

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

На правах рукописи

Шубитидзе Виктория Викторовна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО
ПУТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С УЧЕТОМ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ**

Специальность: 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание
и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Новакович Василий Иванович

Ростов-на-Дону

2017

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ..	13
1.1. О происхождении, развитии и преимуществах энергетического метода расчета механических систем	13
1.2. О задаче Эйлера и ее следствиях	16
1.3. Предпосылки и допущения, применяемые в энергетическом методе для определения устойчивости упругих стержней	23
1.4. Выводы по главе 1	37
2. СОПРОТИВЛЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА ПОПЕРЕЧНЫМ ОСИ ПУТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ	38
2.1. Исследования, проведенные в области определения механических характеристик, необходимых для расчета бесстыкового пути на устойчивость.....	38
2.2. Выводы по главе 2.....	71
3. МЕТОД РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИНЦИПЕ ВОЗМОЖНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЕЗДОВ	72
3.1. Обоснование предпосылок и допущений для применения энергетического метода расчета бесстыкового пути на устойчивость.....	72
3.2. Энергетический метод расчёта устойчивости бесстыкового пути с учётом воздействия поездов	84
3.3. Выводы по главе 3	97
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В НОРМАТИВАХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ	98

4.1. Нормативные условия прочности рельсов и их влияние на условия устойчивости бесстыкового пути	98
4.2. Минимизация влияния нормативных условий прочности стыковых болтов на условия устойчивости бесстыкового пути	102
4.3. Влияние на условия устойчивости бесстыкового пути площади и формы поперечного сечения рельсов	105
4.4. Определение оптимального температурного режима работы бесстыкового пути	109
4.5. Выводы по главе 4	114
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	115
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	129
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	130
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	135
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. На Российских железных дорогах бесстыковой путь является основной конструкцией верхнего строения. Он занимает около 90 тыс. км протяженности главного пути, это примерно 75 % общей развернутой протяженности действующих участков железнодорожного пути России.

Преимущество бесстыкового пути обуславливается не только экономией трудовых затрат – снижением расходов на текущее содержание пути и подвижного состава, но рядом технологических достоинств. Так, из-за отсутствия стыков в пути снижается сопротивление движению и более надежно работают рельсовые электрические цепи, а также уменьшаются шум и загрязнение окружающей среды.

Однако ежегодно происходят сходы подвижного состава по причине нарушения устойчивости рельсошпальной решетки в летний период при повышении температуры рельсов. Потеря устойчивости железнодорожной колеи с возникновением изгиба рельсов в горизонтальной плоскости приводит к сходу подвижного состава.

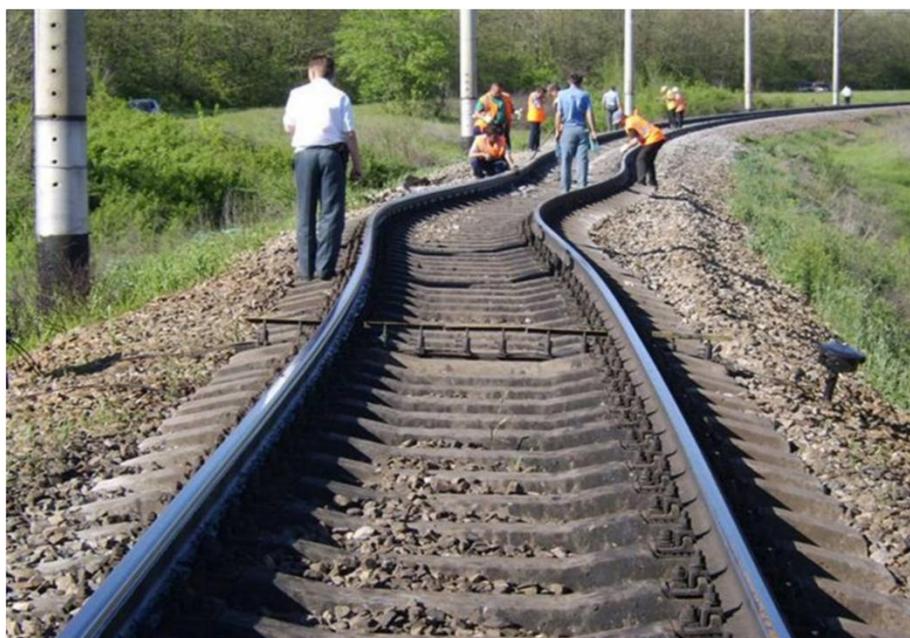


Рисунок 0.1. Вид бесстыкового пути потерявшего устойчивость

Таким образом острой проблемой в области бесстыкового пути является обеспечение продольной устойчивости рельсошпальной решетки при действии в рельсах сжимающих температурных сил [1] (рис. 0.1).

Одной из причин этого, является отсутствие в нормативных документах учета влияния воздействия поездов на железнодорожный путь. Теоретические основы расчетов бесстыкового пути на устойчивость, полученные энергетическим методом, не учитывали воздействия поездов, что в определенной степени искажало фактически происходящий процесс.

Поэтому, актуальной задачей является разработка энергетического метода определения устойчивости бесстыкового пути с учетом воздействия поездов, что приближает результат расчета к фактически наблюдаемому процессу. Этим создается условие для разработки нормативов с более надежным обеспечением безопасности движения поездов.

Степень разработанности темы. Вопросу обеспечения устойчивости бесстыкового пути на протяжении последнего столетия уделялось пристальное внимание во всех технически развитых странах мира, и в настоящее время решению этой проблемы посвящено большое количество исследований. В частности, теме обеспечения устойчивости бесстыкового пути только в последние 15 лет посвящены: докторская диссертация В.В. Ершова [2] (2003 г.), кандидатские диссертации А.В. Савина [3] (2002 г.), О.А. Сулова [4] (2004 г.), Н.И. Залавского [5] (2007 г.), Е.А. Манюгиной [6] (2012 г.), Д.В. Овчинникова [7] (2014 г.), В.В. Карпачевского [8] (2014 г.), В.В. Атапина [9] (2015 г.). За это же время издано несколько десятков журнальных статей, посвященных вопросу обеспечения устойчивости бесстыкового пути и определению предотказного состояния с помощью предлагаемых способов его мониторинга [21, 79, 81-84, 87, 88, 106-115]. Причём следует отметить два подхода к решению задачи по определению условий устойчивости бесстыкового пути. Большинство авторов, решавших задачу определения условий устойчивости бесстыкового пути, пользовались методами

решения дифференциальных уравнений. Из этих авторов можно отметить Р. Леви [15] (1932 г.), М. Мартине [16] (1936 г.), Х. Мейера [17] (1937 г.), Ф. Рааба [18] (1958 г.), А.Я. Когана [19] (1967 г.), М.Ф. Вериго [1] (2000 г.), В.О. Певзнера, Ю.С. Ромена [23] (2013 г.), А.А. Кривободрова [26] (1952 г.), В.И. Новаковича [20] (1976 г.) и др. Другой подход – энергетический метод расчета бесстыкового пути, который ранее применяли К.Н. Мищенко [10] (1950 г.), С.П. Першин [11] (1962 г.), Ц. Грюнвальдт [12] (1931 г.), А. Блох [13] (1932 г.), М. Нумато [14] (1957 г.) и др., но из перечисленных авторов никто не учитывал воздействие поездов. Таким образом, представляется целесообразным в данной работе внести ясность в решение задачи об определении устойчивости бесстыкового пути применением энергетического метода его расчета с учетом воздействия поездов.

Известно [96], что энергетический метод расчета сооружений основан на принципе возможных перемещений – принципе Д’Аламбера – Лагранжа. Исследование этого принципа сводит решение стоящих задач расчета сооружений методами теоретической механики к простым формулам, которыми, в частности, можно подтвердить или опровергнуть ранее полученные решения, найденные другими методами.

Методы теоретической механики в расчетах сил и перемещений рассматривают процессы только абсолютно твердых тел. В связи с этим можно было бы предположить, что задачу об устойчивости рельсошпальной решетки, которая находится в балласте, нельзя решать в пределах методов, используемых теоретической механикой. Балласт никак не может быть назван абсолютно твердым, принято считать балласт пластическим или вязким телом. Однако границы между методами, использующимися в механике сплошных сред – «чистую» теоретическую механику и строительную механику, не могут быть абсолютно жесткими. Теория расчета сооружений делится на три раздела [22]: теория упругости, теория пластичности и теория ползучести. Теория

ползучести является наиболее общей, в которой в отличие от двух первых силы и перемещения рассматриваются изменяющимися во времени.

В данной диссертации необходимо было рассмотреть процессы изменения конфигурации рельсошпальной решетки, находящейся в щебеночном балласте, т.е. в сыпучей среде, которая под действием продольных сил в рельсах деформируется с течением времени. Сопротивления перемещениям рельсошпальной решетки в балласте можно рассматривать как распределенную реактивную силу и таким образом решать задачу по определению этой реактивной силы в пределах методов теоретической механики, в частности энергетическим методом. А затем отдельно рассмотреть процесс деформирования балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути под действием сил, возникающих в рельсах, с помощью методов теории ползучести.

Именно такой подход к решению стоящей проблемы применен в настоящей представляемой к защите диссертации.

Цель работы – определение закономерностей и причин потери устойчивости бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и на этой основе разработка научно обоснованной нормативной базы для определения допускаемых отступлений от температуры закрепления рельсов бесстыкового пути энергетическим методом.

Поставленная цель достигается решением следующих основных **задач**:

1. На основании анализа известных подходов применения энергетического метода определения условий устойчивости бесстыкового пути установить необходимые предпосылки и допущения для разработки расчетной схемы и математической модели, учитывающих воздействия поездов.

2. Определить способ экспериментального установления параметров сопротивления щебеночного балласта поперечным оси пути перемещениям

железобетонных шпал под действием сил, передаваемых от рельсов при изменении температуры.

3. Разработать математическую модель расчета величины и скорости роста стрел изгиба рельсов бесстыкового пути в плане во времени под действием продольных сил с учетом воздействия поездов при разных температурах закрепления.

4. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований сформулировать практические рекомендации по определению допускаемых отступлений от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути.

Методы и методологии исследования основаны на использовании математического аппарата дифференциального и интегрального исчисления, современных технологий проведения эксперимента, статистической обработки экспериментальных данных.

В основу предложенного в работе энергетического метода расчета положен принцип Д'Аламбера – Лагранжа. Используются методы применения этого принципа к расчетам железнодорожного пути. Учтены методики расчета сил и деформации отечественных и зарубежных ученых в области, непосредственно касающейся бесстыкового пути.

Научная новизна заключается в разработке энергетического метода определения устойчивости бесстыкового пути с учетом воздействия поездов. К наиболее значимым результатам относятся:

1. Разработана математическая модель бесстыкового пути, позволяющая учесть воздействие поездов на путь и привести к простым расчетным формулам, определяющим скорость роста стрел изгиба рельсов в плане.

2. Разработанный подход определения скорости роста стрел неровностей в бесстыковом пути позволяет по результатам измерений

неровностей рельсов в плане, фиксируемым вагоном-путеизмерителем, выявлять опасные по условиям устойчивости места.

3. Определены нормы по устанавливаемому температурному режиму работы бесстыкового пути, при их выполнении более надёжно обеспечивающие устойчивость рельсошпальной решетки при действии в рельсах продольных сжимающих сил.

Степень достоверности результатов исследований в диссертации определяется тем, что методы их получения основаны на фундаментальной теории механики твердого тела, которая адекватно объясняет наблюдаемые явления в практике эксплуатации бесстыкового пути, а также при проведении экспериментов на действующих участках, определяющих закономерности скорости роста стрел неровностей рельсов в плане с учетом воздействия поездов. Достоверность теоретических исследований подтверждается результатами экспериментов и практикой эксплуатации бесстыкового пути.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке научно обоснованных и экспериментально подтвержденных методов расчета роста стрел изгиба и их скорости. Исследования завершены разработкой предлагаемых нормативов по определению допустимых отступлений от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути в процессе эксплуатации. Установленные закономерности изменения стрелы изгиба, а также ее скорости роста в зависимости от температуры закрепления рельсовых плетей открывают перспективу дальнейших исследований в разработке автоматизированной программы диагностики обнаружения опасных участков в бесстыковом пути по условиям его устойчивости.

Реализация результатов работы:

1. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования уточняют методику определения предвыбросного напряженного состояния бесстыкового пути по изменению стрел изгиба рельсошпальной решетки по данным вагона-путеизмерителя [94].

2. Результаты и рекомендации, разработанные в диссертационной работе по определению условий устойчивости бесстыкового пути энергетическим методом с учетом воздействия поездов, используются при выполнении работ в Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры – филиала Центральной дирекции ОАО «РЖД» (Приложение 4).

3. Исследования в данной области позволяют уточнить действующую нормативную базу в части определения допускаемых отступлений от температуры закрепления (Приложения 5 и 6).

Личный вклад автора состоит:

- в определении необходимых предпосылок и допущений для выбранных расчетной схемы и математической модели, с использованием которых разработан энергетический метод расчета бесстыкового пути на устойчивость с учетом воздействия поездов;

- в экспериментальном определении начального сопротивления щебеночного балласта поперечным оси пути перемещения железобетонных шпал по результатам измерения неровностей рельсов в плане, фиксируемых путеизмерительным вагоном в опасных по условиям устойчивости местах;

- в выводе расчетных формул, определяющих устойчивость бесстыкового пути, полученных энергетическим методом с учётом воздействия поездов;

- в разработке предложений по определению допустимых отступлений от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути по условию устойчивости не только с учетом величины стрелы изгиба, но и с учетом скорости ее роста.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель расчета бесстыкового пути на устойчивость, основанная на принципе возможных перемещений с учетом воздействия поездов;
- результаты экспериментального определения возможных начальных погонных сопротивлений щебеночного балласта по данным измерения неровностей рельсов в плане, фиксируемых путеизмерительным вагоном в опасных по условиям устойчивости местах;
- сформулированы предложения по оценке величины стрелы изгиба и ее скорости в зависимости от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути, и на этой основе предложены практические рекомендации по определению допускаемых отступлений от температуры закрепления по условию устойчивости с учетом воздействия поездов.

Апробация работы:

Основные результаты исследований были доложены и обсуждены:

- на научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (М.: МИИТ, 2010); Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2011» (Ростов н/Д: РГУПС, 2011); Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2012» (Ростов н/Д: РГУПС, 2012); научно-практической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» (М.: МИИТ, 2012); Международной научно-практической конференции «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава» (Днепропетровск: ДНУЖТ, 2013); Международной научно-практической конференции «Транспорт-2014» (Ростов н/Д: РГУПС, 2014); Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» (Ростов н/Д, 2015);

Международной научно-практической конференции «Транспорт-2016» (Ростов н/Д: РГУПС, 2016).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 21 печатных работах, в том числе 7 – в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Диссертация изложена на 138 страницах основного текста, содержит 23 рисунка, 5 таблиц, 6 приложений, список использованных источников содержит 115 наименований.

1. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

1.1. О происхождении, развитии и преимуществах энергетического метода расчета механических систем

Энергетический метод расчета сооружений и в частности железнодорожного пути основан на принципе возможных перемещений Лагранжа [31-32, 97-101]. Этот метод имеет происхождение из ранее, многие века известного «Золотого правила механики»: «сколько выиграешь в силе – столько потеряешь в пути». Этот принцип впервые сформулировал в I веке н.э. Герон Александрийский. Он внес огромный вклад в развитие механики в том числе большим числом уникальных изобретений. Герон в своих трудах «Метрика», «Механика» описывает такие приспособления, как рычаг, блок, клин, винт и их комбинации, которые широко применяются в современной технике. Впервые он вводит термин «простые машины» и для описания их работ применяет понятие – «момент сил» [97].

Но фактически золотое правило механики применялось при строительстве египетских пирамид. В III веке до н.э. Архимед [98], дал определение центра тяжести и открыл законы равновесия рычага. Он первым из ученых начал применять строгие математические методы исследования проблем механики. Еще ранее, отец физики и ее части – механики, Аристотель [98], в IV веке до н.э. обучал механике Александра Македонского, который своими успешными завоеваниями в значительной степени был обязан оснащенности своей армии механическими метательными и другими устройствами, фактически использующими золотое правило механики.

Паскаль (1623–1662) [99] исходил из принципа возможных перемещений, тем же принципом пользовался и Жиль Персонн Роберваль (1602–1675) [100].

Эти ученые занимались главным образом небесной механикой, но попутно исследовали условия равновесия, прочность стержней и сооружений, сопротивления жидкости движущимся в ней телам.

Особое влияние на развитие механики, применяемой в расчетах железнодорожного пути, было оказано работами Исаака Ньютона (1642–1727), который обосновал современные ему достижения в своем труде «Математические начала натуральной философии» (1687 г.) [29]. Им введено впервые понятие «массы», сформулирован основной закон динамики, который связывает действующую на тело силу с массой и ускорением, а также принцип равенства действия и противодействия.

Современником Ньютона был Готфрид Лейбниц (1660–1716) [101], который установил понятие о «живой силе». Ньютону и Лейбницу принадлежит заслуга разработки дифференциального и интегрального исчисления.

Большое значение для дальнейшего развития механики имели работы Леонарда Эйлера (1707–1783) (динамика точки, динамика твердого тела, движение тел по инерции), он внес свой вклад в развитие гидродинамики, теории упругой устойчивости стержней. Эта теория широко используется в строительном деле, в том числе в расчетах железнодорожного пути.

В тот же период Д'Аламбер (1717–1783) [31] разработал механику свободных и несвободных систем материальных точек. В трактате по динамике Д'Аламбер показал, «каким образом все задачи динамики можно решить одним и притом весьма простым и прямым методом». Законченное развитие этого метода было дано Жозефом Лагранжем (1736–1813) в его трактате «Аналитическая механика» (1788 г.) [31].

Потенциальная энергия упругих тел может быть представлена в виде функции от внешних сил или в виде функции от координат. И в том и в другом случае получается однородная функция второй степени.

В теоретической механике [102] пользуются принципом возможных перемещений для исследования равновесия систем, составленных из

абсолютно твердых тел. Но этот принцип можно распространить и на упругие системы. Необходимо, чтобы работа внешних и внутренних сил, действующих в системе и приложенных в некоторой точке для ее равновесия на всяком возможном перемещении, равнялась нулю. Если δT – работа внешних сил, а δI – работа сил внутренних, то

$$\delta T + \delta I = 0. \quad (1.1)$$

Это выражение должно быть верным для каждой точки системы. Для всех точек системы:

$$\sum \delta T + \sum \delta I = 0. \quad (1.2)$$

Работа всех внутренних сил на возможном перемещении равна по величине и противоположна по знаку потенциальной энергии системы. Обозначив через $\delta \mathcal{E}$ изменения потенциальной энергии, соответствующее принятому возможному перемещению вместо (1.2) можем записать основное уравнение равновесия в таком виде:

$$\sum \delta T + \sum \delta \mathcal{E} = 0. \quad (1.3)$$

Если изгибающий момент по длине балки – постоянная величина, то это случай чистого изгиба [30]. В этом случае под действием момента M (рис. 1.1) сечение $m-n$ повернется относительно сечения $p-q$ на угол φ , равный:

$$\varphi = \frac{1}{\rho} = \frac{Ml}{EI}, \quad (1.4)$$

где E – модуль упругости материала стержня;

I – момент инерции сечения стержня в плоскости изгиба.

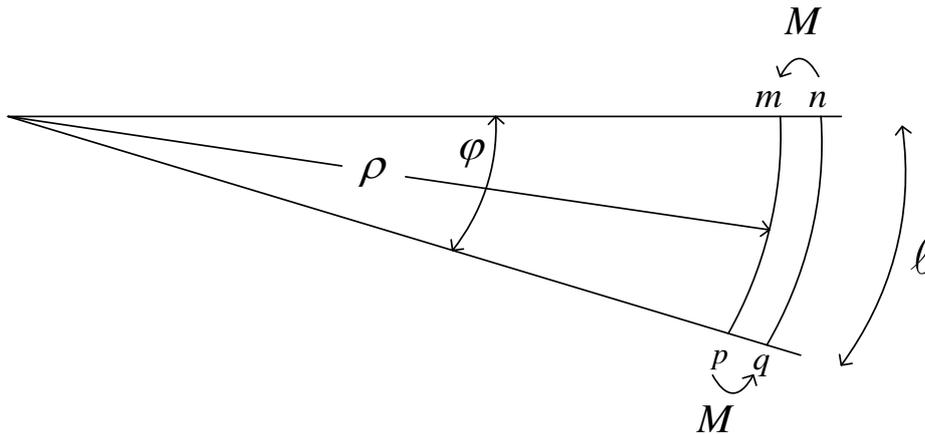


Рисунок 1.1. Расчётная схема для определения изгиба стержня

Тогда работа будет равна потенциальной энергии изогнутого стержня:

$$\mathfrak{E} = \frac{M\varphi}{2} = \frac{M^2 l}{2EI} = \frac{\varphi^2 MI}{2l}. \quad (1.5)$$

Если два поперечных сечения $m-n$ и $p-q$ находятся друг от друга на расстоянии dx , то энергия в этой части бруса будет:

$$d\mathfrak{E} = \frac{M^2 dx}{2EI} = \frac{EI(d\varphi)^2}{2dx}. \quad (1.6)$$

Потенциальная энергия стержня на длине l :

$$\mathfrak{E} = \int_0^l \frac{M^2 dx}{2EI} = \int_0^l \frac{EI}{2} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx. \quad (1.7)$$

1.2. О задаче Эйлера и ее следствиях

Первой задачей по устойчивости равновесия упругого тела, которую решил Л. Эйлер, относилась к вертикально установленному стержню, который был заделан нижним концом (колонна) [30]. Пока сжимающая сила F (рис. 1.2а) не велика, стержень длиной l устойчиво сохраняет свою прямолинейную форму. Если горизонтальной силой вызвать небольшое искривление стержня, то при удалении этой силы стержень возвратится к своей начальной

прямолинейной форме равновесия. Если увеличивать силу F , то можно достигнуть такого предельного состояния, когда малейшая причина может искривить стержень так, что при удалении этой причины, вызвавшей искривление, стержень к прямолинейной форме не возвратится. Задача заключается в том, чтобы определить такое состояние, т.е. найти значение этой «критической» сжимающей силы.

Эйлер далее рассуждал так [30, 102]: «Если значение F будет больше критического и стержень изогнулся, а теперь будем уменьшать продольную сжимающую силу F , то будет уменьшаться и искривление стержня, пока он не выпрямится. В момент выпрямления значение силы F и будет таким, при котором становится возможным искривление». Условием равновесия внешних и внутренних сил будет [30]

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M. \quad (1.8)$$

Изгибающий момент в любом сечении ($m-n$) равен $F(\delta-y)$. Уравнение упругой линии будет иметь вид:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} + P \cdot y - P \cdot \delta = 0. \quad (1.9)$$

Общее решение дифференциального уравнения:

$$y = C_1 \cos \alpha x + C_2 \sin \alpha x + \delta, \quad \text{где } \alpha = \sqrt{\frac{F}{EI}}. \quad (1.10)$$

Для определения произвольных постоянных воспользуемся условиями на нижнем конце изогнутого стержня:

при $x = 0$ 1) $y = 0$ и 2) $y' = 0$.

Получим $C_1 = -\delta$, $C_2 = 0$.

Следовательно $y = \delta(1 - \cos \alpha x)$.

Для удовлетворения условия на верхнем конце ($x = l$, $y = \delta$) необходимо, чтобы

$$\cos \alpha l = 0 \quad \text{или} \quad \alpha l = \frac{(2n+1)\pi}{2},$$

где n число волн,

$$\text{тогда получим} \quad F = \frac{(n+1)^2 \cdot \pi^2 EI}{4l^2}.$$

Наименьшим значением F будет:

$$F = \frac{\pi^2 EI}{4l^2}. \quad (1.11)$$

От рассмотренной задачи легко перейти к другим случаям продольного изгиба при различных условиях закрепления концов стержня длиной l .

Для рельсошпальной решетки железнодорожного пути практическое значение может иметь случай сжатия упругого стержня с заделанными концами (рис. 1.2б).

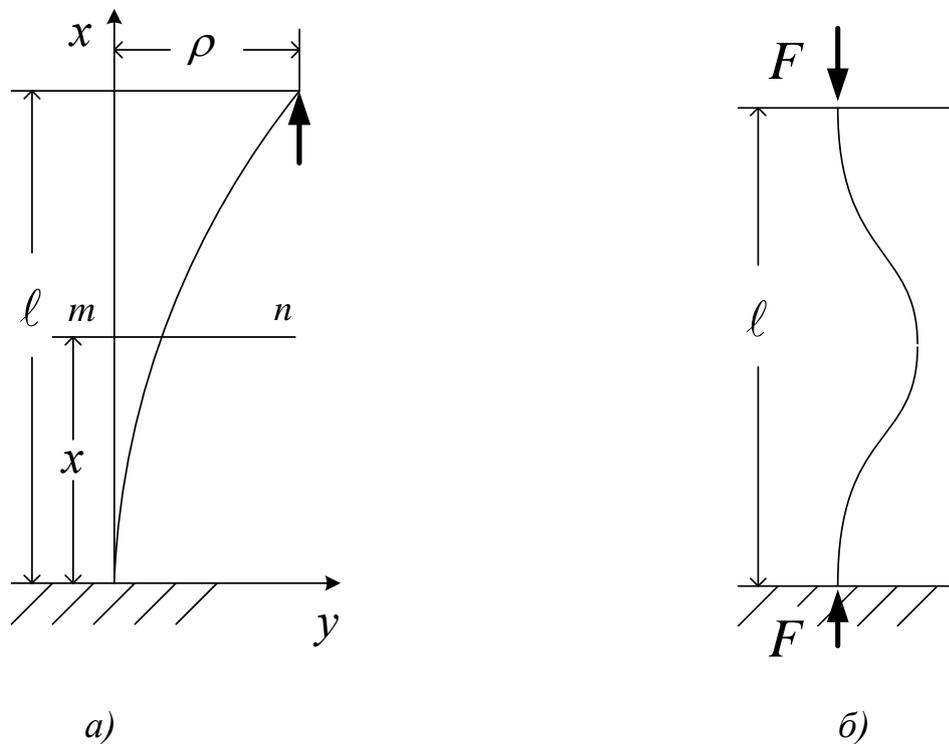


Рисунок 1.2. Расчетные схемы рассмотренных задач [30]:
 a – колонна; b – стержень с заделанными концами

Поскольку в вышеуказанном случае изгиб на длине l теперь произошел на длине $l/4$, то для изгиба стержня с заделанными концами

$$F_{кр.} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2}. \quad (1.12)$$

В общем случае

$$F_{кр.} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \quad (1.13)$$

где коэффициент μ соответствует выбранной конфигурации изгиба стержня, зависящей от условий на его концах.

Эти же формулы (1.11, 1.12, 1.13) можно получить, применив энергетический метод (принцип возможных перемещений), т. е. не прибегая к интегрированию дифференциальных уравнений [30].

Если при всяком возможном перемещении энергия системы возрастает, то рассматриваемая возможная форма равновесия будет устойчивой. Вывести систему из такой формы можно, затратив определенную работу. Если при таком перемещении от положения равновесия энергия системы убывает, то эта форма равновесия будет неустойчивой. «Критическим» значением продольной сжимающей силы будет то, при котором энергия системы станет равной нулю. Если \mathcal{E} – энергия внутренних сил упругой системы, а T – работа внешних сил при отклонении рассматриваемой формы равновесия, то критическое значение нагрузки можно найти из уравнения:

$$\mathcal{E} = T. \quad (1.14)$$

Из всех возможных отклонений от первоначального состояния равновесия нужно выбрать то, при котором (1.14) для силы $F_{кр.}$ дает наименьшее значение.

Если конфигурация изгиба будет соответствовать уравнению –

$$y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right), \quad (1.15)$$

то энергия, затраченная на изгиб стержня:

$$\Theta = \frac{EI}{2} \int_0^l (y'')^2 dx = \frac{\pi^4 EIf^2}{l^3}. \quad (1.16)$$

При этом продольная сжимающая сила совершит работу

$$T = \frac{F\pi^2}{4 \cdot l} \cdot f^2. \quad (1.17)$$

Тогда, подставляя (1.16) и (1.17) в уравнение (1.14), найдем (1.12).

