрой
«Путь и путевое хозяйство»
ФГБОУ ВО РГУПС, к.т.н., доцент



Г.В. Карпачевский

Профессор кафедры
«Путь и путевое хозяйство»
ФГБОУ ВО РГУПС, д.т.н., профессор



В.И. Новакович

Автор предложения, инженер



Е.В. Корниенко

УТВЕРЖДЕНА
распоряжением ОАО «РЖД»
от 29 декабря 2012 г. №2788р

**ИНСТРУКЦИЯ ПО УСТРОЙСТВУ, УКЛАДКЕ, СОДЕРЖАНИЮ
И РЕМОНТУ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ**

Москва, 2012 г.

ровностей пути в плане следует срочно оградить место неисправности сигналами остановки и немедленно приступить к устранению неисправности.

При отклонении пути в плане по обеим рельсовым нитям на 10 мм и более на длине не более 8÷15 м и превышения температуры рельсовых плетей относительно их температуры закрепления менее чем на 15°C, но при обязательном дальнейшем повышении температуры, необходимо ограничить скорость движения поездов до 60 км/ч и устранить эти отклонения после разрядки в плетях напряжений.

Разрядка напряжений производится в обеих плетях от места неровности до ближайшего конца плети. При расстоянии от места неисправности (угол, короткая неровность в плане) до конца плети более 150 м разрядка напряжений производится путем вырезки куска рельса по обеим рельсовым нитям в соответствии с требованиями П.4.1.

4.1.5 С наступлением положительных температур рельсов необходимо обеспечить постоянный анализ изменения отступлений пути в плане по данным графических диаграмм путеизмерительных вагонов. При этом в период действия положительных температур рельсов (май-сентябрь) проверка путеизмерительными вагонами должна преимущественно производиться в дневное время суток. В случаях выявления в период между двумя проходами путеизмерительного вагона увеличенной разности стрел неровностей в плане на 10 мм и более необходимо принять меры по снятию продольных сил в рельсовых плетях и определить фактическую температуру их закрепления на участках, где наблюдается интенсивный рост величины отступлений пути в плане. Снятие продольных сил (разрядка напряжений) производится в плетях, где расстояние от их концов до отступления пути в плане не превышает 150 м.

При расстоянии от концов плети до отступления пути в плане более 150 м, если при визуальном осмотре пути не обнаружено грубых нарушений в его состоянии (угол плетей, не заполнена балластная призма и т.д.), до наступления разности в 15°C между температурой рельса и температурой закрепления плетей устранение отступлений можно выполнить после регулировки напряжений в

плетях на участке 100 м + неровность + 100 м. Регулировка напряжений выполняется по ходу движения поезда.

В случаях, если разность между температурой закрепления плети и температурой ее перед устранением отступления пути в плане равна 15°C и более по обеим рельсовым нитям, за 2-3 м до начала неровности (по ходу движения поездов) необходимо выполнить разрезку каждой рельсовой нити бензорезом и отрыхловать путь. Перед разрезкой плетей на каждой рельсовой нити на расстоянии 1,5÷2,0 м от места планируемого реза (рисунок 4.1), необходимо нанести риски на рельсах и на шпалах, а на расстоянии 50 м от них (по ходу движения поезда) нанести на рельсах и шпалах вторые риски. После разреза и раскрепления 50-метрового участка плети необходимо определить абсолютную величину его удлинения или укорочения.

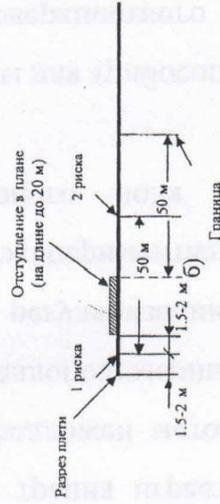


Рисунок 4.1

Изменения длины 50-метрового участка с точностью до 1 мм определяются по разнице перемещений двух рисков. В это же время производятся замеры температуры рельса (t_p).

Фактическая температура закрепления плети $t_{фп}$ вычисляется по известной зависимости:

$$t_{фп} = t_p \pm \Delta l / \alpha l,$$

где «+» - уменьшение длины 50-метрового участка, а «-» - увеличение;

Δl - изменение длины 50-метрового участка, мм;