Рельсошпальная решетка железнодорожного пути находится в балласте, т.е. в среде, которая сопротивляется ее изгибу в горизонтальной плоскости. Если принять это сопротивление изгибу чисто упругим, то потенциальная работа распределенных сил, имеющих механическую характеристику через модуль упругости U_y , может быть определена из выражения

$$\Theta_u = \frac{U}{2} \int_0^l y^2 dx. \quad (1.18)$$

Равновесие упругого стержня в упругой среде (как и в [30]) запишется следующим образом:

$$\frac{F}{2} \int_0^l (y')^2 dx = \frac{EI}{2} \int_0^l (y'')^2 dx + \frac{U_y}{2} \int_0^l y^2 dx. \quad (1.19)$$

В уравнении (1.19) работа сжимающей продольной силы при искривлении стержня представлена левой частью уравнения, а правая часть (1.19) – энергия изгиба стержня и энергия деформации среды. U_y – модуль упругости, на который умножая прогиб, получим реакцию среды (погонное ее сопротивление), приходящуюся на единицу длины упругого стержня. Общий вид для изогнутой оси стержня можно получить путем наложения отдельных синусоид:

$$y = f_1 \sin \frac{\pi x}{l} + f_2 \sin \frac{2\pi x}{l} + f_3 \sin \frac{3\pi x}{l} + \dots, \quad (1.20)$$

при $m = 1, 2, 3, 4 \dots$

$$y = \sum f_m \sin \frac{m\pi x}{l}. \quad (1.21)$$

Таким образом, получим

$$F = \frac{EI \sum f_m^2 \left(\frac{m\pi}{l}\right)^4 + U_y \sum f_m^2}{\sum f_m^2 \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}. \quad (1.22)$$

В [30] отмечено, что «наименьшее значение Эйлеровой силы получим, если коэффициенты f_m , кроме одного, обращаются в ноль. Следовательно, первой возможной формой искривления при равновесии стержня будет синусоида».

Число волн изгиба зависит от модуля упругости среды U_y . Чем больше U_y , тем большее число волн появится при его выпучивании. При первой искривленной форме образуется m полуволн, тогда

$$y = f_m \sin \frac{m\pi x}{l}, \quad (1.23)$$

тогда из (1.22) имеем

$$F_{кр} = \frac{EI(m\pi^4) + U_y l^4}{m^2 \pi^2 l^2}. \quad (1.24)$$

Если обозначить

$$A^2 = \frac{U_y l^4}{16EI}, \quad (1.25)$$

то можно переписать (1.24) в виде:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \cdot \left(m^2 + \frac{16A^2}{m^2 \pi^4} \right) = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \quad (1.26)$$

здесь

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{m^2 + \frac{16A^2}{m^2\pi^4}}}. \quad (1.27)$$

Величина A^2 соответствует моменту перехода от m к $(m+1)$, откуда

$$A^2 = \frac{\pi^4}{16} \cdot m^2 \cdot (m+1)^2. \quad (1.28)$$

При подстановке (1.28) в (1.27) найдем μ из (1.26). При большом значении m

$$F_{кр} = EI \cdot \left(\frac{T^2}{S^2} + \frac{U_y S^2}{\pi^2 EI} \right), \quad (1.29)$$

где через S обозначена длина полуволны. Наименьшее значение $F_{кр}$ из (1.29) получится при

$$S = \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{EI}{U_y}}, \quad (1.30)$$

тогда из (1.29) можем получить

$$F_{кр} = 2\sqrt{U_y EI} = \frac{2\pi EI}{S^2}. \quad (1.31)$$

Из решения (1.24) и (1.31) вытекает одно из практических следствий, которое можно распространить на железнодорожный путь, и в частности на бесстыковой. А именно, чем больше модуль упругости U_y или погонное сопротивление среды $q=U_y y$, тем большее число волн будет при его искривлении под действием продольной силы $F_{кр}$. Это значит, что погонное сопротивление среды – погонное сопротивление щебеночного балласта сдвигу рельсошпальной решетки поперек оси пути должно быть таким, чтобы ни в каком случае это сопротивление не было меньшим, чем то, при котором возникает критическая сила. Или оно должно быть минимально необходимым, но при условии, чтобы эта продольная сжимающая критическая сила никогда не была выше определенного ограниченного нормами значения.

1.3. Предпосылки и допущения, применяемые в энергетическом методе для определения устойчивости упругих стержней

На протяжении примерно трех десятилетий (30-е – 60-е годы прошлого столетия) в СССР для расчета бесстыкового пути на устойчивость применялся метод, разработанный К.Н. Мищенко [10].

Рельсошпальную решетку бесстыкового пути по этому методу заменяли упругим стержнем, который имел в плоскости изгиба жесткость EI и погонное сопротивление ее сдвигу вдоль (r) и поперек (q) оси пути. Продольная температурная сила $F = \alpha E \omega \Delta t$, где $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6}$, $1/^\circ\text{C}$ – коэффициент температурного расширения рельсовой стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$, МПа – модуль упругости рельсовой стали, ω – площадь поперечного сечения двух рельсов, $\Delta t = t - t_3$ – разница температуры рельсов (t) с температурой их закрепления (t_3). I – момент сопротивления сечения рельсошпальной решетки в плоскости изгиба принимался приведенным к моментам инерции сечения двух рельсов I_2 :

$$I = 2I_2\beta, \quad (1.32)$$

где коэффициент β определялся опытом с помощью принудительного изгиба опытного звена рельсошпальной решетки.

Предполагалось, что при изгибе рельсов во время потери устойчивости кромочные нормальные напряжения не превысят предела пропорциональности (предела упругости), тогда абсолютную продольную деформацию (u) искривленной части рельсов можно определить по закону Гука:

$$u = \frac{(F_0 - F) \cdot l}{E\omega}, \quad (1.33)$$

где l – длина хорды искривленной части рельсов;

F_0 – продольная сжимающая сила в рельсах до искривления;

F – продольная сжимающая сила в рельсах после искривления.

Считалось, что искривленная часть рельсов не является изолированной от остальной части рельсов, поэтому местное падение продольной сжимающей силы вызывает продольную деформацию примыкающих к концам искривленных прямолинейных участков рельсовой плети бесстыкового пути. Падение сжимающей силы по длине примыкающих участков постепенно уменьшается, и на некотором расстоянии L от концов искривления продольная деформация затухает, достигая нуля. В результате полная деформация Δl искривления больше u на величину суммы смещения двух концов прямолинейных участков. Если считать, что удлинение этих участков составляет λ , то полное удлинение искривленной части будет равно

$$\Delta l = u + 2\lambda. \quad (1.34)$$

Величину Δl можно найти как разность между длиной искривленной части и длиной l его хорды по известному выражению

$$\Delta l = \int_0^{l/2} (y')^2 dx. \quad (1.35)$$

Если изгиб будет описываться уравнением смещенной синусоиды (1.15), то

$$\Delta l \approx \frac{\pi^2 f^2}{4l}. \quad (1.36)$$

Необходимо определить продольные перемещения λ , происходящие на границе искривленной и примыкающей прямой части рельсовой плети бесстыкового пути.

На рис. 1.3 изображена кривая изгиба, соответствующая уравнению (1.15), и ниже схематично в тех же продольных координатах представлена эпюра продольных сил.

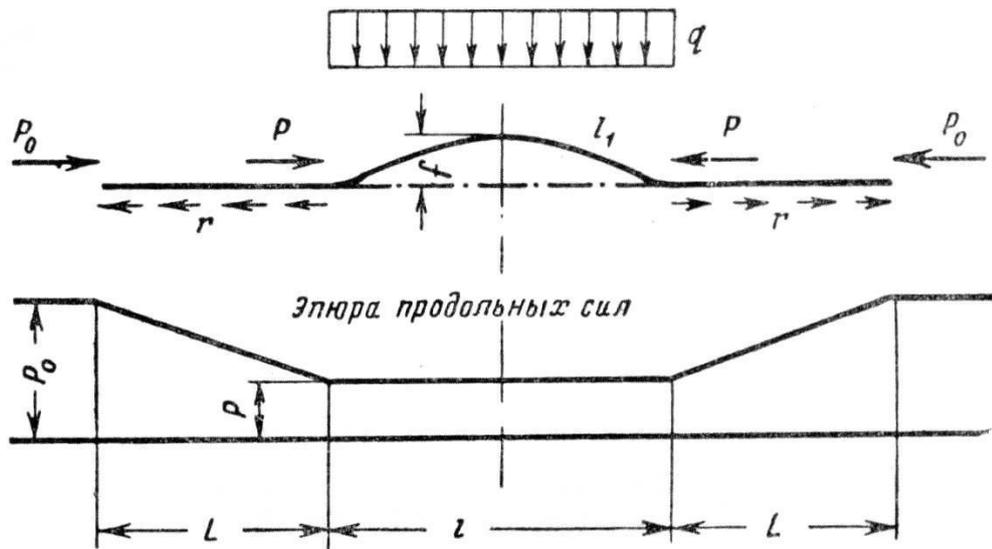


Рисунок 1.3. Схема изменения продольных сил на участке, потерявшем устойчивость [10]

Можем написать условия равновесия участков L , где работа силы $E = \frac{\omega \lambda}{2}$ должна быть равной площади эпюры треугольника, которая также характеризует эту работу $(F_0 - F)L/2$, тогда

$$E\omega \cdot \frac{\lambda}{2} = (F_0 - F) \cdot \frac{L}{2}. \quad (1.37)$$

Поскольку

$$L = \frac{F_0 - F}{r}, \quad (1.38)$$

то из (1.37) с учетом (1.38) получим

$$\lambda = \frac{(F_0 - F)^2}{2E \cdot \omega \cdot r}. \quad (1.39)$$

Подставляя (1.33), (1.34) и (1.39) в (1.34), получим

$$F_0 = F + \frac{rl}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\pi^2 f^2 E \omega}{rl^3}} - 1 \right). \quad (1.40)$$

К.Н. Мищенко [10], как и до него К. Грюневальдт [12] или после него Э. Немешди [33], рассматривали случаи как одностороннего изгиба

рельсошпальной решетки при потере ею устойчивости, так и двусторонний и при двух-, трех-, четырех- и пятиволновом искривлении ее оси. Здесь ограничимся односторонним изгибом по кривой (1.15), который соответствует наименьшей продольной сжимающей силе, т.е. худшему варианту, который по соображениям безопасности движения и следует рассматривать. При этом представленный ход преобразований с (1.33) до (1.40) более простой, чем у вышеназванных авторов.

Далее, чтобы установить условия равновесия, необходимо применить принцип возможных перемещений (энергетический метод), т.е. приравнять к нулю сумму элементарных работ на любом возможном перемещении:

$$\sum dA_i = 0. \quad (1.41)$$

Участок упругого стержня (рельсошпальной решетки) до наступления деформации был прямолинейным и подвергался осевому сжатию силой F . После нарушения прямолинейной устойчивости этот участок принял новую форму равновесия, состоящую из участка искривления на длине l и примыкающих к нему прямолинейных участков на длинах L (рис. 1.3).

Вследствие образовавшегося искривления общая длина участка пути сделалась больше участка ее первоначальной длины, и потому начальная сила F_0 уменьшилась до F , но влево и вправо от участка l на длине L продольная сила изменилась по линейному закону до величины F . При новой форме равновесия на прямолинейных участках переменная сжимающая сила уравновесилась погонным сопротивлением r , а сила F , изгибающая рельсы, уравновесилась сопротивлением упругого стержня его жесткостью EI и погонным сопротивлением поперечному перемещению q .

Задача определения устойчивости бесстыкового пути заключается в том, чтобы определить наименьшее значение силы $\min F$, при котором становится новая форма равновесия [10].

Если оказывалось, что величина $\min F = F_{кр.}$ больше, чем фактическая величина сжимающей температурной силы, то считали, что потеря устойчивости бесстыкового пути невозможна и, следовательно, конструкция пути, для которой производится расчет, обеспечивает устойчивость.

Процесс перехода от прямолинейного состояния в криволинейное определяется следующими видами работ:

A_1 – работа переменной сжимающей силы на прямолинейных участках L ;

A_2 – работа деформации на изогнутой части при падении сжимающей силы от F_0 до F вследствие увеличения длины стержня при искривлении;

A_3 – работа деформации изгиба стержня;

A_4 – работа перемещения стержня поперек оси пути.

Полная энергия системы будет равна

$$\mathcal{E} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4. \quad (1.42)$$

Каждая из вышперечисленных работ является функцией от заданных характеристик упругой системы (I, q, r) и независимых переменных l и f , соответствующих искривленной части упругого стержня.

Если задаться формой искривления по (1.15) и выразить ее в аналитическом виде

$$y = F(l, f), \quad (1.43)$$

то каждая из работ деформации также выразится через указанные независимые переменные и соответственные характеристики рассматриваемой системы.

Уравнение равновесия, устанавливающее требуемые соотношения между силами, вызывающими деформацию, и силами, ей сопротивляющимися, определится из условия

$$d\mathcal{E} = 0, \quad (1.44)$$

откуда

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial f} dt + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial l} dl = 0 \quad (1.45)$$

и тогда

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial f} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial l} = 0. \quad (1.46)$$

Взяв частные производные по f и l от правой части уравнения (1.42) и приравняв их нулю, получают два уравнения:

$$\Phi_1(C_1 f, l, F) = 0; \quad (1.47)$$

$$\Phi_2(C_2 f, l, F) = 0,$$

где C_1 и C_2 – постоянные, определяемые заданными характеристиками конструкции верхнего строения бесстыкового пути.

В приведенных уравнениях число неизвестных (F , l и f) превышает число уравнений. В результате получаем бесконечное множество решений для сочетания величины F и соответствующие ей f и l . Задаваясь рядом значений f для каждого частного значения f путем подбора, можно найти соответствующие им значения l и F , удовлетворяющие уравнениям.

Если изобразить это решение графически, то можно увидеть, что график $F(f)$ имеет минимум $\min F = F_{кр.}$ (рис.1.4) [10]:

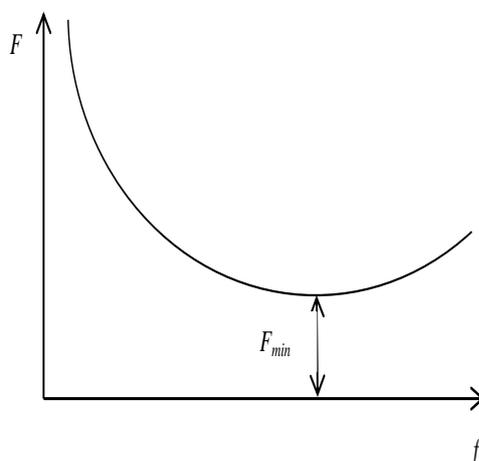


Рисунок 1.4. Зависимость $F(f)$

Ордината $F_{кр.}$ делит кривую $F(f)$ на две части. Левая часть характеризует начало процесса потери устойчивости – это неустойчивое равновесие. Эта часть представляет особый интерес для дальнейших исследований. Правая часть характеризует собой окончание процесса перехода стержня под действием продольной сжимающей силы в устойчивое состояние равновесия.

Положение равновесия, соответствующее $F = F_{кр.}$, в котором совпадают начальное и конечное состояние равновесия упругой системы, является устойчивым положением равновесия. Если же $F < F_{кр.}$, то условия равновесия системы тем более соблюдаются.

Задача определения $F_{кр.}$ упрощается, если решать ее для заданной длины l участка при погонном сопротивлении $r = 0$. При таком условии отпадает необходимость определять работы деформаций на прямолинейных участках L . Тогда $\min F$ определяется из условия $\frac{\partial F}{\partial f} = 0$ и выразится определенной функцией от l и прочих характеристик. Меняя затем величину l , можно найти $F_{кр.}$ из условия $\frac{\partial F}{\partial l} = 0$.

Произведенные подсчеты показывают, что при таких допущениях получаемые значения $F_{кр.}$ отличаются от значений, полученных без допущений всего на 3 % в сторону увеличения запаса устойчивости. По приближенному способу расчета К.Н. Мищенко формулы имеют следующий вид [10]:

$$\left. \begin{aligned}
 F_{кр} &= \frac{2,68}{\sqrt[4]{n}} \cdot \sqrt[4]{I\omega q^2 E^2}; \\
 q &= \frac{F_{кр}^2 \cdot \sqrt{n}}{7,18 \cdot E \cdot \sqrt{I\omega}}; \\
 l &= 13,92 \cdot \sqrt{\frac{EI}{F_{кр}}}; \\
 f &= 4,18 \cdot \sqrt{\frac{nI}{\omega}}; \\
 n &= 1 + \frac{F_{кр}}{4rl_k}.
 \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

Заметим, что в (1.48) все же фигурирует $r \neq 0$.

Несмотря на то, что сначала рассматривается только равновесие искривленной части упругого стержня, принимается во внимание уже отмеченное выше обстоятельство, что полное удлинение Δl складывается из предельных деформаций, возникающих по всей длине стержня (см. рис. 1.3)

$$nl = l + 2L, \quad (1.49)$$

где n – безразмерный коэффициент, выражающий отношение полной длины деформируемого участка к длине искривленной части стержня. Заметим, что длина искривленной части здесь заменяется длиной хорды, что вполне допустимо из-за их малой разности.

Таким образом, если принять во внимание полное удлинение стержня, то падение продольной сжимающей силы по закону Гука выразится следующей формулой:

$$F_0 - F = E \cdot \omega \cdot \frac{\Delta l}{nl}. \quad (1.50)$$

В большинстве работ [11, 14, 17, 18] и др. пренебрегают падением усилия при изменении стрелы f и силу F в соответствии с выражением (1.50)

считают постоянной $P = P_0 = const$. В результате решенные уравнения (1.41) получили в следующем виде:

$$\eta_1 F \cdot \frac{f}{l} = \eta_n \cdot \frac{EI f}{l^3} + \eta_c \cdot \frac{ql}{2} + \eta_1^2 E \omega \frac{f^3}{nl^3}, \quad (1.51)$$

в соответствии с (1.15) здесь $\eta_1 = \frac{\pi^2}{4}$, $\eta_2 = \frac{1}{2}$; $\eta_n = \pi^4$; $\eta_c = \frac{1}{2}$.

Отсюда находят сжимающую силу в функции длины искривления l и стрелы f :

$$F = \frac{\eta_n}{\eta_1} \cdot \frac{EI}{l^2} + \frac{\eta_c}{\eta_1} \cdot \frac{ql^2}{2f} + \eta_1 E \omega \cdot \frac{f^2}{nl^2}. \quad (1.52)$$

При постоянном значении l величина критической стрелы $f_{кр}$, при которой сжимающая продольная сила в стержне имеет минимальное значение, определится из условия $\frac{\partial F}{\partial f} = 0$ и будет равна

$$f_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\eta_c}{\eta_1^2} \cdot \frac{qn}{4E\omega} \cdot l^4}. \quad (1.53)$$

Подставив (1.53) в (1.52), получим

$$F = \frac{\eta_n}{\eta_1} \cdot \frac{EI}{l^2} + \frac{3}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{\eta_c^2}{\eta_1^2} \cdot \frac{4E\omega \cdot q^2}{n} \cdot l^2}. \quad (1.54)$$

Из условия $\frac{\partial F}{\partial l} = 0$ получим соответствующее критической силе длину

$l_{кр}$, при которой $F_{кр}$ имеет минимальное значение:

$$\frac{\partial F}{\partial l} = \frac{8 \cdot \eta_n}{\eta_1} \cdot \frac{EI}{l^3} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{\eta_c^2}{\eta_1^2} \cdot \frac{4E \cdot \omega \cdot q^2}{n}} \cdot l^{-\frac{1}{3}} = 0, \quad (1.55)$$

откуда

$$l_{кр} = \sqrt[8]{\frac{16 \cdot \eta_n^3}{\eta_1^2 \cdot \eta_2^2} \cdot \frac{E^2 \cdot I^3 \cdot n}{\omega \cdot q}}. \quad (1.56)$$

Подставляя выражение (1.56) в (1.54), получим

$$\min F = \frac{\eta_9}{\sqrt[4]{n}} \sqrt[4]{E^2 q^2 I \omega}. \quad (1.57)$$

Если (1.57) решить относительно q , что является необходимым погонным сопротивлением для предотвращения потери устойчивости, то получим

$$q_{кр} = \frac{F^2 \cdot \sqrt{n}}{\eta_{10} E \cdot \sqrt{I \omega}}. \quad (1.58)$$

Используя (1.58) и выражения l_k и f_k в (1.53) и в (1.56), получим более простые формулы для определения геометрических характеристик искривления при минимальной продольной силе F :

$$l_{кр} = \eta_n \sqrt{\frac{EI}{F}} \quad (1.59)$$

и

$$f_{кр} = \eta_{12} \sqrt{\frac{nI}{\omega}}, \quad (1.60)$$

здесь коэффициенты $\eta_9 = 2,68$; $\eta_{10} = 7,18$; $\eta_{11} = 13,92$; $\eta_{12} = 4,18$.

В найденных выражениях коэффициент n считался величиной постоянной, с помощью которого определялось влияние деформаций на прямолинейных участках L , примыкающих к концам искривленной части стержня. Эту поправку находят следующим образом: по формуле (1.50) и зная, что при любом r , в том числе и $r = 0$, $F_0 - F = \frac{F_0}{4}$.

Тогда при падении продольной силы в четыре раза

$$2Lr = \frac{F_0}{4}. \quad (1.61)$$

В результате имеем

$$n = 1 + \frac{F_0}{4rl}. \quad (1.62)$$

Поскольку n зависит от F_0 и l , силу $\min F_0$ по уравнению (1.57) находят методом постепенного приближения, задаваясь сначала приближенным значением силы F_0 , по которому находят по формуле (1.53) величину l , а затем по (50) величину n . Подставляя их в (1.57), определяют окончательное значение F_0 .

В 1958 г. В.И. Новаковичем [34] была произведена экспериментальная проверка вышеприведенных формул, полученных К.Н. Мищенко, с помощью стенда, на котором температурному сжатию подвергались стержни прямоугольного сечения различной толщины, но одинаковой ширины.

Длина и конфигурация поперечного сечения стержней была получена расчетом по формуле $L_{полн} = l + 2L$, что составило для стержня максимальной площади ($3 \times 15 \text{ мм}^2$) 135 мм, где $L = \frac{\alpha E \omega \Delta t}{r}$.

По формулам (1.48) при $\omega = bh$ и $I = \frac{bh^3}{12}$ получилось

$$q_{кр} = m \sqrt{\frac{\omega^3}{I}} \cdot \sqrt{k \cdot \sqrt{\frac{\omega^3}{I}} + 1} = mb \cdot \sqrt{kb + 1}. \quad (1.63)$$

Оказалось (1.63), что $q_{кр}$ не зависит от толщины стержня h , размер которой находился в плоскости изгиба.

Эксперименты подтвердили факт независимости устойчивости от размера толщины стержня h . Стержни разной толщины, но одинаковой ширины (15 мм) потеряли устойчивость при одинаковой температуре Δt .

Этот факт побудил сделать вывод о том, что устойчивость бесстыкового пути тем хуже, чем большее будет поперечное сечение рельсов. Расчеты по формулам К.Н. Мищенко [36, 37] показали, что, например, от типа Р50 к типу рельса Р65 необходимое погонное сопротивление для сохранения устойчивости повышается на 17 %, а от типа Р65 к типу Р75 на 12 %.

В конце 50-х годов прошлого столетия во ВНИИЖТе была образована лаборатория бесстыкового пути, которой была поставлена цель разработать и внедрить в эксплуатацию бесстыковой путь. Эту лабораторию вначале возглавлял В.В. Басилов, а затем на протяжении почти 30 лет Е.М. Бромберг. Под руководством Е.М. Бромберга начались экспериментальные исследования условий устойчивости бесстыкового пути.

В 20-е – 30-е годы в Германии в Карлсруэ О. Амман и К. Грюневальдт [35] проводили опыты с определением условий устойчивости участка рельсошпальной решетки натурального размера длиной 46,5 м. Эта рельсошпальная решетка находилась в балласте, одним концом рельсов она упиралась в массивный железобетонный анкер, заглубленный в грунт, а с другого конца также опиралась в анкер через мощные домкраты, которыми создавалась в рельсах продольная сжимающая сила. С помощью домкратов продольная сила ступенями увеличивалась до тех пор, пока рельсы не получали изгиб в плане. Определяемая таким образом критическая продольная сила $F = \alpha E \omega \Delta t$ делилась на $\alpha E \omega$, что давало значение допустимого превышения температуры закрепления рельсовых плетей по условию устойчивости:

$$\Delta t = \frac{F_{кр}}{k_y \alpha E \omega}, \quad (1.64)$$

здесь k_y – коэффициент запаса устойчивости.

К.Н. Мищенко в своих статьях, опубликованных в довоенные годы [36, 37], работы германских ученых подверг резкой критике, считая и предложенную ими теорию расчета бесстыкового пути на устойчивость, и методику проведения опытов ошибочными. Эту критику К.Н. Мищенко мотивировал тем, что в работе [12] принцип возможных перемещений применялся с принятием суммы работ на конечных перемещениях, а по принципу Д’Аламбера – Лагранжа необходимо брать бесконечно малые

перемещения. Что касается методики экспериментов, проведенных в Германии, то К.Н. Мищенко эту методику считал «больше искажающей фактические условия устойчивости бесстыкового пути, чем их воспроизводящие». Он считал, что сжимать рельсы домкратами нельзя, а нужно рельсы нагревать. При этом длину рельсошпальной решетки в 46,5 м он считал недостаточной, поскольку участок бесстыкового пути, теряющий устойчивость, имеет длину $l + 2L$, что для германских рельсов типа S49 составляет не менее 500 м.

Стенд ВНИИЖТа [67] имел длину 100 м, рельсы нагревались током большой силы до 4500 ампер, что в некоторой степени соответствовало рекомендациям К.Н. Мищенко. Стенд располагался на полигоне ранее существовавшего в Москве Бескутниковского кольца почти в центре города, где найти свободной площади для большей его длины не представлялось возможным. К тому же, как у К.Н. Мищенко, так и у других авторов теорий устойчивости бесстыкового пути допускался вариант расчета без учета продольных деформаций рельсов, происходящих на длине l и двух прямых примыкающих к изгибу участках длиной L .

Заметим, что в опытах В.И. Новаковича [51] на его стенде длины стержней и погонных сопротивлений были подобраны так, что общая длина в 135 мм включала в себя $l + 2L$. При этом потеря устойчивости стержней происходила в самой их середине. Оказывалось, что длина изогнутой оси l_1 у стержня с большим размером h_1 (от которого не зависела Δt) примерно во столько же раз превышала ту l_2 , которая образовывалась у стержня с меньшим размером h_2 .

К.Н. Мищенко советовал уложить опытный участок бесстыкового пути напряженного типа с рельсами Р65 при достаточно большой грузонапряженности [10]. Такой участок был уложен в 1960 г. на перегоне Красноармейск – Гродовка (10 км) Красноармейской дистанции пути Донецкой железной дороге [103], где грузонапряженность составляла более

100 млн т км/км брутто одиночного пути в год. Этот участок подвергался интенсивному засорению углем и железной рудой, из-за чего его пришлось раньше, чем где бы то ни было, ремонтировать с очисткой балласта щебнеочистительными машинами типа ЩОМ Д [104].

В начале 60-х годов прошлого века, когда в СССР только начиналось применение бесстыкового пути, в ФРГ уже эксплуатировалось более 10 тысяч километров этой конструкции. Поэтому, естественно, следовало использовать германский опыт. Руководитель лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТа Е.М. Бромберг всесторонне изучал и применял этот опыт при разработке как методов исследования особенностей конструкции бесстыкового пути, так и при разработке нормативных требований (технических условий). В 1960 г. вышли первые «Временные технические указания по укладке и эксплуатации температурно-напряженного бесстыкового пути без периодической разрядки напряжений и с периодической (сезонной) разрядкой напряжений в рельсах типа Р50» [40]. Тогда еще только начинался выпуск рельсов погонной массы Р65. Считалось, что только рельсы погонной массой Р65 позволят массово применять бесстыковой путь без периодической разрядки напряжений. На такое мнение оказал большое влияние германский опыт. В ФРГ тогда считалось, что во всех климатических зонах максимальная температура рельсов составляет 60 °С, а минимальная – 30 °С. Считалось также, что следует по возможности закреплять рельсовые плети бесстыкового пути при такой температуре, чтобы и сжимающие, и растягивающие напряжения по абсолютной своей величине были равными.

Таким образом, в ФРГ «оптимальная» температура закрепления составляла 15 °С. Перенося этот опыт на Советский Союз, Е.М. Бромберг посчитал, что даже в его европейской части температура закрепления не должна превышать 15 °С, поскольку минимальная температура у нас зимой ниже чем –30 °С. В связи с этим он справедливо считал, что необходимо было в климатических условиях СССР большее внимание уделить и условиям

прочности, и условиям устойчивости бесстыкового пути. В то время еще были очень часты сходы подвижного состава по причине излома рельсов, поскольку рельсовое хозяйство в послевоенные годы было еще в запущенном состоянии. Но в этом случае, если закреплять рельсовые плети бесстыкового пути при температурах ниже, чем это делалось в ФРГ, то следовало большее, чем в Германии, внимание уделить условиям устойчивости при действии в рельсовых плетях продольных сжимающих сил в летнее время.

1.4. Выводы по главе 1

1. Анализ эволюции энергетического метода расчета механических систем, основанного на принципе возможных перемещений, в частности, в применении его к бесстыковому пути показал, что существующие методики расчета бесстыкового пути на устойчивость, полученные энергетическим методом не учитывали воздействие поездов, что не в полной мере отражает причины потери устойчивости пути.

2. Стендовые эксперименты, проведенные с целью определения устойчивости бесстыкового пути, не отражают в полной мере фактические условия деформирования, так как не учитывают воздействие поездов.

3. На основании анализа известных подходов применения энергетического метода определения условий устойчивости бесстыкового пути установлены необходимые предпосылки и допущения для разработки расчетной схемы и математической модели, учитывающих воздействие поездов.

2. СОПРОТИВЛЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА ПОПЕРЕЧНЫМ ОСИ ПУТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ

2.1. Исследования, проведенные в области определения механических характеристик, необходимых для расчета бесстыкового пути на устойчивость

Для определения условий устойчивости во ВНИИЖТе в 1960 г. был построен стенд с длиной рельсошпальной решетки 100 м. До этого в Европе и Америке бесстыковой путь уже применялся более 30 лет и, соответственно, там на стендах уже были проведены исследования условий устойчивости этой конструкции верхнего строения пути.

В Венгрии до войны этим вопросом занимался И. Немешди–Немчек [41], а в послевоенные годы Э. Немешди [33]. В довоенные годы в Германии условия устойчивости бесстыкового пути теоретически и экспериментально исследовались О. Амманом и К. Грюнвальдтом [35] и Г. Мейером [17], А. Блохом [13]; во Франции А. Мартине [16], Р.Леви [15]; а в послевоенные годы Ф. Раабом [18], Ф. Шведом [42], Р. Рубином [43], Э. Энгелем [44], Л. Сакмауэром [45], Д. Бартлетом [46], М. Нумато [14], И. Надем [47], Ф. Бирманом [48] и др.

В СССР изучение условий устойчивости бесстыкового пути с помощью экспериментов на стенде началось с 1961 года под руководством Е.М. Бромберга [49].

Выше отмечалось, что стенд лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТа имел длину 100 м, в Венгрии [47] стенд имел длину 192 м, в Японии [14] длина стенда была 320 м, в Англии [46] всего 36,5 м.

Методика проведения опытов на стенде лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТа [67] отличалась от других прежде всего тем, что рельсы

нагревались током, пропускаемым через сами рельсы. Ток был силой до 4500 ампер. На концах 100-метрового участка рельсов располагались два бетонных упора, обеспечивающие неподвижность концов рельсовых плетей при нагреве. Источником тока являлся генератор типа АНД. Для уменьшения тепловых потерь рельсы во время опытов накрывались на всем протяжении мягкими теплоизолирующими матами.

Измерение температуры производилось ртутными техническими термометрами в четырех сечениях 100-метрового участка на каждой рельсовой нити. Термометры в первых опытах вводились в отверстия, просверленные в головке рельса по их оси. Поскольку было замечено, что рельсы нагревались по сечению неравномерно, то в следующих опытах термометры устанавливались также и на подошве рельсов.

Принималась средняя температура рельсов, измеренная во всех точках.

При достижении критической температурной продольной силы рельсы изгибались так, что в них преодолевались пределы упругости, деревянные шпалы в местах их перегиба ломались. Это требовало после каждого опыта снова укладывать новую рельсошпальную решетку, частично используя прежние рельсы и шпалы. Деформированная часть рельсов вырезалась и вваривалась новая с помощью электродной сварки, производилась оправка балластной призмы. Ночью перед очередным опытом производилось перезакрепление рельсовой плети с освобождением прижатия рельсов к шпалам клеммными болтами и с простукиванием рельсов молотками. После завинчивания гаек динамометрическими ключами с определенным каждый раз крутящим моментом между торцами рельсов и упорами зазоры заклинивались «упорными подушками». Перед нагревом рельсов производилась проверка положения рельсов в плане, профиле и шаблону через каждый метр. Неподвижность концов рельсовых плетей при нагревании контролировалась приборами, дающими непрерывную запись. Поперечные перемещения рельсов фиксировались записью карандашом на вертикальных

щитах, которые крепились на поперечных рамах. Всего вдоль стенда таких щитов было установлено 15 штук. Процесс потери устойчивости записывался на киноплёнку. В 1961–1962 гг. первые опыты (26 опытов) проводились с рельсами типа Р50 на деревянных шпалах типа I и II с эпюрой 1840 шт/км. Балластная призма из щебня фракции 40–70 мм имела плечо размером 25 см и крутизну откоса 1:1,5. Крепление было типа К-4 – это раздельное крепление с жесткой клеммой, подкладка на каждом конце шпалы крепилась на шпалах четырьмя шурупами. Между рельсами и подкладками были уложены деревянные прокладки-амортизаторы. Щебень уплотнялся электрошпалоподбойками. Считалось, что перечисленные характеристики соответствовали типовым условиям эксплуатации.

Особое внимание в опытах на стенде было уделено контролю над сопротивлением щебня сдвигу шпал в балласте [67]. Всего было испытано сопротивление сдвигу поперек оси на 41 шпале, находящейся на стенде, что считали достаточно представительной группой, характеризующей генеральную совокупность. Измерения сопротивлений шпал Q сдвигу поперек оси пути (y) показали, что зависимость $Q(y)$ имеет вид степенной кривой типа $Q = ay^b$. Минимальные средние значения при сдвиге на 1 мм составляли 20–70 кг·с (200–700 Н), а максимальные значения от 100 до 300 кг·с (1–3 кН). Средние значения от 60 до 200 кг·с (0,6–2 кН). Погонные сопротивления

$q = \frac{Q}{l_{ш}}$, где $l_{ш}$ - расстояние между осями смежных шпал (55 см) по их средним значениям аппроксимировались следующей зависимостью:

$$q_{cp} = 60 + 140 \cdot y^{0,5}. \quad (2.1)$$

Измерялись также погонные сопротивления шпал $r = \frac{R}{l_{ш}}$ продольным перемещениям λ . На продольные сопротивления было испытано всего 12 шпал. Средние значения были аппроксимированы [38, 39] степенной

функцией типа $r = a \cdot \lambda^b$, где $a = 15,5$ и $b = 1/3$. Шпалы в этих опытах перемещались вдоль оси пути до 0,01 м.

В опытах [67] особое внимание уделялось положению рельсов в плане. Опыты производились как при прямом положении рельсов, так и при созданных искусственных неровностях. Было отмечено, что при выбрасывании концы рельсов вблизи упоров оставались неподвижными, что соответствовало теории, в которой пренебрегалось учетом продольных перемещений за концами искривления.

Потери устойчивости в первых шести опытах происходили при превышении температуры закрепления Δt на 58...76 °С. При этом максимальный изгиб происходил в местах, не обязательно совпадающих с местом начальной неровности, при этом разница температур Δt на участках с начальной неровностью оказалась существенно большей, чем при выбросах на прямом пути. Экспериментаторы, пытаясь найти причины отмеченных несоответствий, указывали на наличие экспериментов, связанных с неравномерным распределением температуры по поперечному сечению рельсов или за счет различных температур одной и другой рельсовых плетей. 20 опытов, как указывалось в [49], были проведены на лабораторной модели, в которой создавался эксцентриситет. Результаты этих опытов показали, что при несимметричном нагреве рельсов потеря устойчивости наступала при продольной силе на 14 % меньшей, чем при симметричном нагреве.

Для анализа результатов проведенных опытов на стенде были построены графики кривых по 18 точкам через 10 м, на которых отмечались перемещения и в горизонтальной, и вертикальной плоскостях. По этим данным было отмечено, что: 1) поперечная сдвижка рельсошпальной решетки не исчезает и не уменьшается при уменьшении продольной силы. Посчитали, что «этому препятствуют силы трения шпал о балласт, а также трение в узлах промежуточных скреплений». Отмечено также, что в результате остаточной деформации остаточные сдвиги увеличиваются;

2) при повторном нагреве рельсов после появления начальной сдвижки выброс наступает при меньшей температуре, чем при начальном нагреве.

В результате был сделан вывод, что «для эксплуатируемого пути недопустима не только конечная стадия потери устойчивости, но и начальная, т.е. под влиянием даже незначительных деформаций».

Е.М. Бромберг в [49] заключает: «Критической сжимающей силой в бесстыковом пути является такая продольная сила в двух рельсовых плетях, при достижении которой путь начинает перемещаться в поперечном направлении, т.е. теряет устойчивость».

Из этого заключения следует, что продольная температурная сила F_t должна быть не больше критической $F_{кр}$ ($F_t \leq F_{кр}$), при этом можно не вводить коэффициент запаса. Таким образом, как отмечено в [1], была рекомендована $F_{кр} = 1800$ кН (с коэффициентом запаса $K_y = 1,2$), т.е. при $F_t = 1500$ кН и при $\Delta t_y = 42$ °С для бесстыкового пути с рельсами типа Р50 на деревянных шпалах.

Описывая процесс потери устойчивости на стенде, автор отмечает [49], что процесс выброса длится приблизительно 0,17 секунды. После 0,6 секунды прекращается перемещение щебенки, пришедших в движение при выбросе. Как правило, наблюдались одновременные перемещения пути вбок и вверх. Лишь в одном из шести опытов почти не наблюдался подъем, в остальных опытах начальный угол подъема был более 10^0 . Как правило, перемещения рельсошпальной решетки происходит в разные стороны по затухающей кривой, лишь в одном опыте из шести перемещение решетки при выбросе произошло только в одну сторону. Далее подробно в [49] описываются все особенности кривых каждого опыта.

Е.М. Бромберг, сопоставляя данные экспериментов с расчетными по теориям К.Н. Мищенко, С.П. Першина, Э. Немешди, Ф. Рааба и Д. Бартлета, сделал вывод, что совпадений теорий с экспериментом не получилось. А именно, отмечено, что место выброса не совпадало с начальными

неровностями. В своих выводах автор [49] указывает на то, что «при увеличении продольной сжимающей силы до некоторого значения, которое можно назвать первым критическим (или просто критическим), появляются поперечные перемещения решетки. На первой стадии эти перемещения имеют статический характер, так как растут они сравнительно медленно. При достижении продольной силой некоторого следующего значения, которое можно назвать вторым критическим (или закритическим), перемещения развиваются весьма быстро и приобретают резко выраженный динамический характер. Эта вторая стадия потери устойчивости длится приблизительно 0,2 секунды.

Здесь относительно подробное описание первых стендовых опытов и выводов в [49] дано с целью последующего анализа с точки зрения их теоретической обоснованности и практики применения, а затем для разработки нормативов по устройству и эксплуатации бесстыкового пути.

Отметим главный недостаток стендовых опытов, заключающийся в том, что они не учитывают воздействие поездов.

Предложенные понятия «критической» и «закритической» сил не подкреплены какими-либо научными выводами, основанными на фундаментальных принципах механики твердого тела. Рассмотрение деформаций при «первом и втором» нагреве рельсов не может означать, что не будет третьего, четвертого и далее следующих нагревов, при которых остаточные деформации не будут иметь последующего роста. Отмеченное несовпадение места потери устойчивости с начальной неровностью никак не оценивается автором по тому, была ли эта неровность напряженной или ненапряженной. Сопоставление величины продольных сил, полученных стендовыми опытами с известными теориями по количественным данным шести опытов некорректно, так как исходные данные хотя бы только погонных сопротивлений имеют случайный характер с большой дисперсией. Тем не менее, методика, описанная в [49], была положена в основу нормативов

в Технических условиях на укладку и содержание бесстыкового пути [52], утвержденных МПС 18.04.1962 г.

Последующие нормативы вплоть до 2012 г. в области бесстыкового пути во многом основывались на тех же выводах, которые были даны в [49].

Стендовые опыты во ВНИИЖТе продолжались более 20 лет (1961–1982 г.г.), за это время было проведено более 320 опытов с рельсошпальной решеткой, состоящей из рельсов Р50, Р65 и Р75, с железобетонными и деревянными шпалами, на различных промежуточных скреплениях (КБ, ЖБ, ЖБР, Д2 и ДО), в прямом участке и в кривых различных радиусов (800, 600, 400, 350 и 250 м).

В этих опытах определялись допускаемые по условию устойчивости повышения температуры рельсов бесстыкового пути $[\Delta t_y]$ °С.

Определяя $[\Delta t_y]$ по результатам серий опытов, в которых с одним и тем же типом конструкции в одних и тех же условиях плана (но каждый раз с укладкой на стенде других экземпляров плетей) повторялись до 10 раз.

Методика проведения опытов на стенде [49] основывалась на следующих основных положениях:

1. Значения допускаемых $[\Delta t_y]$ определялись для пути, на котором балласт был слабоуплотненным. Уплотнение балласта под шпалами производилось с применением вибрационных электрошпалоподбоек ЭШП-3 и ЭШП-7. Специальная проверка степени уплотнения балластного слоя не производилась.

2. Считалось, что до критического значения сжимающих продольных сил в рельсовых плетях поперечные перемещения рельсошпальной решетки вообще возникать не должны, но в порядке первого приближения допускались при действии продольных сил, равных по величине критической, перемещения для прямого участка $y_k \leq 0,2$ мм, а для кривого $y_k \leq 0,4$ мм. Таким образом, посчитали, что критической температурой будет та температура

рельсов, при которой хотя бы в одном поперечном сечении, из наблюдаемых 18, будет достигнуто вышеуказанное критическое значение.

3. Критические значения продольных сжимающих сил в опытах на стенде ВНИИЖТа не считались зависимыми от размеров и конфигурации неровностей рельсов в плане. Не регламентировались и такие параметры, как размеры и форма балластной призмы, степень ее уплотнения, степень закрепления рельсовых плетей промежуточными рельсовыми скреплениями.

4. Учитывались только такие характеристики, как тип рельсов, род балласта, материал и эюра шпал, которые соответствовали действовавшим на это время нормам содержания пути.

Анализируя результаты проведенных стендовых опытов, М.Ф. Вериго [1] замечает, что, например, полученные значения критических температур Δt_k для одного и того же типа верхнего строения пути в опытах со средней крутизной неровностей пути в плане 2,3...4,8 ‰ в различных случаях были от 31 до 49 °С, а максимальные превосходили 80...100 °С, выбросы возымали лишь в двух из девяти опытов при $\Delta t_k = 37$ и 56 °С. Тем не менее в Технических условиях [52] и последующих нормативных документах [53, 54, 55] допускаемое превышение для данного типа верхнего строения пути было установлено 54 °С. Эта же норма осталась в нормативах 2000 [56], 2012 [57] и 2016 [58] годов.

М.Ф. Вериго в [1] замечает, что «из этого следует совершенно определенный вывод, что принимавшаяся до 1968 г. система установления значений Δt_k привела к совершенно недопустимо разнящимся результатам опытов». Он также посчитал, что «Большую неопределенность в итоговые значения Δt_k вносит «волевое», т.е. произвольное, назначение критических значений поперечных деформаций (0,2 или 0,4 мм)».

Далее в [1] утверждается, что «нельзя считать правильным и то, что для прямых участков u_k принято 0,2 мм, а для круговых кривых 0,4 мм. В [1] отмечены также противоречия и значительный разброс результатов назначения критических температур в разных опытах на стенде даже с одним

и тем же объектом: «Авторы методики этих исследований не ограничились только приемом осреднения пяти минимальных температур в различных опытах, но и пошли на некорректное обобщение результатов, полученных в каждом опыте. Они предложили и ввели в практику определения значений Δt_y , следующий прием обобщения всех результатов экспериментов в прямом участке пути и в круговых кривых различных радиусов».

Аналитическое выражение для $[\Delta t_y]$ на основании стендовых опытов с помощью аппроксимирующей прямой было принято в виде:

$$[\Delta t_y]_R = [\Delta t_y]_{R=\infty} - \frac{A}{R}, \quad (2.2)$$

где $[\Delta t_y]_R$ – критическая температура в круговой кривой с радиусом R , °С;

$[\Delta t_y]_{R=\infty}$ – критическая температура в прямом участке пути, °С;

R – радиус круговой кривой, м;

A – постоянный коэффициент, °С·м.

Принцип такой аппроксимации установлен не был, что необходимо для решения проблемы обеспечения устойчивости.

Авторы методики проведения стендовых опытов и анализа их результатов аппроксимирующую прямую провели приблизительно посередине совокупности точек, тогда как для установления критических значений эта линия должна была быть проведена по минимальным значениям.

М.Ф. Вериге [1], бывший тогда заместителем директора ВНИИЖТа, отмечает, что причиной ошибок при анализе результатов стендовых опытов «было принятие при обобщении опытных данных ряда волевых и необоснованных методических положений». Эти решения были приняты из-за того, что «требовалось в кратчайшие сроки установить правила устройства и содержания бесстыкового пути», но к тому времени теоретические методы расчетов устойчивости бесстыкового пути давали «противоречивые результаты». В [1] отмечено, что «наблюдения и опыт эксплуатации

бесстыкового пути отечественных железных дорог показывали, что условия устойчивости бесстыкового пути на стенде и на эксплуатируемых железнодорожных линиях не вполне адекватны».

Поэтому в период 1980–1986 гг. ВНИИЖТом были проведены испытания на участке Института пути – Бескутниково Московской железной дороги, а затем и на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа в Щербинке в условиях движения поездов.

Участок пути Институт пути – Бескутниково был протяженностью всего 2 км. Когда локомотив ЧМЭЗ был в голове состава, его скорость движения достигала 70 км/ч, при движении вагонами вперед скорость была 40 км/ч. В составе было два груженных вагона и один порожний. Балласт был до опытных поездов уплотнен машиной ВПО-3000.

На Экспериментальном кольце в Щербинке масса поезда составляла до 2700 тонн. Электровоз ВЛ80 проходил по опытному участку со скоростью до 80 км/ч.

Анализируя результаты измерений на опытных участках, представленные на рис. 2.1 и 2.2, М.Ф. Вериге отмечает, что «в первую очередь с полной очевидностью следует необоснованность предельных значений Δt_k при максимальных поперечных смещениях рельсошпальной решетки в прямых, равных 0,2 мм, и в кривых – 0,4 мм». Он же замечает, что «из этих рисунков видно, что находящийся в эксплуатации даже прямой бесстыковой путь при изменениях его температуры адекватно и непрерывно с некоторым сдвигом во времени реагирует соответствующими поперечными перемещениями рельсошпальной решетки, т.е. путь как бы «дышит», максимальные значения перемещений составили до 0,85 мм и это не приводило к какому-либо нарушению устойчивости пути. В опытах на круговой кривой радиусом 600 м, перемещения достигали до 2,5 мм.

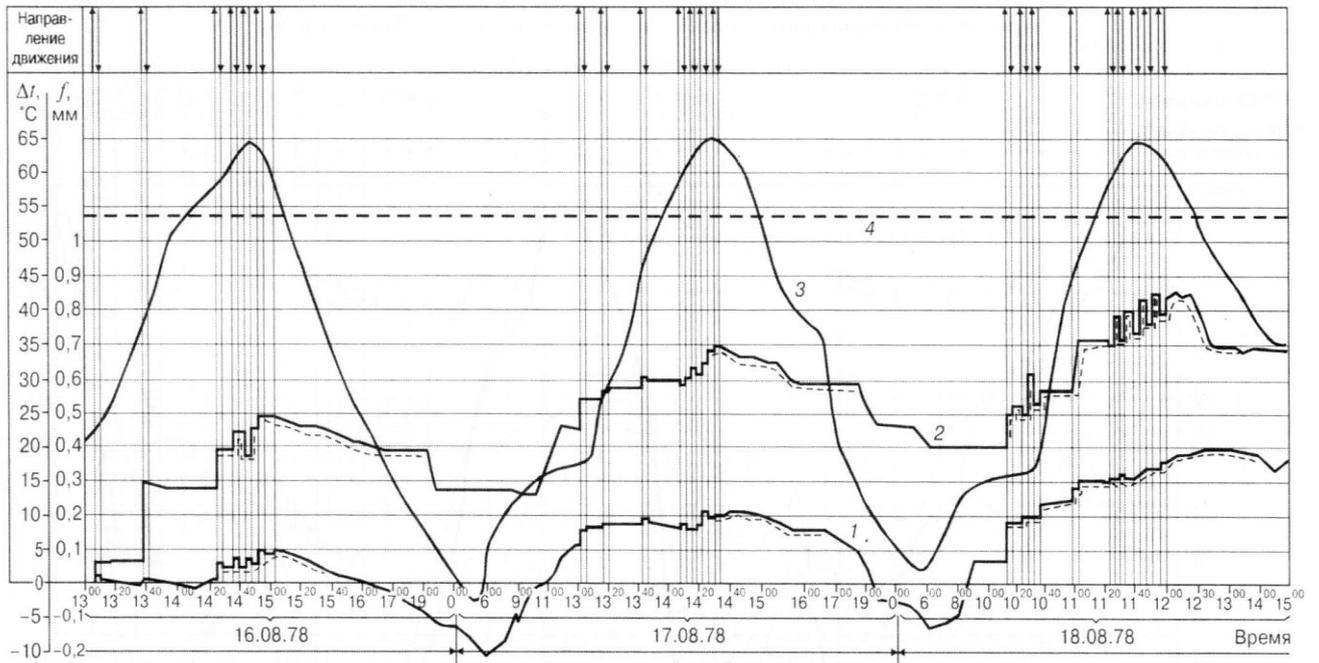


Рисунок 2.1. Изменение стрелы рельсошпальной решетки в плане при одновременном действии поездной и температурной нагрузки на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа в прямой

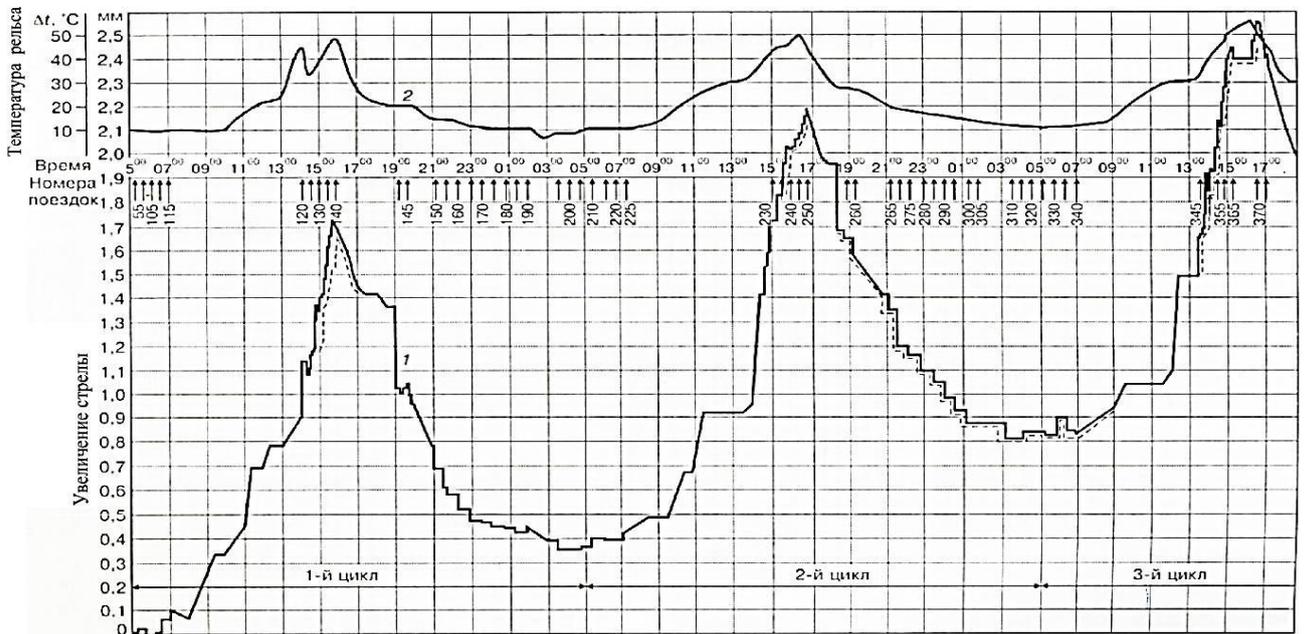


Рисунок 2.2. Изменение стрелы рельсошпальной решетки в плане при одновременном действии поездной и температурной нагрузки на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа в кривой

Ф.М. Вериге в [59] утверждает, что «Все изложенное выше по результатам анализа методов исследования устойчивости бесстыкового пути на стенде и в реальных условиях его эксплуатации не оставляет никаких сомнений в необходимости принципиального пересмотра методов построения нормативной базы устройства, укладки и содержания бесстыкового пути».

Далее в [49] было отмечено, что «в большинстве случаев выбросы бесстыкового пути под действием продольных температурных сжимающих сил в рельсах могут возникать тогда, когда эти остаточные поперечные перемещения рельсошпальной решетки накапливаются в одном месте пути по мере повторения числа циклов «нагревание – охлаждение – нагревание рельсовых плетей» (эффект наследственности деформаций). Поэтому, если принять за основу исследований экспериментальный метод, то он должен быть ориентирован на возможность многократного температурного нагружения продольными сжимающими силами рельсовых плетей».

Здесь следует заметить еще, что остаточные стрелы изгиба рельсов даже только при двукратном нагреве достигали величины 0,8 мм, а если бы эти циклы повторять хотя бы 14 раз, что соответствовало периоду прохода по пути вагона путеизмерителя, то остаточное поперечное перемещение могло бы превысить 6 мм, что привело бы как минимум к частичному отказу, т.е. к необходимости ограничить скорость движения по такой неровности. Еще следует заметить, что стрелы изгиба рельсов в плане росли только во время движения по пути поезда (и уменьшались тоже), но при отсутствии движения поездов оставались неизменными. К тому же следует отметить факт того, что стрелы росли при весьма малых изменениях температуры, а это принципиально противоречило положениям применяемой статики.

В статье Е.М. Бромберга [60], описывающей опыты на одновременное действие на бесстыковой путь поездных и температурных сил вначале, значительная часть изложения приходится на описание стендовых опытов. Методика и результаты опытов на действующем пути описаны в отличие от

стендовых опытов весьма лаконично. При этом в отличие от М.Ф. Вериги [1] в [60] констатируются те же факты, но с противоположным смыслом. А именно: «При охлаждении рельсов решетка вследствие упругости рельсов и в меньшей степени балласта возвращается почти к исходному положению. Поэтому остаточные сдвиги накапливаются достаточно медленно и при надлежащем надзоре за состоянием пути не представляют угрозы внезапного нарушения его устойчивости». И далее: «В пределах допускаемых изменений температур горизонтальные перемещения рельсошпальной решетки происходят в большей мере от действий поездной нагрузки, чем от температурных сил». И наконец: «Предположение о меньшей устойчивости бесстыкового пути во время прохода по нему поезда по сравнению с устойчивостью без поездной нагрузки данными опытов не подтвердилось. Нормы допускаемых повышений температуры рельсовых плетей при содержании пути корректировать нет оснований».

М.Ф. Вериге в [1] задается вопросом: «В чем же причины того, что такого рода противоречия в теории устойчивости бесстыкового пути не были преодолены по крайней мере в течение 25–30 лет?» (в 2000 г.) И отвечает: «Это произошло потому, что эксперименты, являвшиеся основой теории, проводились впервые, т.е. невозможно было воспользоваться опытом других исследователей, и экспериментаторам приходилось первыми прокладывать «дорогу в неизвестное» [1].

Это действительно так, ибо подобные опыты были почти одновременно проведены только в США [61]. Эти опыты хотя и были описаны достаточно подробно, но они не выявили даже тех особенностей работы бесстыкового пути, которые отмечены в [49] и [60]. Авторы [61], кстати, сообщают весьма интересные факты о том, что «в Северной Америке к 1982 году протяженность бесстыкового пути составляла 117 тыс. км (28 % от общей протяженности дорог региона). Количество потери устойчивости бесстыкового пути на этих

железных дорогах превышало 1300 случаев в год и из них 114 случаев завершилось сходами поездов с рельсов».

До этих опытов во Франции проводились исследования сопротивлений пути поперечным перемещениям с помощью специального нагрузочного вагона [62, 63].

Но такая имитация реального взаимодействия пути и подвижного состава была достаточно далека от реальности. Следует отметить, что В.И. Новакович еще в 1976 году опубликовал в [20] теорию определения устойчивости бесстыкового пути с учетом воздействия поездов. Она была очередной раз в 1988 году опубликована на трех европейских языках в журнале «Rail International», № 11 [64] и защищена в 1985 г. в докторской диссертации «Основы реологии бесстыкового пути и ее приложения» [65]. Эта теория получила официальное признание хотя бы в том, что она изложена в учебном пособии «Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями», рекомендованном агентством железнодорожного транспорта РФ [66, 95]. Научные результаты, изложенные в [66, 95], получили внедрение в «Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» [57] и [58]. Настоящая диссертационная работа направлена на дополнительное доказательство справедливости этой теории при помощи энергетического метода – метода возможных перемещений, который при учёте воздействия поездов до этого не использовался.

В начале 60-х годов прошлого столетия перед массовым внедрением бесстыкового пути в СССР лаборатория бесстыкового пути ВНИИЖТа [67] провела большую серию опытов по определению механических характеристик верхнего строения пути с различными типами рельсов, шпал (деревянных и железобетонных), балласта, промежуточных и стыковых скреплений, известных на то время.

Наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние бесстыкового пути оказывают сопротивления балласта сдвигу шпал в балласте. При этом на устойчивость конструкции верхнего строения пути одним из основных является влияние, оказывающее сопротивление сдвигу шпал в балласте поперек оси пути. В то время исследователи лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТа эти сопротивления называли «расчетными» [67], а под расчетными понимали среднеарифметические их значения.

Тогда, основываясь на знаниях работы звеньевого пути, но еще не имея практического опыта применения бесстыкового пути, относительно справедливо авторы [67] отмечали, что «на сопротивление шпал и в балласте сдвигу влияют тип и размеры шпалы, материал шпалы и балласта, размеры фракций балласта и форма его частиц, размеры и форма балластной призмы, качество уплотнения балласта, степень засоренности и влажности балласта и т.д., но главным определяющим фактором является вертикальная нагрузка на шпалу, включающая и собственный ее вес».

Теперь, через более чем полустолетие, в которое бесстыковой путь стал основной конструкцией верхнего строения пути, некоторые из перечисленных утверждений следует пересмотреть и уточнить. Так, основное понятие слова «расчетные» значения сопротивлений не должны являться средними арифметическими значениями, или, как иногда их называли, «математическими ожиданиями». В случаях, когда решались вопросы определения необходимых сил при работах по рихтовке или определения других необходимых внешних сил для сдвига рельсов или рельсошпальной решетки в балласте, необходимо было в расчет брать по вероятности максимальную силу сопротивления, т.е. это среднее арифметическое значение плюс три среднеквадратических отклонения. Если же требовалось удержать рельсошпальную решетку от сдвига внешними активными силами, реактивную силу сопротивления следовало в расчет брать максимальной по

вероятности, т.е. среднее арифметическое ее значение, минус три среднеквадратических отклонения. В инженерных расчетах вообще всегда необходимо брать в учет по вероятности худшее из возможных состояний объекта для того, чтобы обеспечить успех при приложении активных сил и получить желаемую деформацию, или предотвратить эту деформацию с помощью реактивных сил сопротивления.

В настоящее время бесстыковой путь применяется исключительно на железобетонных шпалах, хотя бесстыковой путь на деревянных шпалах – неплохая конструкция верхнего строения. Деревянные шпалы оказались неконкурентоспособными из-за высокой стоимости их утилизации после истечения срока службы.

За последние полвека стало ясно, что гранулометрический состав щебня должен быть в пределах 25...60 мм и только твердых пород. Тогда считалось, что форма балластной призмы должна соответствовать размерам плеча балластной призмы в 25 см с откосом 1:1,5. В последнее время плечо балластной призмы увеличивали, и оно достигло 45 см. Эта тенденция должна быть дополнительно изучена. Также дополнительному изучению необходимо подвергнуть утверждение о том, что «определяющим фактором является вертикальная нагрузка на шпалу и собственный ее вес (масса). В статике, конечно, чем больше вертикальная сила будет действовать на шпалу, в том числе ее собственная масса, тем большее будет сопротивление ее сдвигу в горизонтальной плоскости и вдоль, и поперек оси пути».

М.Г. Андреевский [68] провел эксперименты в тупике ст. Ташкент, в которых измерял статические сопротивления шпал перемещениям в зависимости от вертикальной нагрузки. Вертикальную нагрузку он изменял, увеличивая объем воды в тендере паровоза. В результате он получил зависимость, по которой сопротивление сдвигу шпалы увеличивалось пропорционально увеличению вертикальной нагрузки. Однако этот

эксперимент не мог воспроизводить реальные сопротивления шпал, которые возникают при движении поезда.

Обработка опытных данных, полученных по методике проведения экспериментов с определением сопротивлений шпал сдвигам в балласте в СССР во ВНИИЖТе, началась в 1956 г. [69] на песчаном балласте. Вначале пытались определить сопротивление продольному перемещению целого звена рельсошпальной решетки с помощью силового воздействия 200-тонного домкрата. Усилие, передаваемое домкратами, регистрировалось манометром, а перемещения – мессурами.

Отмечались величины сопротивлений в начале сдвига и при достижении максимума сопротивления, что считалось «пределом сопротивления».

В 1957 г. [67] лаборатория бесстыкового пути ВНИИЖТа провела первые серии опытов с железобетонными шпалами на Белорусской железной дороге. В этих экспериментах опыты проводили уже с одиночными железобетонными шпалами. Нагрузку на одну шпалу делили на расстояние между осями смежных шпал и таким образом получали более удобную для расчетов величину погонного сопротивления.

При сдвиге шпал поперек оси пути упором, от которого отталкивалась шпала, служил сам рельс. При этом шпала расшивалась – освобождалась от подкладок. Смещение шпалы регистрировалось по показаниям мессур с ценой деления 0,01 мм. Усилия измерялись при подвижках шпал на 0,5; 1; 2; 5 и 10 мм. По каждому виду испытаний проводилось 20...30 циклов опытов. По средним данным были построены графики зависимостей сопротивлений от величины перемещения.

Проведенные в 1957 г. опыты позволили сделать ряд методических выводов и рекомендаций. В частности, решено было отказаться от измерений усилий по показаниям манометров и перейти на измерения усилий с помощью тарированных цилиндрических пружин.

В 1958 г. лаборатория бесстыкового пути ВНИИЖТа проводила подобные эксперименты на Закавказской железной дороге, в 1959 и 1960 гг. – на Октябрьской и Донецкой железных дорогах.

По материалам измерений сопротивлений деревянных и железобетонных шпал на ряде вышеперечисленных дорог были построены графики зависимостей сопротивлений перемещениям шпал поперек и вдоль оси пути. Экспериментаторы, подводя итоги этой работы, констатировали следующее. Рассматривая графики сопротивлений перемещению поперек оси пути (рис. 2.3), можно видеть, что сдвиги шпал становятся заметными лишь тогда, когда сдвигающая нагрузка достигает определенной величины (а не нуля) – 0,02 мм. Эта нагрузка соответствует начальным сопротивлениям шпал.

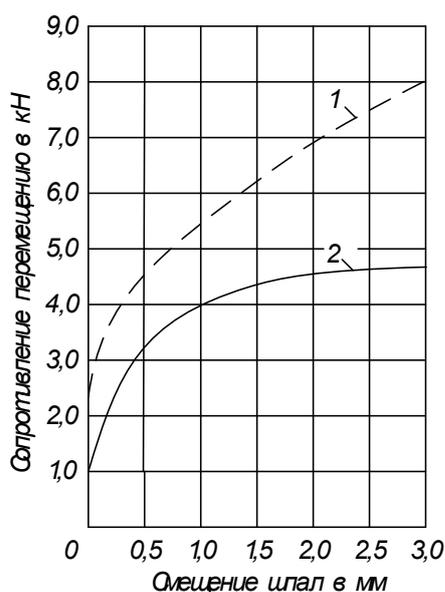


Рисунок 2.3. График сопротивлений железобетонных шпал перемещениям:

1 – вдоль оси пути; 2 – поперек оси пути [67]

После начала сдвиги сопротивление продолжает интенсивно возрастать при очень небольшой сдвиге – до 1...1,5 мм. Этот участок графика, по мнению авторов [67], «характеризует собой упругие деформации щебеночного балласта. Дальнейшая сдвигка до 2...3 мм происходит уже

почти без возрастания сопротивления, и с этого момента сопротивление оказывается преодоленным. График сопротивления обычно имеет максимум – это предел сопротивления».

В.И. Новакович, анализируя представленные в работе [34] графики, провел их аппроксимацию. При этом он выбрал аппроксимирующую функцию не от какой-либо начальной величины, а от нуля. Такую функцию с ссылкой на [34] Г.М. Шахунянец использовал в своем учебнике [38]. Дело в том, что цена делений в используемых приборах, зависящая от точности измерений, не позволяла найти с достаточной точностью начальное сопротивление. При этом, если, как это заявляли экспериментаторы, на начальном этапе балласт проявлял упругие свойства, т.е. подчинялся закону Гука, то значит, необходимо считать начала графиков от нуля. К тому же с точки зрения последующих расчетов продольных сил и перемещений в бесстыковом пути разница их результатов зависит от затраченной энергии, а энергия, затраченная на перемещение шпал в балласте, может быть вычислена по площади, заключенной между графиком функции $q(y)$ и отрезком оси абсцисс, на которой откладывалось перемещение Δy . Таким образом, разница в расчетах будет пренебрежимо малой, считать ли перемещения от начальной силы сопротивления q_0 или от $q = 0$. Но при $q = 0$ расчетные формулы становятся намного проще.

Опыты лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТа имели очень большой объем работы, но по методике и по результатам мало отличались от опытов, проведенных другими отечественными и зарубежными исследователями.

Сопротивления железобетонных шпал перемещениям поперек оси пути, которые рекомендовалось использовать в расчетах бесстыкового пути на устойчивость, у различных авторов при принятии допущения, что $q = \text{const}$, считались равными: у В.В. Григорьева (СССР) 6,5 кН [70], М.Т. Членова

(СССР) 4,65 кН [71], С.Н. Попова (СССР) 4,5 кН [72], В. Брокмана (Голландия) 5,0 кН [73], Ф. Корини (Италия) 2,78 кН [74], Г. Рубина (Швеция) 6,0 кН [43], Х. Мейера (Германия) 2,8...35 кН [75], Р. Сонневиля и А. Бенто (Франция) 7,3 кН [76], Ф. Бирмана (Германия) 3,5...4,0 кН [77].

Подводя итоги опытам по определению сопротивлений шпал перемещениям поперек оси пути, лаборатория бесстыкового пути ВНИИЖТа отмечала, что аппроксимация графиков зависимостей $q(y)$ может быть представлена уравнением вида $q = A \cdot \sqrt[6]{y}$. При этом дисперсия опытных данных достаточно велика настолько, что «расчетное определение сопротивления дает отличия от измеренных величин до 50 %» [67].

Рекомендовалось в итоге брать в расчет $q = 8,5 \dots 9$ кН/м.

Отметим здесь, что все вышеописанные опыты по определению сопротивлений шпал сдвигу в балласте отечественными и зарубежными исследователями проводились в статике без учета воздействия поездов.

С конца шестидесятых до середины семидесятых годов прошлого столетия с учетом воздействия поездов опыты на действующих участках бесстыкового пути проводил В.И. Новакович [66, 95], а позже В.В. Ершов [2]. Особенно большой цикл опытов на действующих участках бесстыкового пути на железобетонных шпалах были проведены В.В. Ершовым на Куйбышевской железной дороге. Он провел такие опыты на участках, пропустивших различный тоннаж грузов, и при воздействии на шпалы нагрузкой 4; 3; 2 и 1 кН (табл. 2.1). В.В. Ершов в приводимой здесь таблице 2.1 фиксировал пропущенный тоннаж через тысячи осей (числитель в первой колонке таблицы) и через тысячи тонн брутто. По величине средних перемещений он определял интенсивность перемещений в $\frac{\text{мм} \cdot 10^{-3}}{\text{тыс.осей}}$.

Таблица 2.1

Результаты определения реологических констант по данным В.В. Ершова

Обкатка пути до приложения сил, $\frac{\text{тыс. осей}}{\text{тыс.т. брутто}}$	Силы, прикладыва- емые к шпале, Q , кН	За период действия сил			Кoeffици- ент корреля- ции $r(q, \bar{y})$	Уравнение регрессии для середины доверительного интервала $Q_m(y)$
		пропущено, $\frac{\text{тыс. осей}}{\text{тыс.т. груза}} \cdot \text{брутто}$	среднее перемещение шпалы, y , мм	интенсивность перемещения шпал, $\frac{\text{мм} \cdot 10^{-3}}{\text{тыс. осей}}$		
$\frac{0,16}{1,65}$	1	29/299	3,82	138,8	0,95	$Q_{0,16} = 1,11 + 1,87y$
	2	26/268	14,04	448,6		
	3	26/268	24,74	717,5		
	4	26/268	24,30	1653,4		
$\frac{0,95}{16,35}$	2	15/258	6,95	603,4	0,92	$Q_{0,95} = 0,29 + 3,40y$
	3	15/258	10,84	676,6		
	4	11,89	12,90	1106,7		
$\frac{31,07}{457,85}$	1	13/192	0,79	66,4	0,97	$Q_{31,07} = 0,68 + 5,08y$
	2	23/339	7,69	324,6		
	3	27/398	10,46	371,35		
	4	15/221	15,63	667,4		
$\frac{4,174}{734,05}$	2	12/177	2,14	182,4	0,99	$Q_{0,16} = 1,11 + 1,87y$
	3	14/207	2,08	373,1		
	4	12/177	8,46	614		

Представляется более наглядным и физически обозримым те же цифры представить в других единицах измерения, а именно в $\frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$, полученных в результате пересчета их при средней грузонапряженности 40 млн т км/км брутто в год. В этом случае данные таблицы 2.1 В.В. Ершова будут представлены таблицей 2.2 [8].

Таблица 2.2

Результаты определения реологических констант по данным В.В. Ершова

в пересчёте с $\frac{\text{мм} \cdot 10^{-3}}{\text{тыс. осей}}$ на $\frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$

Обкатка пути до приложения силы (тыс.т. брутто)	q $\left(\frac{\text{кН}}{\text{м}}\right)$	За период действия сил			Коэффициент ζ		Коэффици- ент корреляции $r(q, \bar{y})$	Коэффициент ζ	
		q_0 $\left(\frac{\text{кН}}{\text{м}}\right)$	\bar{y} (мм)	$\bar{\dot{y}}$ (мм/тыс.т)	$\frac{\text{кН} \cdot \text{тыс.т.}}{\text{м} \cdot \text{мм}}$	среднее значение		$\frac{\text{кН} \cdot \text{с} \cdot 10^8}{\text{м}^2}$	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	

Анализируя данные опытов, представленных в таблицах 2.1 и 2.2, можно отметить следующие факты. Начальное сопротивление q_0 по своей средней величине намного меньше, чем среднее его значение, найденное статическими опытами. При этом оно имеет значительный разброс. Таким образом, в расчет нужно брать минимальную его по вероятности величину, а это значит, что в расчете бесстыкового пути на устойчивость необходимо принимать $q_0 = 0$, так

как величина $0,1 \text{ кН/м}$ – это такое значение q_0 , которое не превышает точности измерений сил при проведении эксперимента.

Отчетливо видно, что по мере уплотнения балласта при помощи пропущенного тоннажа растет величина начального сопротивления q_0 и коэффициента вязкости ξ . Также четко видно, что при воздействии проходящих поездов чем больше активная сила q , создаваемая прибором, тем больше скорость деформации \dot{y} , от которой зависит коэффициент вязкости ξ . При этом коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи q и \bar{y} (погонной силы и средней скорости перемещения шпал поперек оси пути), очень большой. Он велик даже при весьма малой плотности балласта (сразу после его перегрохотки), когда дисперсия значений q и \dot{y} очень велика, до $0,95$. При максимальной плотности балласта по данным экспериментов В.В. Ершова коэффициент $r(q, \bar{y}) = 0,99$. Это означает настолько большую тесноту связи, что зависимость $q(\bar{y})$ можно считать практически детерминированной. Но это не значит, что можно искать в расчетах с использованием экспериментальных значений ξ точных совпадений с фактическими деформациями. Цель проведенных опытов ограничивалась только тем, что требовалось доказать существование такой зависимости. И это было необходимо для того, чтобы объяснить наблюдаемые на практике и экспериментах явления, которые при применении статических методов сделать было невозможно.

Эксперименты с одиночными шпалами, открепленными от рельсов для возможности их смещения относительно рельсов, на действующих участках имели некоторые погрешности по сравнению со смещением, например группы шпал. Но главное отличие от статических опытов заключалось в учете воздействия поездов.

Чтобы определить сопротивления железобетонных шпал перемещениям поперек оси, необходимо было разработать и изготовить специальные приборы и приспособления.

В.В. Ершов применял пружинно-винтовые приборы (рис. 2.4), которые тянули шпалу на себя, упираясь в рельс [2]. Величина прикладываемой к шпале силы фиксировалась через индикатор часового типа, пружины были тарированы. Подкладки были специальными – верхняя часть прикреплялась к рельсу, а нижняя к шпале. Эти две части могли сдвигаться относительно друг друга поперек оси пути, но вертикальные перемещения у них были одинаковыми.



Рисунок 2.4. Пружинно-винтовой прибор В.В. Ершова [2]

Таким образом осуществлялся учет специфики воздействия поездов, заключающейся в вертикальном прогибе, который происходит под колесной тележкой подвижного состава, и обратный прогиб в межтележечном пространстве.

В работах [65, 66, 95] автор для измерения перемещений под поездом применял раму (рис. 2.5), которая создавала возможность упираться в торец шпалы сжатой тарированной пружиной.

Рама зацеплялась за подошву рельса с упором в головку (для создания реактивного момента).



Рисунок 2.5. Рама с пружинно-винтовым прибором [65, 66, 95]

Диаграмма записи самописцами имела вид, представленный на рис. 2.6

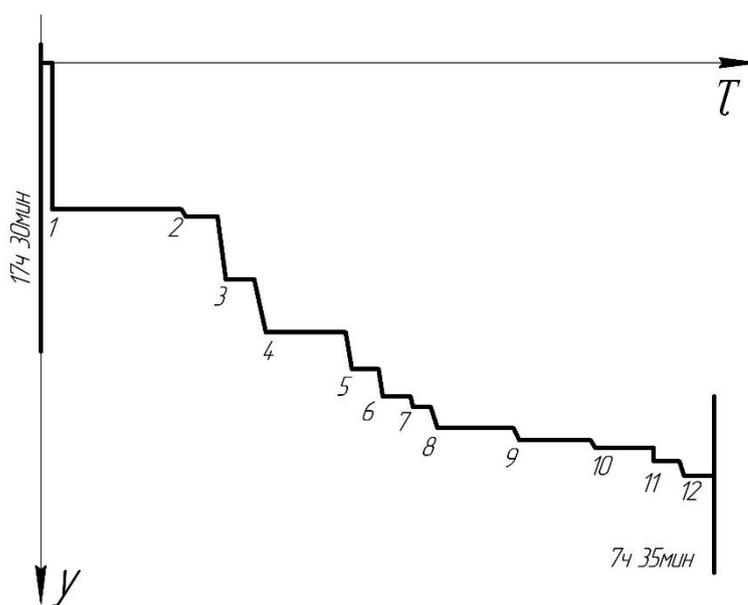


Рисунок 2.6. Диаграмма записи поперечных перемещений шпалы [66, 95]

На такой диаграмме лентопротяжный часовой механизм фиксировал поперечные перемещения шпалы, при этом в отсутствие поезда на ленте карандашом рисовалась горизонтальная линия, а при проходе – вертикальная.

При каждом проходе поезда фиксировалась ступенька, т.е. только во время прохода поезда происходили перемещения шпалы, а в отсутствии поездов перемещения не происходили. Подобные перемещения шпал происходят и поперек и вдоль оси пути, но вдоль оси пути они на порядок большие, чаще около миллиметра, поперек же оси редко бывает около 0,1 мм.

В опытах В.И. Новаковича [66, 95] с помощью вибрографа удалось растянуть диаграмму перемещений за время прохода одного поезда (рис. 2.7).

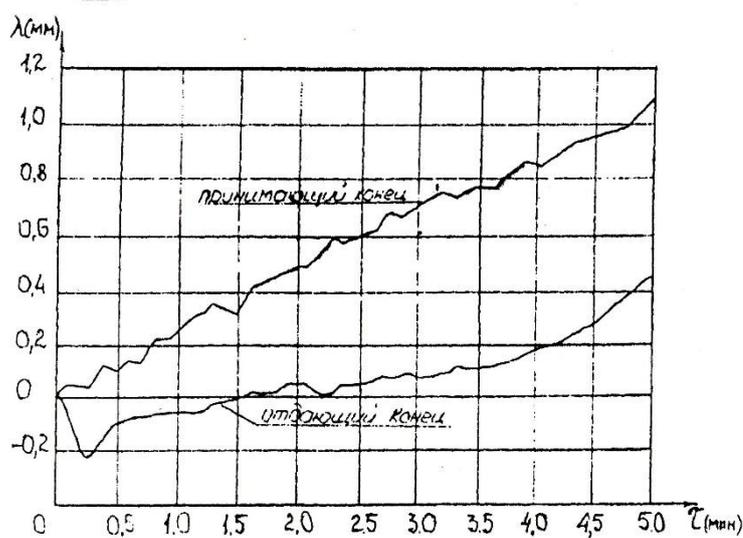


Рисунок 2.7. Диаграмма продольных перемещений концов рельсовых плетей за время прохода одного поезда

Это время составляло около пяти минут. По таким диаграммам видно, что перемещения происходят монотонно за время движения поезда. Нет, как могло предполагаться, перемещений впереди поезда и за его хвостом. Этот факт косвенно может свидетельствовать о том, что потеря устойчивости рельсовой колеи перед поездом и за его хвостом маловероятны, поскольку напряженные неровности возникают из-за уменьшения коэффициента вязкости ξ во время перемещений в середине поезда.

Поскольку перемещения шпал в балласте поперек оси пути происходят под действием продольных сил в местах напряженных неровностей, то нужно

полагать, что в это время погонные сопротивления уменьшаются и стрела неровности растет [80]. Если этот рост происходит от продольной силы, то по показаниям диаграмм измерений положения оси рельсов в плане, получаемых путеизмерительным вагоном, можно предположительно считать, что начальное сопротивление q_0 становится преодоленным. Таким образом, это начальное сопротивление можно вычислить по известной формуле

$$f = \frac{q \cdot l^4}{415 \cdot EI}, \quad (2.3)$$

то есть

$$q = \frac{415 \cdot fEI}{l^4}. \quad (2.4)$$

На графике зависимости $f(l)$ (рис. 2.8) нанесены типичные результаты измерений f и l из диаграмм, полученных путеизмерительным вагоном. Значения координат точек, нанесенных в рис.2.8 взяты из таблиц Северо-Кавказского Центра диагностики (Приложение 1).

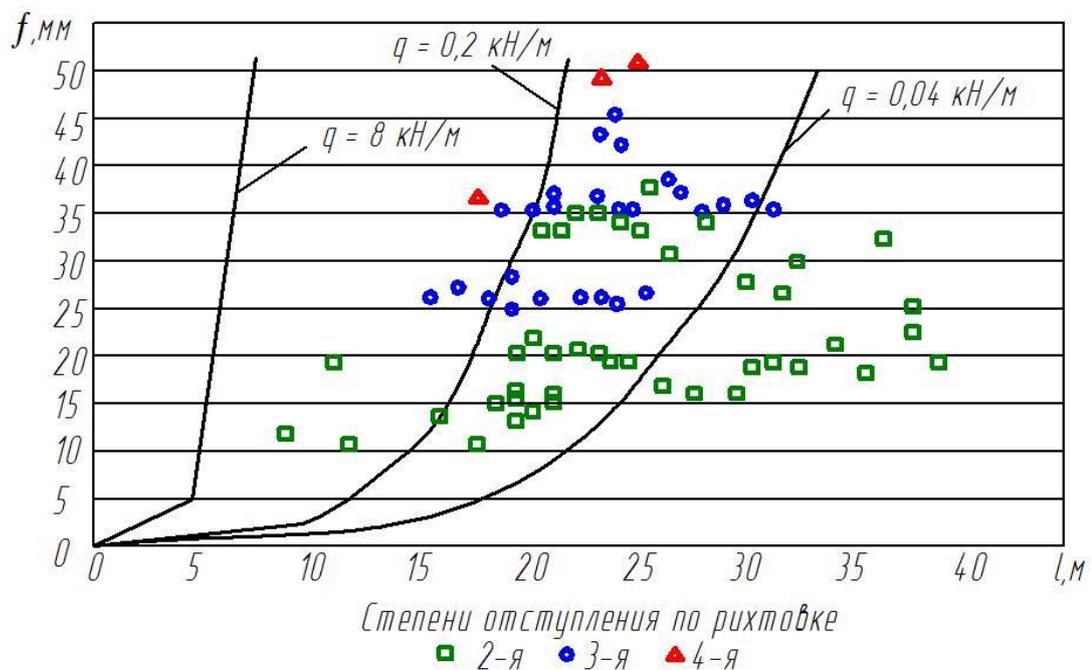


Рисунок 2.8. Зависимость стрел изгиба от длины неровности [80]

Как видно из $f(l)$, неровности в плане на неисправностях даже 4-й степени соответствуют относительно небольшим значениям q – намного менее 1 кН/м. При этом неровности имеют стрелы не более 50 мм.

«Напряженные» и «ненапряженные» неровности, как термины начали применять при рассмотрении условий устойчивости бесстыкового пути ещё в 20-е годы прошлого столетия сначала М.А. Мартине. К.Н. Мищенко, ссылаясь на М.А. Мартине писал, что «изгиб напряженного стержня становится возможным лишь по достижении силы определённой величины, которая соответствует формулам (2.3) и (1.13)». Численные коэффициенты в этих формулах соответствуют конфигурации принимаемой в расчет неровности. Придавалось очень большое значение математической точности отображения этой неровности, как по числу волн, так и по величине постоянных коэффициентов, которые порой определялись с точностью до четвёртого знака после запятой.

С.П. Першин в своей работе [11] (с. 81, 88), рассмотрев основные методы расчёта бесстыкового пути на устойчивость, в частности Р. Леви, Ф. Рааба, Э. Немешди, Г. Мейера, констатирует, что «в расчётной схеме рассматривается сжатый упругий стержень с жёсткостью при изгибе в горизонтальной плоскости двух рельсов, который имеет ненапряженное начальное искривление со стрелой f_0 и длиной l , находится в среде, оказывающей сопротивление сдвигу и испытывает при изгибе противодействие со стороны реактивных моментов в узлах». Мы, как было выше указано, эти моменты сопротивления в узлах (в промежуточных скреплениях), предложили считать равными нулю, так как посчитали, что они могут релаксироваться при воздействии на путь поезда. Учет указанной релаксации является – принятием в расчёт худшего из возможных по условиям устойчивости варианта.

А.Я. Коган [78] отмечал, что «в критическом случае начальная ненапряженная неровность порождает силовую неровность, совпадающую по конфигурации с формой потери устойчивости» и далее: «в критическом случае

напряженная неровность и форма потери устойчивости совпадают». Ненапряженную неровность он также называл «бытовой» и справедливо указывал на невозможность отличить напряженную неровность от ненапряженной по их конфигурации.

Вышеупомянутые авторы рассматривали условия устойчивости бесстыкового пути в пределах статики, поэтому у всех расчётные формулы сводились к (2.3) и (1.13) или вместо одной из них, что ничего в принципе не меняло, все сводилось к формуле:

$$F = A_1 \sqrt{\frac{EIq}{f}}, \quad (2.5)$$

где A_1 – коэффициент, зависящий от принимаемой конфигурации кривой изгиба рельсов в плане.

Если бы функции (2.4) и (2.5) были детерминированными, то и тогда решение об устойчивости рельсошпальной решётки состояло из бесконечно большого числа вариантов, поскольку в двух уравнениях присутствовало бы, как минимум, пять неизвестных – это F , l , f , q , и I . Обычно при расчётах задаются значениями f , q , и I , вычисляя затем F и l . Но такие расчёты являются весьма приближёнными и никак не могут отражать фактические условия устойчивости для каких-либо конкретных случаев. Результаты подобных расчётов можно было использовать только для сравнения вариантов, например, для сравнения условий устойчивости бесстыкового пути с различными типами рельсов.

Проводимые в СССР и за рубежом эксперименты на эксплуатируемых участках бесстыкового пути показали, что под действием продольных сил в рельсах перемещения рельсошпальной решётки вдоль и поперёк оси пути происходят только во время движения подвижного состава. Эти факты побудили высказать предположение [38], что во время движения поезда погонные сопротивления перемещениям шпал в балласте существенно

уменьшаются (на 30...50%). Однако причин и механизма такого уменьшения погонных сопротивлений никто не раскрыл. В принципе, это и нельзя сделать, пользуясь теорией упругости или пластичности, а лишь в пределах только этих теорий ранее делались попытки решить поставленную задачу.

Для определения сил и деформаций в сооружениях с учётом фактора времени существует теория ползучести. Только с помощью этой теории решаются задачи, в которых требуется получить ответ на вопрос: когда, какие и в каком месте произойдут изменения сил и деформаций в элементах конструкции, в частности, в рельсах бесстыкового пути? Считая рельсы чисто упругими, и абсолютно жёстко соединёнными со шпалами при продольных их перемещениях в балласте, можем объяснить наблюдаемые процессы, если учтем вязкие свойства балласта, возникающие только во время движения по пути поезда. Перечисленные выше допущения могут быть уточнены в зависимости от требований практики, если какие-либо из наблюдаемых явлений не будут объясняться в пределах выбранных предпосылок.

Среди реологических констант, которые необходимы для расчётов бесстыкового пути с учётом фактора времени, наиболее влияющим на результат является коэффициент вязкости ξ . По закону И. Ньютона погонное сопротивление перемещению шпал в балласте поперёк оси пути $q = \xi \dot{y}$, где \dot{y} – скорость перемещения железобетонных шпал в балласте поперёк оси пути. Коэффициент вязкости определяется с помощью – «эксперимента на ползучесть», при котором при постоянной нагрузке на шпалу, направленной поперек её оси за определённое время фиксируется скорость деформации, то есть \dot{y} , а значит и ξ . Таким образом, можно более справедливо говорить о том, что не q уменьшается во время движения поезда, а уменьшается коэффициент вязкости ξ , и тогда возникает перемещение y , которое имеет определённую скорость \dot{y} .

Данные о реальных неровностях в действующем пути показывают, что по статическому расчету (без учета воздействия поездов) неровность рельсов в

плане существенно круче, чем фактически измеренная путеизмерительным вагоном. Этот факт свидетельствует о том, что сопротивления сдвигу шпал в балласте должны определяться не погонными сопротивлениями q , а его вязкостью, характеризуемой коэффициентом ξ , который можно определить с учетом скорости роста стрел изгиба в плане ($V = \ln(f/f_0)/\tau$):

$$\xi = \frac{AF^2}{EI/V}, \quad (2.6)$$

где A – коэффициент, зависящий от конфигурации изгиба.

Если на бесстыковом пути имеется неровность в плане длиной l со стрелой f при изгибной жёсткости рельсошпальной решётки EI и в рельсах действует продольная сжимающая сила F , а погонное сопротивление перемещению шпал в балласте поперёк оси пути q ещё удерживает рельсы от поперечного сдвига, то такая неровность является ненапряжённой. Если теперь, например, увеличивать продольную сжимающую силу в рельсах F , то эта ненапряжённая неровность, в конце концов, станет напряжённой, и произойдёт мгновенная потеря устойчивости [88]. Так теряется устойчивость рельсошпальной решётки при выполнении стендовых опытов. То же самое случится, если вместо увеличения продольной силы уменьшать погонное сопротивление q . В этом случае также произойдёт переход от ненапряжённой неровности к напряжённой, что и происходит под движущимся поездом. Но под поездом мгновенное перемещение на большую величину стрелы, как на стенде при статических опытах, произойти не может, так как поездная вертикальная нагрузка одновременно препятствует этому. При движении поезда происходят знакопеременные вертикальные перемещения рельсошпальной решётки. Под вагонными тележками рельсы прогибаются вниз. А в межтележечном пространстве возникает их обратный прогиб с обезгруживанием шпал. Имитировать этот процесс с помощью каких-либо вибраторов бесполезно, так как сотрясения пути под поездами имеют свою специфику, которую при проведении опытов на ползучесть необходимо по

возможности сохранить. С сохранением по мере возможностей влияния на результаты такой специфики сотрясений в действующем пути были проведены опыты по определению реологических констант В.И. Новаковичем и В.В. Ершовым. Это теперь позволяет более конкретно решать задачи по определению изменений напряжённо-деформированного состояния бесстыкового пути и по определению условий его устойчивости.

Таким образом, можно априори предположить, что, если периодически измерять стрелы неровностей рельсов в плане, можно отличить напряжённую неровность от ненапряжённой на действующих участках пути. Если стрела неровности во времени растёт, значит, неровность в этом месте становится периодически напряжённой. При этом такой она становится только при повышении температуры рельсов в дневное время, когда температура рельсов превышает температуру закрепления и где относительно малое влияние имеют погонные сопротивления q и изгибная жёсткость рельсошпальной решётки EI . Значения величин стрелы прогиба рельса в плане f и длины неровности l (в пределах реальных значений) могут быть очень разными и при этом никак не определять её вид (напряжённая ли она или ненапряжённая). Могут происходить изменения стрелы в процессе эксплуатации под воздействием других факторов – таких как, например, вертикальные просадки, которые не всегда бывают строго вертикальными. Но, когда стрела увеличивается именно при росте сжимающей продольной силы во время повышения температуры рельсов, то это является явным признаком возникновения напряжённой неровности. Таким образом, в железнодорожном пути может быть выявлено опасное по условию устойчивости место [88].

Прежде чем приступить к ликвидации этого опасного места, нужно обследовать его визуалью с целью установления или исключения других причин, кроме, по вероятности, главной – повышенной сжимающей продольной силы в рельсах или пониженной температуры закрепления.

Необходимо удостовериться в том, что в данном месте фактическая температура закрепления ниже установленной и записанной в Журнале учёта службы и температурного режима рельсовых плетей. Сделать это можно по методике, приведенной в «Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (ЦП-2788)».

Согласно этой методике, разработанной и предложенной РГУПС, фактическая температура закрепления t_{ϕ} определяется по формуле:

$$t_{\phi} = t_p \pm \frac{\Delta l}{\alpha l_{50}}, \quad (2.7)$$

где t_p – температура рельса во время раскрепления и удлинения (укорочения) 50-метрового участка рельсовой плети (l_{50}), примыкающего к опасному месту;

Δl – изменение длины 50-метрового участка рельсовой плети после раскрепления.

Определив t_{ϕ} , мы получаем возможность сравнить её с требуемой (установленной) температурой закрепления плети и сделать соответствующие выводы. Если разница между температурами фактической и записанной в Журнале учёта значительна, то можно считать, что причина появления напряжённой неровности установлена и вовремя устранена.

Создание такой методики стало возможным при определении закона изменения стрелы напряжённой неровности во времени [66, 95]. Но в настоящей диссертации была поставлена цель подтвердить (или опровергнуть) эту методику, проведя определение того же закон другим – энергетическим методом, который основан на принципе возможных перемещений – принципе Лагранжа. Этому вопросу посвящена следующая глава.

2.2. Выводы по главе 2

1. Эксперименты по определению сопротивлений балласта сдвигу шпал поперёк оси пути не учитывали фактор времени и воздействие поездов.

2. Эксперименты по определению сопротивлений щебня сдвигу шпал поперек оси пути с учетом воздействия поездов показали, что зависимость этих сил от деформаций подчиняется закону вязкости Ньютона.

3. С помощью путеизмерительного вагона оценены параметры начальных напряженных неровностей рельсов в плане в зависимости от скорости поперечного перемещения колеи бесстыкового пути в опасных местах.

4. Установлено, что использование методов теории ползучести позволяет объяснить фактические изменения продольных сил и деформаций в бесстыковом пути. Сопротивления сдвигу шпал в балласте должны определяться не величиной погонного сопротивления q , а его вязкостью, характеризуемой коэффициентом ξ ($q = \xi \cdot \frac{df}{d\tau}$ – вязкие погонные сопротивления сдвигу шпал в балласте поперек оси пути; ξ – коэффициент вязкости балласта, сдвигаемого шпалами, кН·с/м²; $\frac{df}{d\tau}$ – скорость роста стрелы изгиба).

3. МЕТОД РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИНЦИПЕ ВОЗМОЖНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЕЗДОВ

3.1. Обоснование предпосылок и допущений для применения энергетического метода расчета бесстыкового пути на устойчивость

Как отмечалось в первой главе, С.П. Першин [11] разделил энергетические методы, основанные на принципе возможных перемещений, на полные и сокращенные. Полные решения учитывали падение продольной сжимающей силы при изгибе рельсошпальной решетки в плане при потере ею устойчивости. Однако при падении величины сжимающей продольной температурной силы во время потери ею устойчивости стрела изгиба рельсов в плане становится такой большой величины, при которой движение поездов становится невозможным.

По теории К.Н. Мищенко [10], при потере устойчивости бесстыкового пути стрела $f = 0,16$ м при длине неровности $l = 18,55$ м, по методу А. Блоха [13] $f = 0,16$ м при $l = 15,70$ м, по методу Э. Немешди [33] $f = 0,12$ м при $l = 12,87$ м, по методу М. Нумато [14] $f = 0,30$ м при $l = 14,10$ м. По таким неровностям рельсов в плане пропускать поезда нельзя в соответствии с инструкцией ЦП-515 [89] с дополнениями [90].

В сокращенных методах расчета бесстыкового пути на устойчивость энергетическим методом принимаются реальные геометрические характеристики стрелы f при длине неровности в плане l , которым соответствуют правила, позволяющие двигаться поездам. При стрелах до 70 мм продольная сила в рельсах уменьшается менее чем на 5 %, что находится в пределах точности расчетов даже по детерминированной статической теории, не учитывающей

дисперсию входящих в расчет параметров, характеризующих погонные сопротивления балласта сдвигу шпал.

К сокращенным решениям, которые являются частью полных решений, можно отнести решения Э. Немешди [33], М. Нумато [14], М.А. Мартине [16], Г. Мейера [17], Г. Рубина [43], Р. Леви [15] и Л. Сакмауэра [45].

Наиболее распространенным в Европе является решение Г. Мейера, который решил энергетическим методом задачу определения устойчивости для одноволнового искривления рельсошпальной решетки в плане, принимая его по смещенной синусоиде. Он эту же задачу решил для двухволнового искривления, в последнем случае расчетные формулы имеют следующий вид:

$$l = 3\pi\sqrt{\frac{2EI}{F}}; \quad f = 8,7\frac{EIq}{F^2}. \quad (3.1)$$

Эти же формулы были использованы Г. Рубиным [43], который исходил из того, что для ФРГ максимальная температура рельсов летом не может быть больше 60 °С. По этому критерию он определяет температуру закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути по формуле

$$t_3 = 60 - \frac{F - G}{2\alpha E\omega}, \quad (3.2)$$

где G – сжимающая сила в одном рельсе, возникающая при установленных допусках. Допускается величина $G = 150...250$ кН. Для одноволнового искривления по смещенной синусоиде

$$t_3 = 60 - \frac{\sqrt{\frac{16EIq}{f}} - G}{2\alpha E\omega}. \quad (3.3)$$

При двухволновом искривлении в прямом участке

$$t_3 = 60 - \frac{\sqrt{\frac{8,7EIq}{f}} - G}{2\alpha E\omega}. \quad (3.4)$$

Для криволинейного участка пути, имеющего радиус R

$$t_3 = 60 - \left(\frac{\sqrt{\frac{16EIq}{f} + \frac{64E^2I^2}{R^2f^2} - \frac{8EI}{Rf} - G}}{2\alpha E\omega} \right) . \quad (3.5)$$

Р. Леви [15] получил практически аналогичные (3.1) формулы для прямого участка пути:

$$l = 4\pi\sqrt{\frac{EI}{F}} ; \quad f = 13,8\frac{EIq}{F^2} , \quad (3.6)$$

которые отличаются только числовыми коэффициентами, зависящими от принятой конфигурации изгиба. Он принял в расчет трехволновое искривление. Как видно, чем больше волн изогнутой оси рельсов в плане, тем короче волны и больше стрелы изгиба, и больше продольная сжимающая сила, соответствующая критическому ее значению.

Р. Леви и Л. Сакмауэр, как считалось тогда, сделали «шаг вперед» учетом сопротивлений повороту шпал относительно рельсов в узлах скреплений. Но, как отмечал С.П. Першин [11], «этот шаг еще не позволял устранить принципиальный недостаток в изложенных решениях», который, по его мнению, заключался в том, что величина погонного сопротивления перемещению шпал в балласте в поперечном оси пути направлении принималась постоянной осредненной величиной, тогда как следовало учитывать ее зависимость по степенной функции.

Аналогичное решение было получено японским специалистом в области бесстыкового пути М. Нумато, по его расчетам построены графики зависимостей $F(f)$ и $l(f)$ (рис.3.1):

Анализируя результаты полных и сокращенных решений, С.П. Першин исходил из следующих количественных характеристик: $r = 13$ кН/м, $q = 8$ кН/м, $I = 4 \cdot I_{pr}$, где I_{pr} – момент инерции сечения одного рельса при изгибе в горизонтальной плоскости (относительно вертикальной оси).

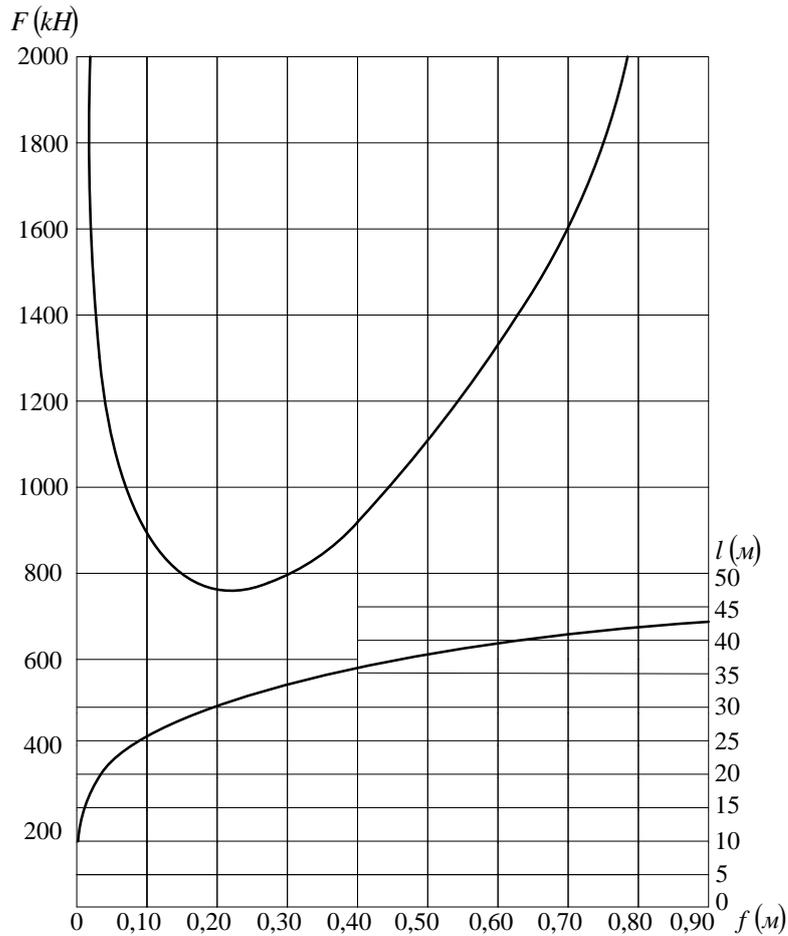


Рисунок 3.1. Графики зависимостей $F(f)$ и $l(f)$ при $q = 2,00$ кН/м

Минимальная продольная сила F_{min} найденная из (3.6), зависит от f и l , которые являются вспомогательными расчетными характеристиками. График $F(f)$ – является квадратной параболой, для которой F_{min} при f_k .

При меньшей стреле $f_l < f_k$ – функция энергии имеет максимум, а это значит, что равновесие является неустойчивым. При большей стреле $f_2 > f_{k1}$ – функция энергии имеет минимум, значит равновесие устойчивое.

Если бы отсутствовали погонные сопротивления r и q , то мы бы имели задачу Эйлера. Мало чем отличался бы расчет от задачи Эйлера, если бы r и q были упругими. Однако в данном случае среда, в которой изгибается упругий стержень с жесткостью EI рассеивает энергию, т.е. силы сопротивления являются диссипативными.

Кинетическая энергия не переходит в потенциальную и это значит, что при снятии продольной силы F деформированный путь не возвратится полностью в первоначальное состояние, но он будет, в какой-то степени, иметь тенденцию к возвращению за счет внутренних упругих сил в самом стержне с жесткостью EI . При этом следует помнить «золотое правило механики» – сколько потеряешь в силе, столько приобретешь в пути. В данном случае две силы и два пути: 1) активная продольная сила и продольное перемещение; 2) реактивные поперечные силы сопротивления и поперечное перемещение.

Таким образом, уравнения равновесия, применяемые для расчетов устойчивости пути, отражают частный случай решения общей задачи изгиба упругого стержня, сжатого продольными силами. Отсюда вытекают два отмеченного С.П. Першиным [11] недостатка рассматриваемых решений:

1) сжимающая сила считается пассивным фактором, который удерживает равновесие искривленной части рельсов, но не способен самостоятельно вызвать это искривление. Тогда как фактически за счет действия сжимающей силы обычно происходит увеличение потенциальной энергии системы, что видно в результате изгиба рельсов при повышении продольных сжимающих сил, которые возникают при повышении температуры рельсов бесстыкового пути во время эксплуатации или при проведении экспериментов на стендовом пути с искусственным нагревом рельсов;

2) реактивные силы, противодействующие деформациям при отсутствии продольной температурной сжимающей силы равны нулю (нет действия, нет и противодействия – закон Ньютона). Значит, эти силы сопротивления появляются не сразу, достигая принимаемых в расчет значений. Поэтому в действительности неустойчивое равновесие наступает далеко не сразу, и тогда величина F_k оказывается примерно в 2 раза большей соответствующих опытных и расчетных значений сжимающих продольных сил.

С.П. Першин на основе анализа вышеприведенных методов расчета бесстыкового пути на устойчивость, в частности таких, как Р. Леви,

Л. Сакмауэра, Ф. Рааба заключает, что их методы содержат лишь отдельные новые положения. Он имел в виду учет реактивного момента в узлах скреплений, учет переменного характера погонных сопротивлений шпал перемещениям в балласте и учет положения рельсовых нитей в плане. В своем методе он хочет учесть сразу весь комплекс этих новых положений. В частности, С.П. Першин большое внимание уделяет точности определения положения рельсов в плане, например, определением характера упругой линии рельсов с числовыми коэффициентами до четвертого знака после запятой:

- для одноволнового искривления в прямой –

$$y = 0,2933f \left(\cos \frac{8,9868x}{l} - 8,7008 \frac{x^2}{l^2} + 2,4099 \right); \quad (3.7)$$

- для двухволнового искривления в прямой –

$$y = 0,5356f \left(\sin \frac{11,5268x}{l} - 21,9983 \frac{x^2}{l^2} + 6,4926 \right); \quad (3.8)$$

- и для кривого участка пути –

$$y = 0,2933f \left(f + \frac{l^2}{8R} \right) \left(\cos \frac{8,9868x}{l} - 8,7008 \frac{x^2}{l^2} + 2,4099 \right) - \frac{x^2}{2R} + \frac{l^2}{8R}. \quad (3.9)$$

После ряда преобразований с использованием энергетического метода получается следующая зависимость для сжимающей силы F :

$$F = \left(\frac{\eta_H}{\eta_1} \cdot \frac{EI}{l^2} + \frac{\eta'_C}{\eta_1} \cdot \frac{q_0 l^2}{2\delta f} + \frac{\eta''_C}{\eta_1} \cdot C' \cdot l^2 + \frac{2m_0}{a} \right) \cdot \frac{\delta f}{\delta f + f_0}, \quad (3.10)$$

где для (3.10) коэффициенты $\eta_1 = 2,757$; $\eta_H = 133,567$; $\eta'_C = 0,4287$; $\eta''_C = 0,1564$.

Но если учесть, например, отмеченные А.Я. Коганом [19] факты того, что корреляционная связь между силами сопротивлений и перемещениями со временем стирается из-за явлений релаксации и ползучести в балласте, сдвигаемого шпалами, то такая точность не имеет смысла.

А поскольку в пути вагонами-путеизмерителями фиксируется только стрела и длина одноволновой неровности, то нет смысла и в рассмотрении других конфигураций кривых.

С.П. Першин приходит к аналогичным уравнениям, которые были получены другими последователями при сокращенных методах (при $q = const$):

$$F = 1,9402 \sqrt{\frac{EIq}{f}}; \quad l = 6,94 \sqrt{\frac{EI}{F}}. \quad (3.11)$$

При учете переменного характера зависимостей сил сопротивления от величины деформаций энергетическим методом С.П. Першин определяет работу сил сопротивления балласта из следующего выражения:

$$A_C = \int_0^x dx \int_0^y Cy^n dy = \frac{C}{n+1} \int_0^x y^{n+1} dx = \frac{C}{n+1} \delta f^{n+1} \xi' l, \quad (3.12)$$

где C – модуль деформации, т.е. сила, приложенная к единице длины, вызывающая единичное поперечное смещение;

ξ' - постоянный коэффициент, зависящий от степени n .

Работа сил сопротивления повороту шпал относительно рельса находится из следующего выражения:

$$A_m = \frac{2m_0}{a(k+1)} \cdot \left(\frac{\delta f}{l} \right)^{k+1} \xi'' l. \quad (3.13)$$

С учетом работы силы F на сжатие A_K :

$$A_K = -F\lambda = -F \int_0^{l/2} (y')^2 dx = -\eta_1 F \frac{f^2}{l}, \quad (3.14)$$

а также работы внутренних сил изгиба рельсов A_H :

$$A_H = EI \int_0^{l/2} (y'')^2 dx = \eta_n \frac{EI f^2}{l^3} \quad (3.15)$$

и их дифференциалов С.П. Першин [11] энергетическим методом получил для прямой:

$$F = \left[48,446 \frac{EI\delta f}{l^2} + 0,078l^2\xi_1 c\delta f'' + \frac{2m_0}{a} \xi_2 l \left(\frac{\delta f}{l} \right) \right]^k \frac{1}{\delta f + f_0}, \quad (3.16)$$

где $\xi_1 = \frac{\xi'}{0,4287}$; $\xi_2 = \frac{\xi''}{\eta_i}$,

а для кривого участка:

$$F = \left[48,446 \frac{EI\delta f}{l^2} + 0,078l^2\xi_1 c\delta f'' + \frac{2m_0}{a} \xi_2 l \left(\frac{\delta f}{l} \right) \right]^k \frac{1}{\delta f + f_0 + 0,08 \frac{l^2}{R}}. \quad (3.17)$$

В данном случае величины I , c , f , l и f_0 являются случайными, имеющими большую дисперсию, в связи с чем ожидать на практике совпадения получаемых по (3.16) и (3.17) значений F с теми, которые окажутся в действительности, нельзя. В связи с этим усложнение стоящей задачи в методах расчета бесстыкового пути на устойчивость имеет только теоретическое значение. Оно пригодно для сравнения различных вариантов конструкции, что и следует использовать, когда предлагаются новые конструкции промежуточных креплений, или шпал, или балластных материалов, или другие типы рельсов. В то же время сокращенные – более простые методы для сравнения вариантов – также вполне приемлемы.

Энергетический метод расчета просто незаменим в тех случаях, когда требуется решать такие задачи, как, например, определение необходимых сил для изгиба или выпрямления рельсов, или рельсошпальной решетки при производстве различных путевых работ.

В работах В.И. Новаковича [65, 66, 95] энергетическим методом решено несколько задач.

Первая задача связана с исследованием принудительного изгиба рельсовых плетей во время ремонтных работ (рис. 3.2).

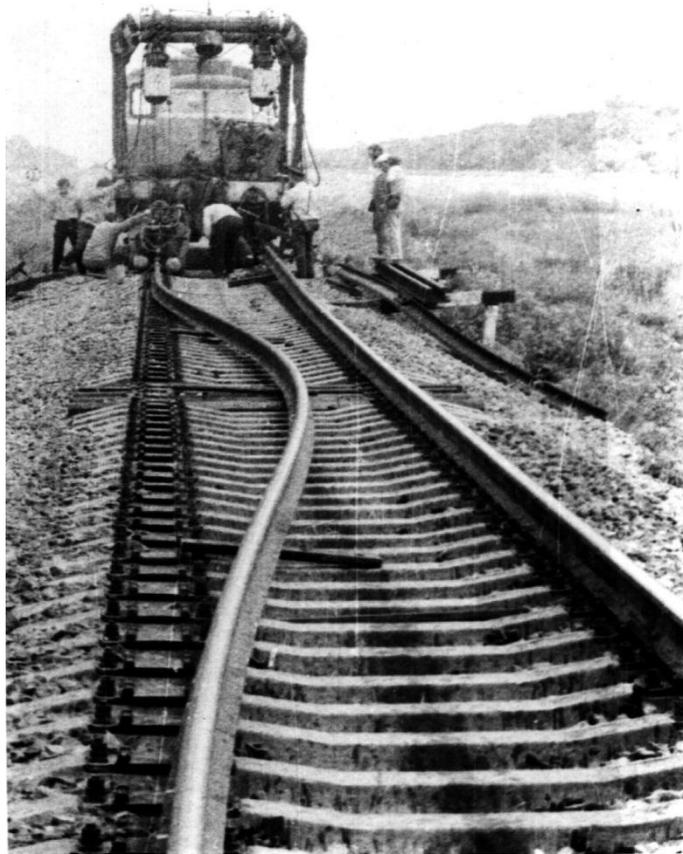


Рисунок 3.2. Предварительный изгиб рельса перед контактной сваркой

Когда, по крайней мере, один из концов рельсов свободен для продольного перемещения, то при активной силе P , приложенной в центре кривой изгиба, расчетная схема представлена на рис. 3.3.

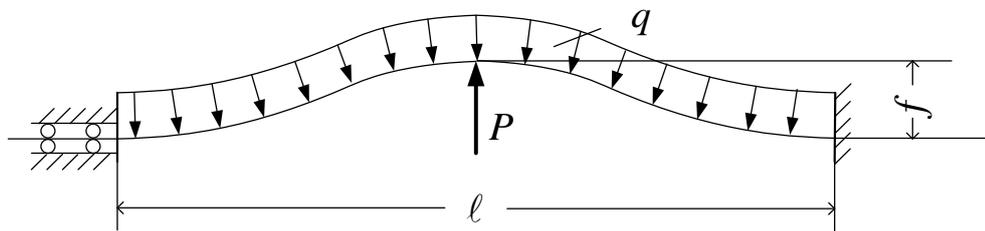


Рисунок 3.3. Расчетная схема для определения силы P [65, 66, 95]

В работах [65, 66, 95] показано, что на представленном расчетном участке действуют следующие силы: активная сила P , реактивные силы сопротивления изгибу, распределенные силы сопротивления поперечным перемещениям q . Сумма элементарных работ этих сил на возможном

бесконечно малом перемещении df должна быть равна нулю. Такой подход позволил автору получить выражение для изгибающей силы P :

$$P = \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} + \frac{ql}{2} . \quad (3.18)$$

Если оба конца не свободны, то появляется еще работа погонных сил сопротивления балласта сдвигу шпал r за концами изгиба на длине L при перемещении $d\lambda$. В этом случае автором получена формула:

$$P = \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} + \frac{ql}{2} + \frac{\pi^2 rLf}{2l} , \quad (3.19)$$

здесь учтено, что [11]

$$\lambda = \frac{\pi^2 \cdot f^2}{4l} \quad \text{и} \quad d\lambda = \left(\frac{\pi^2 \cdot f}{2l} \right) df . \quad (3.20)$$

Полученные выражения (3.18) и (3.19) показывают эффективность энергетического метода при определении сил, необходимых для изгиба рельсов, а также позволяют провести анализ зависимости изгибающей активной силы P , от следующих параметров: стрела изгиба f , длина изгиба l и длина раскрепленного участка рельса L , жесткость рельса EI и погонные силы сопротивления q .

Зависимость P от f носит линейный характер и с увеличением длины изгиба l уменьшается.

Во второй задаче автор рассматривает выпрямление рельсовых плетей в процессе сварки. При производстве сварочных работ во время окончательного восстановления рельсовых плетей сварочная головка подтягивает предварительно изогнутый конец рельсовой плети продольной силой F [105].

Расчетная схема для этого случая представлена на рис. 3.4.

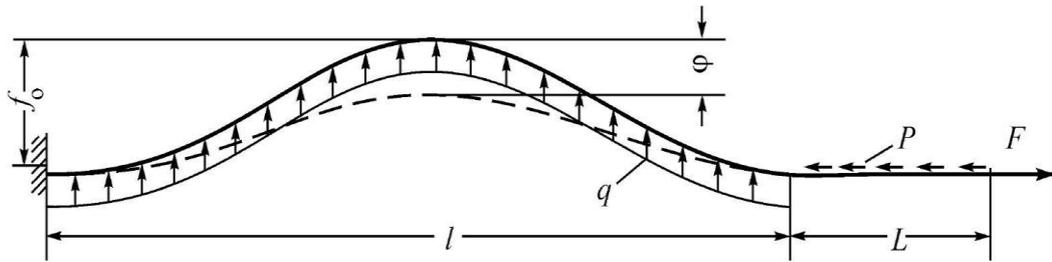


Рисунок 3.4. Расчетная схема для определения силы F [66, 95]

В этом случае, вместо работы активной силы P на перемещении df рассматривалась работа активной силы F на перемещении $d\lambda$.

Использование энергетического метода позволило автору получить выражение для продольной силы F в виде:

$$F = \frac{ql^2}{\pi^2 f} - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} + rL. \quad (3.21)$$

В работах [65, 66, 95] приведен расчет по формуле (3.21) для случая рельса типа Р65 при условии $L = 0$, $q = 0,13$ кН/м для значений l равной 30, 35 и 40 м. На рис. 3.5 приведены графики соответствующих зависимостей $F(f)$.

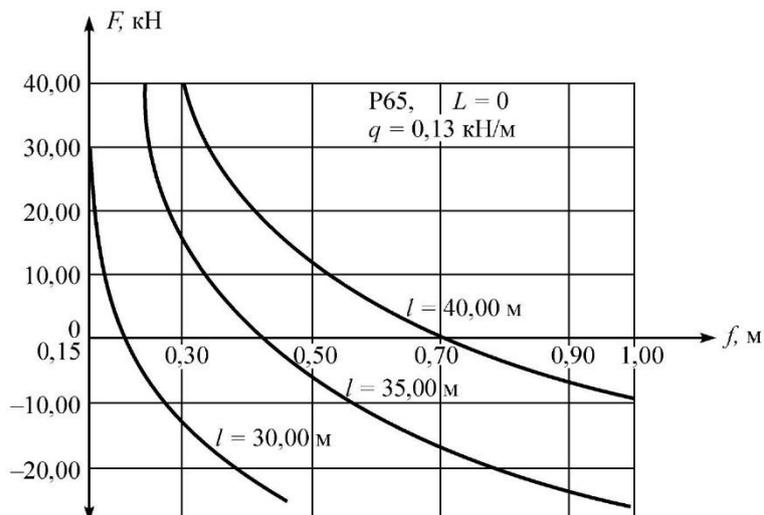


Рисунок 3.5. Графики зависимости $F(f)$ [65, 66, 95]

Зависимость F от f носит нелинейный характер и с ростом l существенно возрастает.

В качестве третьей задачи рассмотрено выпрямление изогнутой части рельсовой плети поперечной силой G . Расчетная схема этой задачи представлена на рисунке 3.6 [65, 66, 95].

Энергетическим методом была найдена необходимая для выпрямления изогнутой оси рельсов поперечная сосредоточенная сила G в виде:

$$G = \frac{\pi^2 r L f}{2l} + \frac{q l}{2} - \frac{2\pi^4 E I f}{l^3}. \quad (3.22)$$

Зависимость G от стрелы изгиба f носит линейный характер, однако влияние длины изгиба l существенно нелинейно, что может привести к уменьшению поперечной силы G с увеличением стрелы изгиба f при малых значениях длины изгиба l .

Как показано на рисунке 3.6 изогнутая ось рельсов в плане может быть рассмотрена в виде односторонней (рис. 3.6, а) или двусторонней (рис. 3.6, б) кривой. При этом в зависимости от фактического расположения рихтующих средств внешние силы, прилагаемые к рельсам с целью их выпрямления, могут приниматься в расчет распределенными или сосредоточенными.

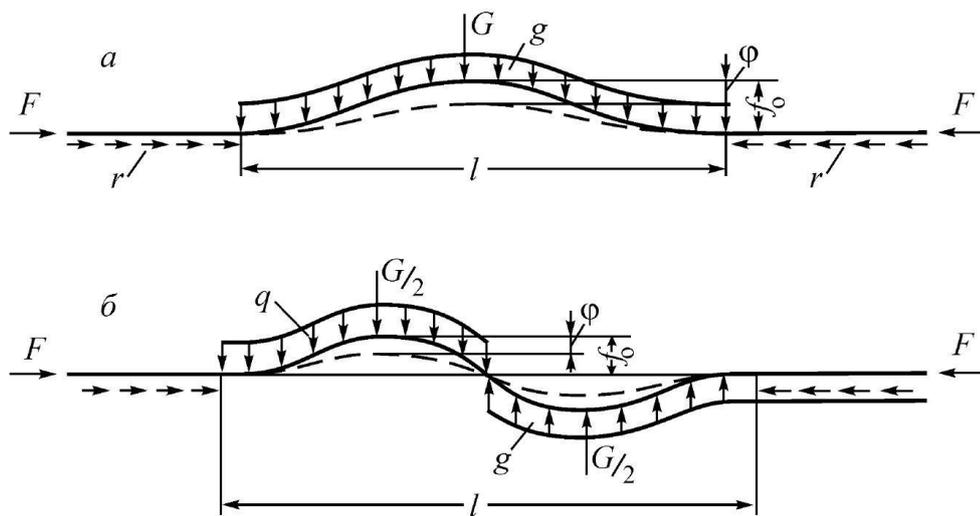


Рисунок 3.6. Расчетная схема для определения силы g или G [65, 66, 95]:
а – при одностороннем изгибе; б – при двустороннем изгибе

Рассмотренные задачи показывают эффективность применения энергетического метода при решении задач изгиба и выпрямления рельса при

производстве ремонтных работ. Такой подход позволяет применить энергетический метод для определения условий устойчивости бесстыкового пути с учетом воздействия поездов, что крайне важно для безопасности движения.

3.2. Энергетический метод расчёта устойчивости бесстыкового пути с учётом воздействия поездов

Изложение настоящего параграфа основывается не только на ранее опубликованных нами работах [79-88, 95, 106-115], но и на принципиально новом подходе, связанном не только с изменением стрелы изгиба f , но и со скоростью роста стрелы $\frac{df}{d\tau}$.

Для определения устойчивости бесстыкового пути, как было отмечено ранее применялся метод дифференциальных уравнений. Дифференциальное уравнение поперечных перемещений, соответствующее расчетной схеме (рис. 3.7):

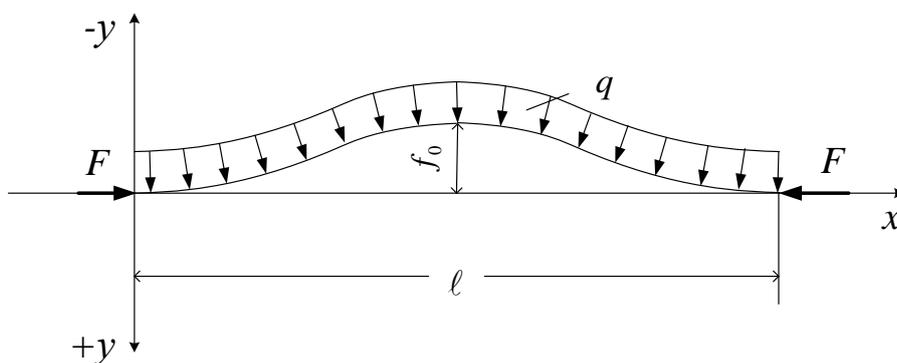


Рисунок 3.7. Расчетная схема для определения устойчивости бесстыкового пути

$$EI \cdot y^{IV} \pm F \cdot y'' \mp q = 0, \quad (3.23)$$

где при F « \leftarrow » для сжимающей продольной силы в рельсах, а « \rightarrow » – для растягивающей. Вместо решения этого дифференциального уравнения нами применен энергетический метод.

Определение условий устойчивости бесстыкового пути, может быть основано на принципе возможных перемещений [81, 87, 95]:

$$\sum dA_i = 0, \quad (3.24)$$

Единственной активной силой, выводящей рельсошпальную решетку из равновесия, является продольная сжимающая сила F . Тогда под ее действием возможным бесконечно малым перемещением будет $d\lambda$. Элементарная работа, производимая этой сжимающей силой [95]:

$$dA_1 = -Fd\lambda. \quad (3.25)$$

Элементарная работа внутренних сил изгиба рельсов – это реактивные силы, должна быть с противоположным знаком к (3.24):

$$dA_2 = \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} df. \quad (3.26)$$

Элементарная работа сил сопротивления сдвигу шпал в балласте (это также реактивные силы):

$$dA_3 = \frac{ql}{2} df. \quad (3.27)$$

Между величиной стрелы – f и длиной неровности – l необходимо установить взаимную зависимость [81, 87, 95]. Продольное перемещение λ при изгибе рельсов по кривой (1.15) получили по известному из математического анализа решению:

$$\lambda = \frac{\pi^2 f^2}{4l} \quad \text{и} \quad d\lambda = \frac{\pi^2 f}{2l} df. \quad (3.28)$$

Для изгиба (рис. 3.7) подставляя в (3.24) (3.25), (3.26) и (3.27), с учетом (3.28) получим:

$$\sum dA_i = -F d\lambda + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} df + \frac{ql}{2} df = -\frac{F\pi^2 f}{2l} df + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} df + \frac{ql}{2} df = 0, \quad (3.29)$$

$$df \cdot \left(-\frac{F\pi^2 f}{2l} + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} + \frac{ql}{2} \right) = 0.$$

Так как $df \neq 0$, тогда выражение в скобках равно нулю:

$$-\frac{F\pi^2 f}{2l} + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} + \frac{ql}{2} = 0.$$

Умножим все выражение на $\frac{2}{l}$, получим:

$$-\frac{F\pi^2 f}{l^2} + \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} + q = 0,$$

$$q = \frac{F\pi^2 f}{l^2} - \frac{4\pi^4 EIf}{l^4}$$

$$q = \frac{\pi^2 f}{l^2} \cdot \left(F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right). \quad (3.30)$$

Из (3.30) можем получить:

$$f = \frac{ql^2}{\left(F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) \cdot \pi^2}. \quad (3.31)$$

Из условия $\frac{df}{dl} = 0$ определим длину искривления, которой соответствует

максимальная стрела при сжимающей силе F :

$$\frac{df}{dl} = \frac{2ql\pi^2 \cdot \left(F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) - \frac{ql^2\pi^4 8EI}{l^3}}{\pi^4 \cdot \left(F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right)^2} = 0,$$

чтобы дробь была равна нулю, числитель должен быть равен нулю.

$$\begin{aligned}
2ql\pi^2 \cdot \left(F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) - \frac{ql^2\pi^4 8EI}{l^3} &= 0, \\
2ql\pi^2 F - \frac{8q\pi^4 EI l}{l^2} - \frac{ql^2\pi^4 8EI}{l^3} &= 0, \\
2ql\pi^2 F - \frac{8q\pi^4 EI}{l} - \frac{8q\pi^4 EI}{l} &= 0, \\
2ql\pi^2 F - \frac{16q\pi^4 EI}{l} &= 0, \\
2ql\pi^2 F &= \frac{16q\pi^4 EI}{l}, \\
2ql^2\pi^2 F &= 16q\pi^4 EI, \\
Fl^2 &= 8\pi^2 EI,
\end{aligned} \tag{3.32}$$

тогда

$$l^2 = \frac{8\pi^2 EI}{F} \quad \text{или} \quad l = 2\pi\sqrt{2} \sqrt{\frac{EI}{F}}, \tag{3.33}$$

отсюда

$$F = \frac{8\pi^2 EI}{l^2}. \tag{3.34}$$

Тогда с учетом (3.34), получим:

$$\begin{aligned}
q &= \frac{F\pi^2 f}{l^2} - \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} = \frac{8\pi^4 EIf}{l^4} - \frac{4\pi^4 EIf}{l^4}, \\
q &= \frac{4\pi^4 EIf}{l^4},
\end{aligned}$$

При подстановке (3.33) в (3.30), получим:

$$q = \frac{F^2 f}{16EI}. \tag{3.35}$$

С другой стороны, подстановкой (3.33) в (3.30) исключая F , получим зависимость стрелы f от длины неровности рельсов в плане l :

$$f = \frac{ql^4}{415 \cdot EI} \quad (3.36)$$

Два уравнения (3.35) и (3.36) определяют устойчивость колеи при заданных значениях всех параметров, кроме двух: или f и l , или F и f , или F и l , т.е. решение многозначное, даже если считать с точно известными q , I и конфигурацией изгиба.

В этом случае неровность рельсов в плане соответствует ее напряженному состоянию, при котором происходит потеря устойчивости колеи под действием сжимающей силы F .

Графики функций (3.35) и (3.36), построенные при одинаковом масштабе абсциссы f , представлены на рис. 3.8 [88].

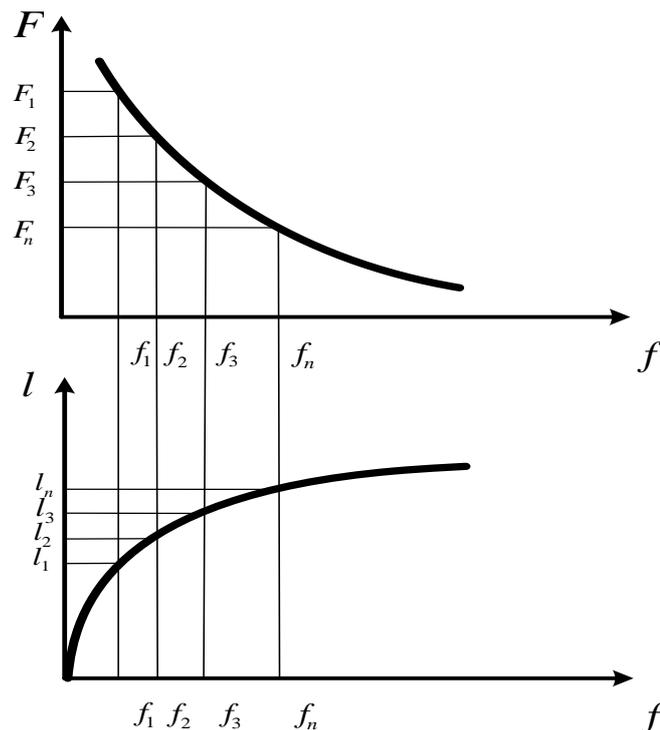


Рисунок 3.8. Графики зависимости $F(\tau)$ и $l(f)$ [88]

Как видно решение не однозначное, поскольку сочетаний f_i , F_i , и l_i бесконечное множество. При этом величины q , I и численные коэффициенты, зависящие от конфигурации изгиба, являются случайными с большой

дисперсией. Таким образом решение становится еще более многозначным, т.е. фактически в пределах статики не представляется возможным определить в бесстыковом пути опасное место по условию устойчивости.

Если учесть, что рост стрелы f происходит из-за уменьшения величины q только во время движения поезда, решение становится однозначным.

Из экспериментов [2] и [66, 81, 87, 88, 95, 106-115] известно, что

$$q = \xi \frac{df}{d\tau}. \quad (3.37)$$

Тогда, приравняем правые части (3.35) и (3.37)

$$\xi \frac{df}{d\tau} = \frac{F^2 f}{16EI}.$$

Разделяем переменные f и τ

$$\frac{df}{f} = \frac{F^2}{16EI\xi} d\tau.$$

Интегрируем в пределах от 0 до τ , при этом $f(0)=f_0$ и $f(\tau)=f$:

$$\int_{f_0}^f \frac{df}{f} = \int_0^{\tau} \frac{F^2 d\tau}{16EI\xi}, \quad (3.38)$$

получим

$$\ln f - \ln f_0 = \frac{F^2 \tau}{16EI\xi},$$

$$\ln \frac{f}{f_0} = \frac{F^2 \tau}{16EI\xi}, \quad (3.39)$$

$$f = f_0 \cdot \exp\left(\frac{F^2 \tau}{16EI\xi}\right). \quad (3.40)$$

Важность температуры закрепления становится очевидной, если учесть, что

$$F = \alpha EI \omega \Delta t, \quad (3.41)$$

После подстановки (3.41) в формулу (3.40) получим:

$$f = f_0 \cdot \exp\left(\frac{(\alpha EI \omega \Delta t)^2 \tau}{16 EI \xi}\right). \quad (3.42)$$

Проанализируем формулу (3.42) подставив механические характеристики верхнего строения пути в реальных допустимых пределах ослабленного пути (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Механические характеристики верхнего строения пути в реальных допустимых пределах ослабленного пути:

α	$11,8 \times 10^{-6}$	$\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$	Коэффициент температурного расширения рельсовой стали
E	$2,1 \times 10^{11}$	$\frac{\text{H}}{\text{м}^2}$	Модуль упругости стержня
ω	$2 \times 80 \times 10^{-4}$	м^2	Площадь поперечного сечения двух рельсов
f_0	0,01	м	Величина начальной стрелы
I	1×10^{-5}	м^4	Момент инерции сечения стержня в плоскости изгиба
ξ	$0,27 \times 10^{11}$	$\frac{\text{H} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	Коэффициент вязкости балласта, сдвигаемого шпалой поперек оси пути
τ	0, 360000 ... 1440000 сек. 0, 100, 200, 300, 400 час. (\approx две недели)	Секунды Часы	Время – примерно две недели – 400 часов с шагом по 100 часов (360000 сек)
Δt	$10^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	Превышение температуры закрепления

Вариант графика зависимости $f(\tau)$ (3.42) при продольной сжимающей силе F представлен на рис. 3.9.

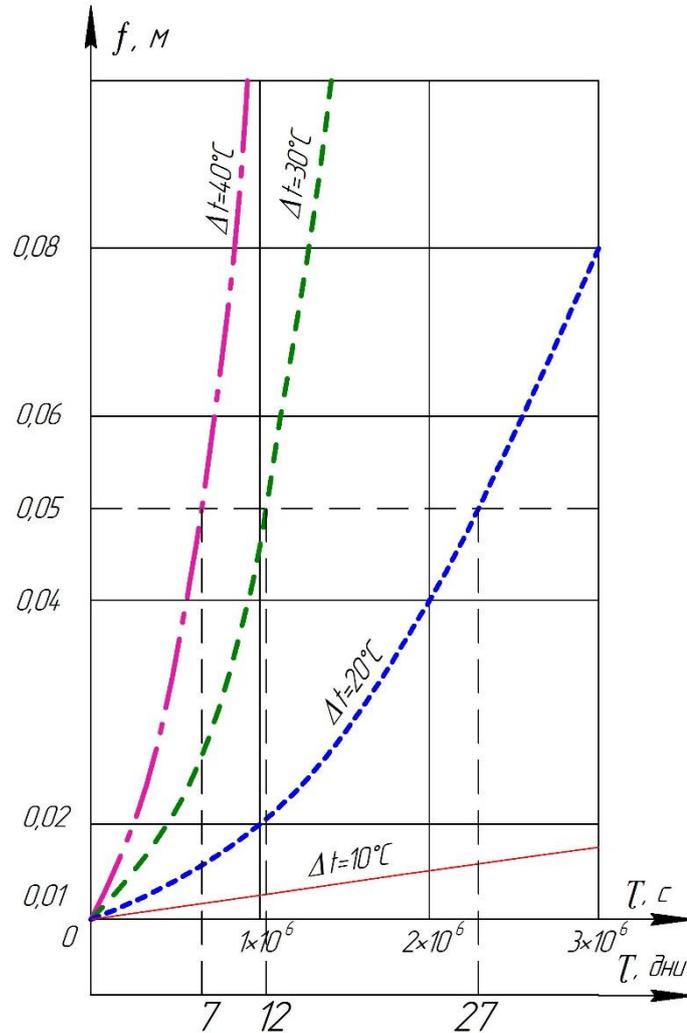


Рисунок 3.9. График роста величины стрелы $f(\tau)$ при различных отступлениях от температуры закрепления

На рисунке 3.9 пунктирной линией отмечена величина стрелы, равная 0,05 м. Анализируя зависимости, представленные на рис. 3.9 можно констатировать, что при среднесуточном отступлении температуры рельсов от температуры закрепления на $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$ рост стрелы изменяется почти линейно и за интервал времени равный двум неделям (промежуток между двумя проходами путеизмерительного вагона) он не превышает 0,002 м; при $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$ – зависимость роста стрелы принимает степенной вид и уже за 27 дней достигает величины 0,05 м, следовательно при проходе путеизмерительного вагона соответствующий рост стрелы может быть своевременно замечен. Однако проанализировать тенденцию роста стрелы в

полной мере можно лишь зная скорость ее роста. Из графика видно, что при $\Delta t = 30^{\circ}\text{C}$ и $\Delta t = 40^{\circ}\text{C}$ – величина стрелы достигнет своего условно опасного положения за 12 и 7 дней соответственно, что не позволит путеизмерительному вагону вовремя зафиксировать возможность потери устойчивости пути. При этом становится очевидным важность определения скорости роста стрелы изгиба рельсов.

Для того, чтобы достаточно точно оценить состояние устойчивости пути и тенденцию роста стрелы изгиба введем в рассмотрение скорость роста стрелы изгиба.

Из (3.40) получим:

$$\frac{df}{d\tau} = \frac{f_0 F^2}{16EI\xi} \cdot \exp\left(\frac{F^2 \tau}{16EI\xi}\right). \quad (3.43)$$

Отмеченная выше важность определения скорости роста стрелы изгиба хорошо видна если проанализировать формулу (3.43), учитывая соотношение (3.41), при тех же механических характеристиках верхнего строения пути (соответствующих реально допустимым пределам ослабленного пути) (табл. 3.1). Зависимость скорости роста стрелы изгиба от времени (3.43) для разных температур превышения над температурой закрепления рельсовой плети представлена на рисунке 3.10.

Изображенные на рисунке кривые, соответствующие среднесуточному отступлению температуры рельсов от температуры закрепления на $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 30^{\circ}\text{C}$ и $\Delta t = 40^{\circ}\text{C}$ позволяют сделать следующие выводы: при среднесуточном отступлении температуры рельсов от температуры закрепления на $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$ скорость роста стрелы не угрожает безопасности движения поездов; при $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$ – скорость роста стрелы позволяет своевременно заметить и устранить возникающую неисправность колеи в плане; при $\Delta t = 30^{\circ}\text{C}$, а особенно $\Delta t = 40^{\circ}\text{C}$ и выше – скорость роста стрелы

необходимо считать недопустимой по условию устойчивости бесстыкового пути.

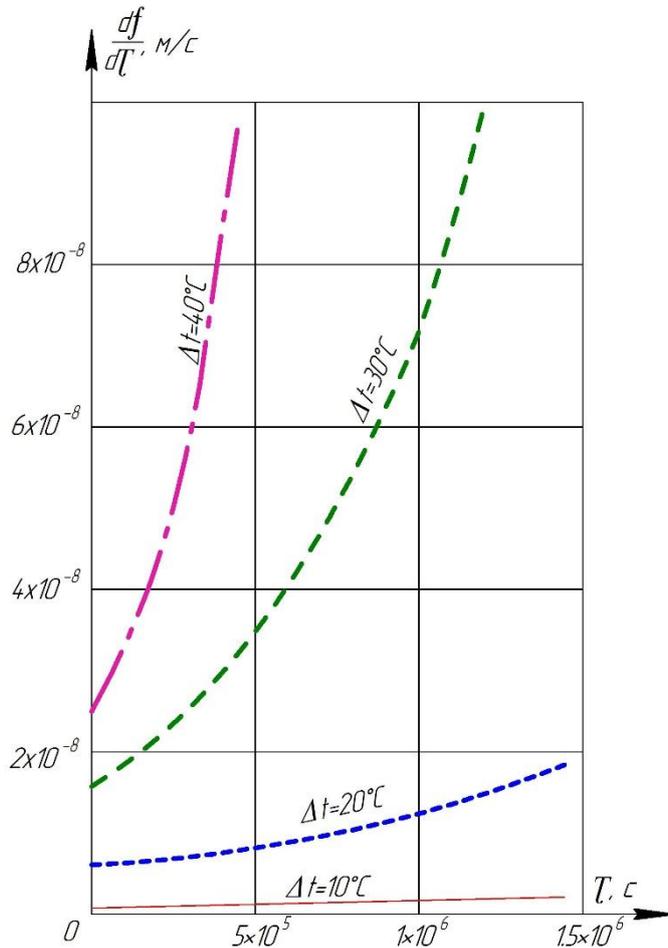


Рисунок 3.10. График скорости роста стрелы при различных отступлениях от температуры закрепления

Проведенный анализ позволяет использовать для оценки устойчивости бесстыкового пути наряду со стрелой изгиба скорость ее роста, а в нормативах рекомендовать установить среднесуточное отступление температуры рельсов от температуры закрепления $\Delta t = 10^\circ\text{C}$.

В холодное время суток продольная сжимающая сила, вызвавшая изгиб рельсошпальной решетки в плане, сменится на растягивающую, а значит сумма работ изменится и станет следующей [66, 81, 87, 95]:

$$\sum dA_i = \frac{\pi^2 Ff}{2l} df + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} df - \frac{ql}{2} df = 0, \quad (3.44)$$

$$df \cdot \left(\frac{\pi^2 Ff}{2l} + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} - \frac{ql}{2} df \right) = 0.$$

Так как $df \neq 0$, тогда выражение в скобках равно нулю:

$$\frac{\pi^2 Ff}{2l} + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} - \frac{ql}{2} = 0.$$

Умножим все выражение на $\frac{2}{l}$, получим:

$$\frac{\pi^2 Ff}{l^2} + \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} - q = 0.$$

$$q = \frac{F\pi^2 f}{l^2} + \frac{4\pi^4 EIf}{l^4}$$

$$q = \frac{\pi^2 f}{l^2} \cdot \left(F + \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right). \quad (3.45)$$

Из (3.45) можем получить:

$$f = \frac{ql^2}{\left(F + \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) \cdot \pi^2}. \quad (3.46)$$

Из условия $\frac{df}{dl} = 0$ определим длину искривления, которой соответствует

максимальная стрела при растягивающей силе F :

$$\frac{df}{dl} = \frac{2ql\pi^2 \cdot \left(F + \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) + \frac{ql^2\pi^4 8EI}{l^3}}{\pi^4 \cdot \left(F + \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right)^2} = 0,$$

чтобы дробь была равна нулю, числитель должен быть равен нулю.

$$2ql\pi^2 \cdot \left(F + \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) + \frac{ql^2\pi^4 8EI}{l^3} = 0,$$

$$2ql\pi^2 F + \frac{8q\pi^4 EI l}{l^2} + \frac{ql^2\pi^4 8EI}{l^3} = 0,$$

$$2ql\pi^2 F + \frac{8q\pi^4 EI}{l} + \frac{8q\pi^4 EI}{l} = 0,$$

$$2ql\pi^2 F + \frac{16q\pi^4 EI}{l} = 0,$$

$$2ql\pi^2 F = -\frac{16q\pi^4 EI}{l},$$

$$2ql^2\pi^2 F = -16q\pi^4 EI,$$

$$Fl^2 = -8\pi^2 EI, \quad (3.47)$$

тогда

$$l^2 = -\frac{8\pi^2 EI}{F}, \quad (3.48)$$

отсюда

$$F = -\frac{8\pi^2 EI}{l^2}. \quad (3.49)$$

Тогда с учетом (3.49), получим:

$$q = \frac{F\pi^2 f}{l^2} + \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} = -\frac{8\pi^4 EIf}{l^4} + \frac{4\pi^4 EIf}{l^4},$$

$$q = -\frac{4\pi^4 EIf}{l^4},$$

$$q = -\frac{F^2 f}{16EI}. \quad (3.50)$$

Также, зная из экспериментов [2] и [66, 95], что

$$q = \xi \frac{df}{d\tau}. \quad (3.51)$$

Тогда, приравняем правые части (3.50) и (3.51)

$$\xi \frac{df}{d\tau} = -\frac{F^2 f}{16EI}.$$

Разделяем переменные f и τ

$$\frac{df}{f} = -\frac{F^2}{16EI\xi} d\tau.$$

Интегрируем в пределах от 0 до τ , при этом $f(0)=f_0$ и $f(\tau)=f$:

$$\int_{f_0}^f \frac{df}{f} = -\int_0^{\tau} \frac{F^2 d\tau}{16EI\xi}, \quad (3.52)$$

получим

$$\ln f - \ln f_0 = -\frac{F^2 \tau}{16EI\xi}, \quad (3.53)$$

$$\ln \frac{f}{f_0} = -\frac{F^2 \tau}{16EI\xi}, \quad (3.54)$$

$$f = f_0 \cdot \exp\left(-\frac{F^2 \tau}{16EI\xi}\right). \quad (3.55)$$

Расчеты по (3.55) показывают, что за вечернее и ночное время суток стрела изгиба рельсов не успевает вернуться в исходное положение. Таким образом, остаточная стрела с каждым суточным циклом изменения температуры рельсов растет, что подтверждают опытные данные, полученные ВНИИЖТом на Экспериментальном кольце.

Накопление остаточных стрел изгиба рельсов в плане и увеличение во времени скорости этого процесса может представлять угрозу безопасности движения поездов. При увеличении стрел горизонтальных неровностей рельсов при их значениях, определяемых установленными нормами, может потребоваться ограничение скорости движения поездов (частичный отказ) или закрытие движения (полный отказ).

Полученные решения совпадают с найденными с помощью решения дифференциальных уравнений (3.23), однако энергетический метод позволил не только определить рост стрелы, но и показал необходимость использования такой характеристики как скорость роста стрелы изгиба рельсов.

Как видно из графиков рис. 3.9 и рис. 3.10, что скорость изменения стрелы при выпрямлении упруго изогнутых рельсов в начальный период больше.

Однако, как видно из тех же графиков, сжимающая сила вызывает возрастающую во времени скорость роста стрелы, а растягивающая – затухающую, поскольку последняя стремится к асимптоте $f = 0$. При этом следует иметь в виду, что, как это было ранее оговорено при выборе предпосылок и допущений, рост стрелы ограничен пределом, который соответствует $F \approx const$, т.е. реально $f \ll 100$ мм при длине изогнутой волны рельсов в плане $l \approx 20$ м. Время роста стрелы ограничено 400 часами, что с некоторым запасом соответствует двум неделям – это периодичность проходов путеизмерительных вагонов.

3.3. Выводы по главе 3

1. Показано, что применение энергетического метода позволяет определить соотношения между силами и деформациями изгибаемого упругого стержня, находящегося в среде, оказывающей погонное сопротивление поперечным его перемещениям.

2. Сформулированы условия оценки стрелы изгиба, а также её скорости в зависимости от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути. На этой основе разработаны предложения по ограничению допустимых отклонений от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути для обеспечения устойчивости пути.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В НОРМАТИВАХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ

4.1 Нормативные условия прочности рельсов и их влияние на условия устойчивости бесстыкового пути

Применяемые методы статики при определении условий устойчивости бесстыкового пути как в теории, так и при выполнении экспериментальных исследований на стенде привели к ряду практических выводов, которые вошли в действующие нормативные документы. В настоящее время таким документом является ныне действующая «Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» №2544, утвержденная ОАО «РЖД» 14.12.2016 г. [58].

До этих инструкций аналогичными документами являлись Технические условия и Технические указания по бесстыковому пути, утвержденные Министерством путей сообщения 23.05.1962 г. [52] (впервые в СССР), затем 23.05.1969 г. [53], 03.10.1979 г. [54], 03.10.1991 г. [55], 31.03.2000 г. [56], «Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» № 2788, утвержденная ОАО «РЖД» 29.12.2012 г. [57] Во всех этих документах, кроме [55], [56], [57] и [58] все практические рекомендации, касающиеся устойчивости бесстыкового пути, основывались исключительно на статических расчётах и экспериментах, выполненных на стендовом пути ВНИИЖТа. В конце 70-х – начале 80-х годов лаборатория бесстыкового пути провела ряд опытов на опытном участке ст. Бескутниково – Институт пути и на экспериментальном кольце ВНИИЖТа, где часто пропускались поезда по участку бесстыкового пути с искусственно нагретыми рельсами. Экспериментаторы в результате проведенной работы сделали выводы о том, что данными опытов, полученных на экспериментальном кольце,

предположение о меньшей устойчивости бесстыкового пути под поездами не подтвердилось и корректировать ранее разработанные нормативы не требуется. В результате нормы, основанные на стендовых экспериментах, тогда были оставлены без каких-либо существенных изменений.

Во всех вышеперечисленных основных нормативных документах по бесстыковому пути весьма большое значение придается условию прочности рельсов по его предельному состоянию, определяемому неравенством [66, 95]

$$k_3 \sigma_k + \sigma_t \leq [\sigma], \quad (4.1)$$

где k_3 – коэффициент запаса $k_3 = 1,3$ (его значение не имеет технического обоснования, оно принято волевым решением);

σ_k – кромочные напряжения, возникающие в подошве рельса от его изгиба и кручения при воздействии подвижного состава;

σ_t – температурные напряжения ($\sigma_t = \alpha E \Delta t$);

$[\sigma]$ – допускаемое нормальное напряжение в рельсе от его изгиба и кручения.

По условию прочности рельса (4.1) определялось допускаемое отступление от температуры закрепления рельсовых плетей в сторону понижения при его температурном растяжении при максимальной по вероятности температуре зимой:

$$\Delta t_p \leq \frac{[\sigma] - k_3 \sigma_k}{\alpha E}. \quad (4.2)$$

С учетом (4.2) определяется максимально допустимая температура закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути [66, 95]:

$$\max t_3 = t_{\min \min} + \Delta t_p, \quad (4.3)$$

где $t_{\min \min}$ – минимальная из минимальных температур рельсов, полученная в результате наблюдений в данном регионе страны за сто лет.

До 1991 года $[\sigma] = 350$ МПа для рельсов, закалённых и не пропустивших нормативный тоннаж. В результате расчетов по (4.3) для регионов Севера и

Востока России, особенно для кривых участков с малыми радиусами, получалось, что бесстыковой путь применять нельзя, т.к. величина Δt_p оказывалась относительно небольшой и, значит, $\max t_3$ оказывалась низкой. Из-за этого по условию устойчивости оказывалось невозможным закреплять рельсовые плети бесстыкового пути при достаточно высокой температуре. В связи с этим делались попытки увеличить допускаемое отступление от температуры закрепления в сторону повышения по условию устойчивости Δt_y , найденное из экспериментов, проведенных на стенде. На это решение оказывал большое влияние германский опыт, по которому для дорог Российской Федерации температура закрепления должна была не превышать $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В Германии температура закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути в $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ считалась «оптимальной», т.к. была средней между $t_{\min \min} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{\max \max} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. В России $t_{\min \min} \ll -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, и значит t_3 должна быть ниже, чем в Германии.

Стендовые опыты создали впечатление, что бесстыковой путь достаточно устойчив и при низких температурах закрепления. Минимальная температура закрепления назначалась по условию [66, 95]

$$\min t_3 = t_{\max \max} - \Delta t_y, \quad (4.4)$$

где $t_{\max \max}$ – максимальная из максимальных температур для заданного региона за сто лет наблюдений.

Поскольку Δt_y по данным стендовых опытов была относительно большой, например, для прямых участков, уложенных с рельсами типа Р65 на железобетонных шпалах Δt_y , составляла $54\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для кривых малых радиусов ($R = 350\text{ м}$) она была равной $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. В настоящее время Δt_y в результате внедрения предложений РГУПС составляет и для прямых, и для кривых менее $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ниже будут даны пояснения, чем такая температура закрепления обоснована.

При требуемой по расчету температуре закрепления, определяемой по (4.3), из-за заниженного значения $[\sigma] = 350$ МПа до 1991 года требовалось или периодическое (сезонное) перезакрепление рельсовых плетей, или искусственное понижение температуры закрепления с помощью предлагаемых (но так и не нашедших применения) способов охлаждения рельсов перед закреплением рельсовых плетей. Уже к 1970 году [27] было определено, что минимальное значение $[\sigma]$ равно не 350 МПа, а 470 МПа, но только в 1991 году после длительной и острой дискуссии было принято в утвержденных Технических указаниях [55] $[\sigma] = 400$ МПа, что отодвинуло t_3 на 20 °С вверх. Это изменение норматива вытекает из того, что в (4.2) в знаменателе $\alpha E = 2,5$ МПа/°С. Такое изменение нормативов было все же недостаточным, чтобы везде стало возможным применять бесстыковой путь, особенно в Северных и Восточных регионах России. Если было бы принято $[\sigma] = 470$ МПа, то этого было бы достаточно, чтобы перекрыть по условию прочности всю амплитуду температурных колебаний, даже в самых суровых климатических условиях России (например, на Забайкальской железной дороге). В более поздней книге Е.А. Шура [28] сообщается, что минимальный условный предел упругости рельсовой стали составляет 800 МПа. Таким образом, нужно считать, что верхний предел температурного интервала закрепления по условию прочности никак не должен препятствовать закреплению рельсовых плетей бесстыкового пути при достаточно высокой температуре.

В работе В.О. Певзнера и Ю.С. Ромена [23] рассмотрена устойчивость рельсошпальной решетки от сдвига в балласте. В ней констатируется, что «особенно интенсивно процесс расстройства протекает на нестабилизированном пути после окончания ремонтных работ при недостаточно высоком качестве уплотнения балласта».

4.2. Минимизация влияния нормативных условий прочности стыковых болтов на условия устойчивости бесстыкового пути

Верхняя граница температурного интервала закрепления рельсовых плетей должна определяться по условию допустимого значения зазора в месте излома рельсовой плети или при разрыве стыковых болтов. Формула, по которой определяется этот зазор, дана в Инструкции [57], она имеет следующий вид:

$$\lambda_3 = \frac{\alpha^2 E \omega (\Delta t_p)^2}{r}. \quad (4.5)$$

Если задаться допустимым зазором $[\lambda_3]$, то

$$\Delta t_p = \sqrt{\frac{[\lambda_3] r}{\alpha^2 E \omega}}. \quad (4.6)$$

При изломе рельса движение поездов прекращается. Излом происходит только под поездом, а формула (4.5) воздействие поездов не учитывает. Считается, что под поездом зазор увеличиться до значения, найденного по формуле (4.5), не может, т.е. он станет соответствующим расчетному только за хвостом поезда. Следующий поезд по такому зазору не должен проходить, так как при автоблокировке на светофоре будет гореть запрещающий красный сигнал. Есть малодейственные участки бесстыкового пути, не оборудованные автоматической блокировкой, где на перегоне нет изолирующих стыков, и где уложены рельсовые плети длиной до 10...20 км (от стрелочного перевода до стрелочного перевода смежных станций).

В книге М.Ф. Вериги [1] приводятся исследования динамических сил, найденных по методу В.Н. Данилова [25], создаваемых колесами подвижного состава при зазоре шириной до 8 см при скорости движения до 100 км/ч. До 2000 года, бесстыковой путь еще не применялся в Северных регионах России и на Востоке за Уралом. В связи с этим тогда считалось, что расчетная

температурная амплитуда рельсов на участках бесстыкового пути не превышает 110°C , и тогда $\Delta t_p \leq 60^{\circ}\text{C}$. В этом случае $\lambda_3 \leq 4,8$ см, но при условии, что погонные сопротивления продольным перемещениям, приходящихся на одну рельсовую нить, будут не меньше 20 кН/м.

В книге [1], как и в действующих нормативах, подчёркивается, что «при работе рельсовых плетей в зимний период особое значение приобретает контроль целостности рельсовой плети средствами автоблокировки и дефектоскопии». Предлагалось [1] «в целях повышения ответственности за безопасность движения поездов установить нижнюю границу норматива (значения) погонного сопротивления продольным перемещениям рельсовой плети в рельсовых скреплениях не ниже $r = 25$ кН/м. Информировать лиц, осуществляющих текущее содержание бесстыкового пути, что содержание пути с $r \geq 25$ кН/м имеет весьма важное значение и для уменьшения зазора рельсовой плети при ее разрыве, и для повышения устойчивости пути против выброса. Информировать работников, занятых содержанием бесстыкового пути, о том, что фактическое значение величины r на месте разрыва легко определяется по образовавшемуся зазору в месте излома рельсовой плети и температуре, при которой этот излом произошёл».

Однако информации и требований такого рода совершенно недостаточно, чтобы реально предотвратить вероятность образования большого зазора при изломе рельсов или разрыве стыковочных болтов. Необходимы условия для обеспечения реальной выполнимости вышеперечисленных требований.

В суровых климатических условиях применение 25-метровых рельсов не обеспечивает безопасность движения поездов [91]. Это объясняется тем, что у дистанции пути нет реальных возможностей затрачивать труд монтеров пути на ежегодную двукратную разгонку зазоров с заменой рельсов: на зиму – на удлиненные и на лето – на укороченные. Применение рельсов длиной 12,5 м на железобетонных шпалах, как альтернатива, также по техническим и

экономическим соображениям не может рассматриваться. Остается только бесстыковой путь, причем только с рельсовыми плетями, имеющими протяженность не менее перегона.

В Северных и Восточных регионах России годовая амплитуда температурных изменений может достигать 120°C . Но даже при годовой амплитуде 110°C , значение $\Delta t_p \leq 60^{\circ}\text{C}$ весьма мало, так как в этом случае $\max t_3$ по (4.3) окажется очень низкой (около нуля), что явно не обеспечит условий устойчивости, даже для прямых участков по статическому расчету, приведенному в Инструкциях [57] и [58].

Исследованиями А.С. Хадукаева [24] было определено, что изменение зазоров от нуля до максимума в уравнильных пролетах и в местах временных рельсовых вставок на действующих участках бесстыкового пути происходят при изменениях температуры рельсов всего на $40\dots 35^{\circ}\text{C}$. Если рельсовые плети имеют максимальную длину до 800 м или длину до блок-участка, то бригады монтеров пути, осуществляющие текущее содержание, почти все свои трудовые ресурсы тратят на содержание концевых участков рельсовых плетей и непосредственно на пути в пределах стыков. На содержание промежуточных креплений рабочего времени обычно не хватает. Значит требование – иметь везде $r \geq 25$ кН/м реально не может выполняться.

Погонное сопротивление сдвигу рельсов при нормативном прижатии рельсов к шпалам составляет $r = 25$ кН/м относительно шпал. Но при несмерзшемся балласте средние значения погонных сопротивлений продольному сдвигу рельсов вместе со шпалами в балласте на две рельсовых нити составляют около 10 кН [69]. Значит, на одну рельсовую нить минимальные по вероятности значения погонных сопротивлений, которые необходимо было бы учитывать статическим расчетом по формулам (4.5) и (4.6) при несмерзшемся балласте, составляют не более 2,5 кН/м. Поэтому зазоры в уравнильных пролетах в реальном действующем бесстыковом

пути, как правило, не хватает и, значит, стыковые болты работают на срез и смятие, на что они не рассчитаны.

Основной разработчик нормативов в области бесстыкового пути в 60...80 годах прошлого века Е.М. Бромберг, как видно, сознавая недостаточную надежность принятых в нормативах пределов прочности и устойчивости бесстыкового пути и с целью значительного снижения температурных продольных сил, ввел требование периодического (сезонного) перезакрепления рельсовых плетей. С точки зрения обеспечения безопасности движения это было правильное решение. Однако это требование оказалось практически невыполнимым из-за большой трудоемкости такой работы. Дистанции пути, осуществляющие текущее содержание, не в состоянии были выполнять эту работу, да еще и в кратчайшие сроки. Предполагалось тогда, что внедрением более тяжелых рельсов можно решить эту проблему, но оказалось, что чем больше погонная масса рельса, тем хуже и прочность [50], и устойчивость [51] бесстыкового пути.

4.3 Влияние на условия устойчивости бесстыкового пути площади и формы поперечного сечения рельсов

В начале текущего века РГУПС был предложен рельс типа Р58 взамен Р65. В настоящее время почти весь полигон бесстыкового (и звеньевое) главного пути России уложен рельсами типа Р65.

Как выше было отмечено, у всех без исключения отечественных и зарубежных исследователей условие устойчивости бесстыкового пути статическими методами определяется зависимостью

$$F_{кр} = A \sqrt{\frac{EIq}{f}}, \quad (4.7)$$

где $F_{кр}$ – продольная критическая температурная сила;

A – коэффициент, зависящий от принятой расчетной схемы;

EI – изгибная жесткость путевой решетки в горизонтальной плоскости (плоскости, в которой бесстыковой путь теряет устойчивость);

f – стрела изогнутой части рельсов в плане на длине l .

Зависимость между f и l определяется уравнением вида:

$$f = B \frac{ql^4}{EI}, \quad (4.8)$$

где B – коэффициент, зависящий от формы изгиба.

Если в (4.7) с учетом (4.8) все входящие величины параметров, определяющие устойчивость, принять одинаковыми, кроме ω и I , зависящими от формы и площади поперечного сечения рельса, то необходимое погонное сопротивление сдвигу пути поперек его оси по условию устойчивости определится следующим выражением:

$$q = C \frac{\omega^2}{I}, \quad (4.9)$$

где C – коэффициент, учитывающий все остальные факторы.

Для сравнения представим вычисленные значения необходимого погонного сопротивления в табличной форме для рельсов типов Р50, Р65, Р75 по (4.9) в сравнении с нормативными значениями для прямых участков бесстыкового пути (табл. 4.1) [51].

Таблица 4.1

Тип рельса	ω^2 / I	Отличие в %	
		по ω^2 / I	по нормам Δt_y
Р50	11,616	5,15	5,50
Р65	12,215		
Р75	13,654	11,78	0

Анализируя данные вычислений по (4.9) и нормативные значения Δt_y , можно сделать следующие выводы. Методика проведения стендовых опытов имела принципиальные погрешности, которые привели к ошибочным оценкам устойчивости, особенно касающихся рельсов типа Р75 для прямого участка бесстыкового пути (для кривых участков разница в величине Δt_y еще менее логична). В таблице 4.2 выборочно взяты значения Δt_y для прямой и кривых с $R = 600$ м и $R = 350$ м.

Таблица 4.2

Тип рельсов	Δt_y ($^{\circ}C$) по нормам инструкции [57]		
	Прямая	$R = 600$ м	$R = 350$ м
Р50	57	48	39
Р65	54	43	35
Р75	54	45	36

По данным таблицы 4.2 получается, что по условию устойчивости бесстыковой путь с рельсами Р65 хуже, чем с рельсами Р50 и Р75, чего никак не может быть.

Только на основании этого анализа следует вывод, что данные стендовых опытов не соответствовали ни одной известной теории, тогда как все теории расчета бесстыкового пути на устойчивость в соответствии с (4.7), (4.8) и (4.9) совпадали. Значит таблица 2.1 в Технических указаниях [56], основанная на стендовых опытах, не может считаться реально отражающей фактические условия устойчивости бесстыкового пути.

Ее необходимо изъять из применения в нормативах, поскольку она не учитывает воздействие поезда на бесстыковой путь.

Если теперь из формулы (3.40), найденной нами с учетом воздействия поездов, определить необходимую по условию устойчивости сопротивляемость балласта через коэффициент вязкости ξ :

$$\xi = \frac{DF^2\tau}{EI \ln\left(\frac{f_0}{f}\right)}, \quad (4.10)$$

где D – коэффициент, зависящий от конфигурации изгиба рельсов, то по аналогии с ранее произведенными преобразованиями, приведшими к выражению (4.9), можем записать:

$$\xi = G \frac{\omega^2}{I}, \quad (4.11)$$

где G – коэффициент, в который вошли все факторы, влияющие на устойчивость бесстыкового пути, кроме зависящих от формы и площади поперечного сечения рельса. Из расчетов по (4.11), как и из (4.9), видно, что, чем меньше погонная масса рельса, тем меньше требуется сопротивляемость балласта сдвигу шпал поперек оси колеи для сохранения устойчивости бесстыкового пути. Значит, и из расчетов устойчивости бесстыкового пути с учетом воздействия поездов, как и из расчетов статическим методом, вытекает целесообразность применения рельсов типа Р58 вместо Р65. При переходе на рельсы типа Р58 вместо Р65 экономия металла составит 12 %, а увеличение устойчивости при прочих равных условиях на 17 % (17 % – это уменьшение необходимого коэффициента вязкости для сохранения устойчивости бесстыкового пути). Такие же проценты получаются и по статическому расчету, поскольку формулы (4.9) и (4.11) для определения сопротивляемости балласта имеют одинаковые зависимости от формы и площади поперечного сечения рельса.

4.4. Определение оптимального температурного режима работы бесстыкового пути

Если учесть воздействие поездов в расчетах величины зазоров на концах рельсовых плетей, то вместо погонного сопротивления $r = const$ или $r = a\lambda^b$, необходимо применять $r = K \dot{\lambda}$. В этом случае, как показано в [66, 95], закон изменения эпюры продольных сил на концевом участке рельсовой плети бесстыкового пути определяется выражением:

$$F(x, \tau) = F_0 \operatorname{erf} \left(\frac{Nx}{2\sqrt{\tau}} \right). \quad (4.12)$$

Поскольку

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3} + \frac{1}{2!} \cdot \frac{z^5}{5} - \frac{1}{3!} \cdot \frac{z^7}{7} + \dots \right), \quad (4.13)$$

то с достаточной точностью для инженерных расчетов

$$\operatorname{erf}(z) \approx \frac{2z}{\sqrt{\pi}}. \quad (4.14)$$

Тогда из (4.12) и (4.14) следует, что

$$x = \frac{\sqrt{\pi\tau}}{N}, \quad (4.15)$$

и значит величина зазора на концах рельсовых плетей при изломе рельса может быть определена по следующей формуле:

$$\lambda_3 = \alpha \left(\frac{\pi E \omega \tau}{K} \right)^{1/2} \cdot \Delta t_p. \quad (4.16)$$

Формула (4.16) от применяемой в Инструкции (4.5) [57] принципиально отличается тем, что в ней учитывается время τ и сопротивляемость балласта перемещения шпал учитывается не $r = const$, а коэффициентом вязкости

\sqrt{K} . Можно также отметить, что α и Δt в (4.16) не имеют вторую степень, как (4.5), а E и ω в отличие от (4.5) находятся под квадратным корнем.

Расчеты по (4.16) в отличие от (4.5) показывают, что зазор в первые минуты времени (τ) при изломе рельса под поездом составляет достаточно малую величину, он для движения поезда не опасен. Как видно, поэтому, как показывают статистические данные, в течение десяти лет на бесстыковом пути произошло более тысячи изломов рельсов под поездами, но сходов подвижного состава в этих случаях не было.

Но зато на концевых участках рельсовых плетей в уравнильных пролетах с течением времени τ зазоры по формуле (4.16) увеличиваются намного больше, чем по статическому расчету по формуле (4.5). Поэтому концевых участков рельсовых плетей бесстыкового пути должно быть минимальное количество. При длине рельсовых плетей, равных протяженности перегона, концевых участков будет всего два. Еще было бы лучше, чтобы концевых участков совсем не было, т.е. рельсовые плети должны быть сварены со стрелочными переводами. Предполагается, что в перспективе так и будет.

Работа в этом направлении проводилась [92], но она еще не закончена.

Если рельсовые плети имеют длину, равную протяженности перегона, то два концевых 400-метровых участка следует дважды в год перезакреплять (в апреле и октябре) с заменой рельсов, укладываемых между концом плети и стрелочным переводом. Весной на укороченный, а осенью на удлиненный, по специально разработанному расчету и технологии, что обеспечит и прочность болтов зимой, и устойчивость бесстыкового пути летом.

При такой конструкции бесстыкового пути создаются благоприятные условия работы для всех элементов верхнего строения железнодорожного пути (рельсов, шпал, креплений и балласта). При длине рельсовых плетей до 800 м и даже при их длине до блок-участка бесстыковой путь состоит сплошь из концевых участков, на которых происходят суточные и сезонные

знакопеременные продольные перемещения из-за колебаний температуры рельсов. В результате на шпалы, скрепления и балласт от рельсов передаются продольные оси пути силы, вызывающие продольные перемещения, заставляя шпалы перекашиваться и кантоваться. Рельсовые скрепления при этом испытывают, кроме обычных вертикальных силовых воздействий от подвижного состава, еще и дополнительно продольные и боковые силы, передаваемые на них от рельсов. Балласт также вместо только вертикальных и относительно небольших поперечных боковых сил испытывает большие продольные оси пути силовые воздействия из-за знакопеременных температурных перемещений концов рельсовых плетей. При сезонном перезакреплении только 400-метровых концевых участков рельсовых плетей, имеющих длину, равную протяженности перегона, продольные перемещения рельса даже на концах становятся минимальными, а в остальной части продольные перемещения будут совсем отсутствовать.

Теперь, когда в результате исследований определена конструкция бесстыкового пути, создающая наилучшие условия для его температурной работы, нужно определить, какую температуру закрепления следует назначить.

По условиям устойчивости при действии сжимающих продольных сил в рельсах при нагреве их в самые жаркие периоды лета с учетом знакопеременного суточного изменения температуры рельсов и воздействия проходящих поездов, необходимо определить минимальную температуру закрепления рельсовых плетей.

В расчете изменений стрелы изгиба рельсов в плане по формуле (3.40) необходимо задаться минимальными значениями EI и ξ , и определить максимально допустимое увеличение начальной стрелы f при ее исходном значении f_0 , для движения поездов без ограничения скорости.

При этом время роста стрелы должно составлять примерно 400 часов, что эквивалентно промежутку времени между очередными проходами

путеизмерительного вагона. Расчет можно произвести при разных значениях средней температурной силы в рельсах за 400 часов в самый жаркий период года для каждого региона (климатической зоны).

Для, например, климатической зоны, которая относится к Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры, среднесуточная температура рельсов в самые жаркие периоды лета (июле – августе) может составить 45°C (в полдень 60°C , ночью 30°C).

Результаты расчетов по найденным зависимостям (3.40) и (3.43) показывают, что допустимой максимальной разницей температур закрепления плетей и среднесуточной температурой рельсов в течение, например, 400 часов (чуть больше двух недель), будет $\Delta t_y = 10^{\circ}\text{C}$. Это значит, что минимально допустимой температурой закрепления будет

$$\min t_3 = \bar{t}_{\max \max} - \Delta t_y = 45 - 10 = 35^{\circ}\text{C}. \quad (4.17)$$

Именно такая температура закрепления была назначена для данной климатической зоны в [57]. Таким же методом были определены минимальные температуры закрепления для других климатических зон, которые в Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [57] названы оптимальными. Диапазон допускаемых изменений оптимальной температуры закрепления был назначен в 10°C . Такой допускаемый промежуток для температуры закрепления рельсовых плетей объясняется необходимостью ограничить максимальные растягивающие температурные продольные силы в рельсах по условию раскрытия зазора при изломе рельса и по условию работы стыковых болтов на концах рельсовых плетей:

$$\max t_3 = \min t_3 + 10^{\circ}\text{C}. \quad (4.18)$$

Таким образом, оптимальная температура закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути для каждого региона России оказалась равной

$$t_{opt} = \frac{\max t_3 + \min t_3}{2} \quad (4.19)$$

с допусками $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Для Северо-Кавказского региона $t_{opt} = 40 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Для остальных климатических зон, входящих в ОАО «РЖД», оптимальные температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути составили 35 и 30°C также с допусками $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Приложение 2).

Впервые «оптимальная» температура закрепления была введена по предложению РГУПС в Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути, утвержденные в 2000 году (ТУ2000) [56].

В 2009 году Распоряжением ОАО «РЖД» [93] таблица со значениями оптимальной температуры закрепления рельсовых плетей для всех регионов России по предложению РГУПС была откорректирована с увеличением на $5...10^{\circ}\text{C}$. Эта корректировка соответствует Инструкции [57] в табл. 3.1 (приложение 2).

Метод определения опасных мест в бесстыковом пути по условиям устойчивости, основанная на приведенной в диссертации теории расчета с учетом воздействия поездов соответствует Инструкции [58] (п.4.1.5) (приложение 3).

В пересмотренной в конце 2016 г. Инструкции [58] оптимальная температура закрепления по сравнению с [57] понижена почти везде на 5°C . Это рационально для бесстыкового пути с длиной рельсовых плетей не более блок-участков. Таких плетей пока еще около $2/3$ от общей протяженности бесстыкового пути в России.

Диссертация была рассмотрена в Северо-Кавказской Дирекции инфраструктуры, которой было установлено, что представляемое на защиту исследование принято к использованию, о чем свидетельствует прилагаемый акт использования результатов и рекомендаций (приложение 4).

По результатам рассмотрения диссертационного исследования Проектно-конструкторским бюро по инфраструктуре ОАО «РЖД» было дано прилагаемое заключение о возможности использования результатов (приложение 5).

Диссертация была также рассмотрена в научном центре «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо-рельс» АО «ВНИИЖТ», о чем свидетельствует прилагаемая справка (приложение 6).

4.5. Выводы по главе 4

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования послужили научной основой для уточнения методики определения напряженного состояния бесстыкового пути, позволяющей обнаруживать опасные по условиям устойчивости места в бесстыковом пути по диаграммам, получаемым путеизмерительным вагоном, с учетом скорости изменения стрелы изогнутой оси неровности в плане.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований по определению условий устойчивости бесстыкового пути энергетическим методом с учетом воздействия поездов установлены научно-расчетные и практические критерии для разработки нормативных документов с более надежным обеспечением безопасности движения.

По диссертации имеются следующие выводы:

1. Показано, что, несмотря на достигнутые успехи, в используемой методике расчета бесстыкового пути на устойчивость, воздействие подвижного состава на путь в нормативных документах не учитывалось.

2. Показано, что учет воздействия поездов существенно влияет на устойчивость бесстыкового пути и сформулированы предпосылки и допущения, необходимые для разработки математической модели потери устойчивости бесстыкового пути с учётом воздействия поездов.

3. Получены результаты экспериментального определения параметров сопротивления щебёночного балласта перемещениям железобетонных шпал с учетом воздействия поездов.

4. На основе энергетического метода разработана математическая модель определения условий потери устойчивости бесстыкового пути под воздействием поездов с учетом величины стрелы и скорости ее роста.

5. Сформулированы условия оценки стрелы изгиба, а также её скорости в зависимости от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути. На этой основе разработаны предложения по ограничению допустимых отклонений от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути для обеспечения устойчивости пути.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме:

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования в диссертационной работе могут послужить научной основой для разработки нормативных документов для путевого хозяйства, касающихся условий устойчивости бесстыкового пути с учетом не только величины стрелы, но и скорости ее изменения.

Библиографический список

1. Вериго, М. Ф. Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути / М. Ф. Вериго // Труды ВНИИЖТа. – М.: Интекст, 2000.
2. Ершов, В. В. Устойчивость бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и разработка технологий по ее обеспечению : дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук : 05.22.06 / В. В. Ершов ; науч. консультант В. И. Новакович ; СамГАПС. – Самара, 2003. – 288 с.
3. Савин, А. В. Напряженное состояние рельсовой плети и методы его определения : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.22.06 / А. В. Савин ; ВНИИЖТ. – М., 2002.
4. Суслов, О. А. Расширение сферы применения бесстыкового пути в сложных эксплуатационных и природно-климатических условиях : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.22.06 / О. А. Суслов ; науч. рук. В. А. Покацкий ; ИрГУПС. – Иркутск, 2004. – 184 с.
5. Залавский, Н. И. Разработка методов контроля в системе обеспечения устойчивости бесстыкового пути : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.22.06 / Н. И. Залавский ; науч. рук. В. И. Новакович ; РГУПС. – Ростов н/Д, 2007. – 148 с.
6. Манюгина, Е. А. Совершенствование модели температурной устойчивости бесстыкового пути под поездами : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.22.06 / Е. А. Манюгина ; науч. рук. А. И. Гасанов ; Моск. гос. ун-т путей сообщ. – М., 2012. – 105 с.
7. Овчинников, Д. В. Определение запаса устойчивости бесстыкового пути с учетом его фактического текущего состояния : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 02.22.06 / Д. В. Овчинников ; науч. рук. В. А. Покацкий ; Самар. гос. ун-т путей сообщ. – Самара, 2014. – 144 с.

8. Карпачевский, В. В. Особенности проектирования и эксплуатации бесстыкового пути в кривых : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 02.22.06 / В. В. Карпачевский ; науч. рук. В. И. Новакович ; МГУПС (МИИТ). – М., 2014. – 105 с.
9. Атапин, В. В. Контроль и оценка предотказного состояния бесстыкового пути в плане : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.22.06 / В. В. Атапин ; науч. рук. В. В. Ершов ; ПГУПС. – СПб: 2015. – 184 с.
10. Мищенко, К. Н. Бесстыковый рельсовый путь / К. Н. Мищенко. – М.: Трансжелдориздат, 1950.
11. Першин, С. П. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути / С. П. Першин // Путь путевое хозяйство : труды / ред. Г. М. Шахунянец : МИИТ. – М., 1962. – Вып. 147.
12. Грюневальдт, К. Устойчивость бесстыкового пути / К. Грюневальдт // Organ. – 1931. – № 1.
13. Блох, А. Устойчивость бесстыкового пути / А. Блох // Organ. – 1932. – № 9.
14. Нумато, М. Устойчивость бесстыкового пути / М. Нумато // Ry Engineering Research. – 1957. – № 19.
15. Леви, Р. Устойчивость бесстыкового пути / Р. Леви // Genie civil. – 1932. – № 2610.
16. Мартине, М. А. Устойчивость бесстыкового пути / М. А. Мартине // Revue General des Chmen de Fer. – 1936. – № 4.
17. Мейер, Г. Теория определения устойчивости бесстыкового пути / Г. Мейер // Organ. – 1937. – № 20.
18. Рааб, Ф. Устойчивость бесстыкового пути / Ф. Рааб // ETR. – 1958. – № 11/12.
19. Коган, А. Я. Продольные силы в железнодорожном пути / А. Я. Коган // Труды ВНИИЖТа. – М.: Транспорт, 1967. – Вып. 332.

20. Новакович, В. И. О ползучести бесстыкового пути в поперечном направлении под действием продольных сил / В. И. Новакович // Вестник ВНИИЖТа. – 1976. – № 5.
21. Коваленко Н.И. Факторный анализ оценки состояния пути//Путь и путевое хозяйство. 2013. №1. С. 22-23.
22. 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.
23. Певзнер В. О., Ромен Ю. С. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения, Труды ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2013.
24. Хадукаев, А. С. О необходимости восстановления плетей сваркой и ликвидации уравнительных пролетов / А. С. Хадукаев // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 26–27.
25. Данилов, В. Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка / В. Н. Данилов // Труды ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 70.
26. Кривободров А.А. Устойчивость железнодорожного пути при температурном воздействии на рельсы. Тр. ЛИИЖТа, вып. 144, 1952, с. 23-47.
27. Шур, Е. А. О выборе допускаемых напряжений при прочностных расчетах рельсов / Е. А. Шур // Вестник ВНИИЖТ. – 1977. – № 8.
28. Шур, Е. А. Повреждения рельсов / Е. А. Шур. – М.: Интекст, 2012.
29. Ньютон, Исаак. Математические начала натуральной философии / Исаак Ньютон ; ред. Л. С. Полак ; пер. с лат. А. Н. Крылова. – М.: Наука, 1989.
30. Тимошенко, С. П. Курс сопротивления материалов. 10-е изд. / С. П. Тимошенко. – М.-Л.: Гос. издат., 1930.
31. Д'Аламбер, Жан Лерон. Динамика / Жан Лерон Д'Аламбер. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950.

32. Лагранж, Ж. Л. Аналитическая механика / Ж. Л. Лагранж. – М.-Л.: ГИИТЛ, 1950.
33. Немешди, Э. Расчет горизонтальной устойчивости бесстыкового пути. Eisenbahntechnische Rundschau / Э. Немешди // (ETR), 1960, № 12.
34. Новакович, В. И. Исследование изменений напряженного состояния бесстыкового пути при ремонтных работах : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / В. И. Новакович ; ХИИТ. – Харьков, 1966. – 17 с.
35. Амман, О. Теория устойчивости и предложения по повышению устойчивости бесстыкового пути / О. Амман, К. Грюневальдт // Organ. – 1931. – № 4.
36. Мищенко, К. Н. Расчет устойчивости непрерывной рельсовой колеи под влиянием температурных воздействий / К. Н. Мищенко // Труды МИИТа. – 1932. – Вып. 21.
37. Мищенко, К. Н. Основы расчета бесстыкового пути и длинных рельсов / К. Н. Мищенко // Труды МИИТа. – 1937. – Вып. 58.
38. Шахунянец, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянец. – М. : Транспорт, 1969.
39. Шахунянец, Г. М. Железнодорожный путь / под редакцией Т. Г. Яковлевой. – М. : Транспорт, 1987.
40. Временные технические указания по укладке и эксплуатации температурно-напряженного бесстыкового пути без периодической разрядки напряжений и с периодической (сезонной) разрядкой напряжений в рельсах Р50. – М.: Главное управление пути и сооружений МПС, 1960.
41. Немчек, И. О выбросе бесстыкового пути. / И. Немчек // Organ. – 1932. – № 7.
42. Швед, Ф. О критической температуре рельсов при выбросе непрерывного сварного пути / Ф. Швед // Eisenbahntechnische Rundschau. – 1961. – № 6.
43. Рубин, Г (Р). Сопротивление длинных сварных рельсов продольному изгибу / Г (Р). Рубин // Eisenbahntechnische Rundschau. – 1955. – № 9.

44. Энгель, Э. Устойчивость бесстыкового железнодорожного пути в условиях изменения температуры / Э. Энгель // Zeitschrift Bd. 102. – 1960. – № 10.
45. Сакмауэр, Л. Расчет бесстыкового пути на действие продольных сил / Л. Сакмауэр // Eisenbahntechnische Rundschau. – 1960. – № 8.
46. Бартлет, Д. Опыты по исследованию устойчивости бесстыкового пути. Британская транспортная комиссия. / Д. Бартлет, Д. Туора. – Лондон, 1961. (перевод ЦНТБ МПС П – 8737, 1959 г.)
47. Надь, И. Исследования, связанные с явлениями, вызванными температурными напряжениями в бесстыковых железнодорожных путях / И. Надь // Ежегодник НИР института ж.д. транспорта. – Будапешт, 1961.
48. Бирман, Ф. Опыты применения бесстыкового пути на Федеральных германских железных дорогах / Ф. Бирман ; пер. с нем. В. Д. Никифоровского, А. М. Шкитиной. – М.: Трансжелдориздат, 1959.
49. Бромберг, Е. М. Экспериментальное изучение устойчивости бесстыкового пути / Е. М. Бромберг // Бесстыковой путь : труды ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244.
50. Новакович, В. И., Карпачевский, Г. В. О методике расчета рельсов бесстыкового пути на прочность / В. И. Новакович, Г. В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 25–26.
51. Влияние формы и площади поперечного сечения рельса на устойчивость бесстыкового пути / Н. И. Залавский, М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 22–23.
52. Технические условия на укладку и содержание бесстыкового пути : утв. : 18.04.1962 г. / Главное управление пути и сооружений МПС. – М. : Всесоюз. издат.-полиграф. объединение МПС, 1963. – 85 с.
53. Технические условия на укладку и содержание бесстыкового пути : утв. 23.05.1969 / Главное управление пути МПС. – М.: Транспорт, 1970.
54. Технические указания по укладке и содержанию бесстыкового пути : утв. 03.10.1979 / Главное управление пути МПС. – М.: Транспорт, 1982.

55. Технические указания по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути : утв. 03.10.1991 / МПС. – М.: Транспорт, 1992.
56. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утв. 31.03.2000 / МПС. – М.: Транспорт, 2001.
57. Инструкция по устройству, укладке и содержанию и ремонту бесстыкового пути : утв. 28.12.2012, № 2788р / ОАО «РЖД».
58. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (утв. 14.12.2016, №2544р) ОАО «РЖД».
59. Вериго, М. Ф. Создание нормативной базы для повышения устойчивости бесстыкового пути и расширения его применения / М. Ф. Вериго // Железные дороги мира. – 1996. – № 10.
60. Бромберг, Е. М. Устойчивость бесстыкового пути при совместном действии поездной и температурной нагрузки / Е. М. Бромберг // Труды ВНИИЖТа. – М.: Транспорт, 1983.
61. Зарембский, А. М. Исследование влияния методов текущего содержания на выбросы бесстыкового пути / А. М. Зарембский, Г. М. Мейджи // Железные дороги мира. – 1983. – № 9.
62. Прюддом, А. Устойчивость пути с длинными сварными рельсовыми плетями / А. Прюддом, Г. Жанкен // Ежемесячный бюллетень Международной ассоциации железнодорожных конгрессов. – 1970. – № 3.
63. Прюддом, А. Сопротивление пути поперечным воздействиям подвижного состава / А. Прюддом // Ежемесячный бюллетень Международной ассоциации железнодорожных конгрессов. – 1969. – № 6.
64. Новакович, В. И. Реология бесстыкового пути / В. И. Новакович // Rail International. – 1988. – № 11.
65. Новакович, В. И. Основы реологии бесстыкового пути и ее приложения : дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук / В. И. Новакович ; РИИЖТ. – 1984.

66. Новакович, В. И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. И. Новакович. – М.: Маршрут, 2005. – 142 с.
67. Маркарьян, М. А. Сопротивление бесстыкового пути перемещениям / М. А. Маркарьян, Н. Б. Зверев // Труды ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244.
68. Андреевский, М. Г. К вопросу сопротивления рельсового пути продольному смещению / М. Г. Андреевский // Труды ТашИИТ. – 1957. – Вып.8.
69. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е. М. Бромберг, В. Н. Данилов, М. Ф. Вериги, М. А. Фришман // Труды ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1956.
70. Григорьев, В. В. Влияние колебаний температуры на рельсовый путь / В. В. Григорьев // Труды научно-технического кабинета НКПС. – 1928. – Вып. 85.
71. Членов, М. Т. Длинные рельсы / М. Т. Членов. – М.: Трансжелдориздат, 1940.
72. Попов, С. Н. Балластные материалы на железных дорогах / С. Н. Попов // Труды ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1947. – Вып. 4.
73. Брокман, В. Knikvastheid van het Spoor / В. Брокман. – Delft, 1913.
74. Корини, Ф. Конструкция пути для больших скоростей / Ф. Корини // Bul. Int. Ry. Congr. Assn. – 1955. – № 4.
75. Мейер, Х. Эксперименты на устойчивость / Х. Мейер // Eisenbahningieur. – 1957. – № 7.
76. Сонневиль, Р. Resistance laterale de la voie non chargee / Р. Сонневиль, А. Ибенто // Bul. Assn. Int. Congr. Cheins de Ftr. – 1956. – № 2.
77. Бирман, Ф. Neuere Messungen an Gleisen mit verschiedenen Unterschwellungen / Ф. Бирман // Eisenbahntechn Rundschau. – 1957. – № 7.
78. Альбрехт, В. Г., Коган, А. Я. и др. Бесстыковой путь / М.: Транспорт, 2000.

79. Новакович, М. В. Устойчивость бесстыкового пути под действием продольных сжимающих сил в кривых участках [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Карпачевский, В. В. Шубитидзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 94–97.
80. Новакович, М. В. Неровности рельсов в плане и температурный режим бесстыкового пути [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Карпачевский, В. В. Шубитидзе // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 30.
81. Новакович, М. В. Энергетический метод расчета устойчивости бесстыкового пути [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе, В. В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 10. – С. 22–24.
82. Карпачевский, Г. В. Предложения по изменению проекта Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [Текст] / Г. В. Карпачевский, Н. И. Залавский, В. В. Шубитидзе [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 15.
83. Новакович, М. В. Расчет бесстыкового пути на устойчивость энергетическим методом с учетом фактора времени и воздействия поездов [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе, В. В. Карпачевский [и др.] // Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава : тр. междунар. науч.-практ. конф. /ДНУЖТ. – Днепропетровск, 2013. – С. 15-18.
84. Новакович, М. В. Условия устойчивости бесстыкового пути в кривых участках с малыми радиусами [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Карпачевский, В. В. Шубитидзе // Безопасность движения поездов : тр. XI науч.-практ. конф., 21–22 октября 2010 г., г. Москва / МГУПС. – М., 2010. – С. III-9.
85. Новакович, В. И. Натяжители или нагреватели? [Текст] / В. И. Новакович, Г. В. Карпачевский, В. В. Шубитидзе, А. В. Варданян [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 6. – С. 21–22.

86. Залавский, Н. И. Напряженные и ненапряженные неровности [Текст] / Н. И. Залавский, М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе, В. В. Карпачевский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 23-25.
87. Шубитидзе, В. В. Об энергетическом методе определения продольной устойчивости железнодорожного пути с учетом фактических условий его эксплуатации [Текст] / В. В. Шубитидзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 3. – С. 100–105.
88. Новакович, В. И. О контроле устойчивости бесстыкового пути [Текст] / В. И. Новакович, Н. И. Залавский, В. В. Шубитидзе, Г. В. Карпачевский // Транспортное строительство. – 2017. – № 6. – С. 14-16.
89. 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.
90. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи, планированию работ и мерам по обеспечению безопасности движения по показаниям путеизмерительных вагонов (ЦПТ-46/18) : утв. 24.05.2009 / ОАО «РЖД».
91. Возможно ли содержание пути с 25-метровыми рельсами без температурных напряжений? / Г. В. Карпачевский, М. В. Новакович, Е. Н. Зубков, А. А. Солдатов, Х. Х. Дутаев, С. К. Матюгин, В. Н. Залавский, А. В. Варданян, А. С. Хадукаев, Е. В. Корниенко, Р. А. Салиев, И. С. Бабадеев // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 31–32.
92. Карпачевский, Г. В. Особенности укладки, содержания и ремонта бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями и с их учетом разработка технических решений : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.22.06 / Г. В. Карпачевский ; науч. рук. В. И. Новакович ; РГУПС. – Ростов н/Д, 2004. – 186 с.

93. Распоряжение вице-президента В. Б. Воробьева Об утверждении
Дополнительных технических требований к содержанию бесстыкового
пути № 1029р от 28.09.2009.
94. Распоряжение вице-президента В. Б. Воробьева О дополнительных мерах
по обеспечению устойчивости бесстыкового пути, № 1063р от 18.05.2010.
95. Новакович, В. И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми
плетями : учеб. пособие для магистров и специалистов / В. И. Новакович.
– М.: Алатырь, 2017. – 166 с
96. Крылов, А. Н. Избранные труды / А. Н. Крылов ; АН СССР. – [Б.м.] – 1958.
97. Мах, Э. Механика. Историко-критический очерк её развития. / Э. Мах. –
Ижевск: РХД, 2000.
98. Зубов, В. П. Аристотель / В. П. Зубов ; УРСС. – М.: Эдиториал, 2000.
99. Тарасов, Б. Н. Паскаль / Б. Н. Тарасов. – М.: Молодая гвардия, 2006.
100. Никифоровский, В. А. Рождение новой математики / В. А.
Никифоровский, Л. С. Фрейман. – М.: Наука, 1976.
101. Храмов, Ю. А. Лейбниц Готфрид. Физики: Биографический справочник
/ Ю. А. Храмов ; под ред. А. И. Ахиезера – М.: Наука, 1983.
102. Невзглядов, В. Г. Теоретическая механика Ч. II / В. Г. Невзглядов. – М.:
Физматгиз, 1972.
103. Новакович, В. И. Дорожный мастер / В. И. Новакович // Путь и путевое
хозяйство. – 2014. – № 7.
104. Новакович, В. И. Заместитель начальника дистанции / В. И. Новакович
// Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 9.
105. 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.
106. Новакович, В. И. Влияние на температурный режим бесстыкового пути
неровностей рельсов в плане [Текст] / В. И. Новакович, Г. В. Карпачевский,
В. В. Шубитидзе // Современные проблемы проектирования,

- строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сб. тр. VIII науч.-техн. конф. с междунар. участием. – М., МИИТ. 2011. – С. 58.
107. Новакович, М. В. Неровности рельсов в плане и их влияние на температурный режим бесстыкового пути [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Карпачевский, В. В. Шубитидзе // Транспорт-2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф., май 2011 г. В 3-х частях / РГУПС. – Ростов н/Д, 2011. – Ч. 2 : Технические науки. – С. 244–246.
108. Карпачевский, В. В. Неровности рельсов в плане и их влияние на устойчивость бесстыкового пути [Текст] / В. В. Карпачевский, М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе // Безопасность движения поездов : тр. XII науч.-практ. конф., 20–21 октября 2011 г. / МИИТ. – М., 2011. – С. 27–28.
109. Новакович, М. В. Механико-математические модели бесстыкового пути [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе, В. В. Карпачевский // Транспорт-2012 : тр. Всерос. науч.-практ. конф., апрель 2012 г. В 3-х частях / РГУПС. – Ростов н/Д, 2012. – Ч. 2 : Технические науки. – С. 222–223.
110. Карпачевский, В. В. Математические модели бесстыкового пути [Текст] / В. В. Карпачевский, М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : IX науч.-техн. конф. с междунар. участием, 4–5 апреля 2012 г. Чтения, посвященные памяти Г. М. Шахунянца / МИИТ. – М., 2012. – С. 287.
111. Новакович, М. В. Реологическая модель расчета бесстыкового пути на устойчивость [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Карпачевский, В. В. Шубитидзе, Е. В. Корниенко [и др.] // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2013. – Ч. 3 : Естественные и технические науки. – С. 46–48.
112. Новакович, М. В. Энергетический метод определения устойчивости бесстыкового пути [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе, В. В. Карпачевский // 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. / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – Ч. 2 : Технические и естественные науки. – С. 117–119.
113. Новакович, М. В. Устойчивость бесстыкового пути (Энергетический метод) [Текст] / М. В. Новакович, В. В. Шубитидзе, В. В. Карпачевский // Транспорт-2015 : тр. междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – Ч. 3 : Технические и естественные науки. – С. 67–69.
114. Карпачевский, Г. В. Об особенностях работы концевых участков бесстыкового пути [Текст] / Г. В. Карпачевский, М. В. Новакович, В. Н. Залавский, Е. В. Корниенко, В. В. Шубитидзе // Транспорт-2016 : тр. междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – Т. 4 : Технические и естественные науки. – С. 52–54.
115. Шубитидзе, В. В. Практические следствия определения устойчивости бесстыкового пути [Текст] / В. В. Шубитидзе // Транспорт-2016 : тр. междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – Т. 4 : Технические и естественные науки. – С. 135–138.

**Ведомость неисправностей пути в плане по показаниям
вагона - путеизмерителя**

П/И	Направление	Путь	Использованный							Августовский							Августинский									
			Дата проседа	Время	Сте- нь	мм	м	Нач/к м	Нач км	Т рей- са	Дата проседа	Время	Сте- нь	мм	м	Нач/к м	Нач км	Т рей- са	Дата проседа	Время	Сте- пень	мм	м	Нач/к м	Нач км	Т рей- са
1	Шамей-Брянск	1	16.07.08	12:40	2	24	21	1124	29	33	02.08.08	12:20	2	25	21	1124	29	39	16.08.08	11:00	3	26	19	1124	29	35
1	Киев-Одесс- Перевоз	2	20.07.08	10:20	2	24	24	1154	49	31	06.08.08	10:00	2	23	25	1154	49	34	20.08.08	11:30	3	26	19	1154	49	36
2	Мелец-Курск- Нелюбово	1	26.07.08	13:20	2	21	28	1246	69	38	12.08.08	12:30	2	22	26	1246	69	46	26.08.08	12:30	3	31	25	1246	69	40
3	Новгород- Александров	2	20.07.08	11:50	2	35	26	1184	35	31	06.08.08	11:20	2	19	2	1184	35	35	20.08.08	12:15	3	28	14	1184	35	37
4	Высоцкое	2	24.07.08	10:30	3	37	27	1372	44	32	01.08.08	11:40	2	15	12	1372	44	35	15.08.08	10:00	3	28	12	1372	44	34
4	Блокпост-Бок пост 19	1	20.07.08	13:30	2	29	25	5	826	34	01.08.08	12:50	2	30	26	5	826	37	15.08.08	10:30	3	37	26	5	826	33
4	Благодатное	2	20.07.08	12:00	3	27	20	1365	34	32	02.08.08	11:30	2	29	22	1365	34	36	16.08.08	11:40	3	36	21	1365	34	34
4	Койсуг-Челе	1	22.07.08	13:00	2	21	21	1372	68	34	08.08.08	13:10	2	14	19	1372	68	37	22.08.08	12:30	3	26	19	1372	68	37
4	Койсуг-Челе	1	22.07.08	13:00	2	18	25	1369	49	33	08.08.08	13:10	2	15	17	1369	49	36	22.08.08	12:30	3	26	17	1369	49	37
4	Орлов-Курск- Возле-Перевоз	2	26.07.08	11:40	2	15	10	1401	25	36	12.08.08	12:00	2	17	18	1401	25	39	26.08.08	12:00	3	27	20	1401	25	38
6	Щучье	2	22.07.08	12:00	2	17	18	1428	97	37	08.08.08	13:10	2	21	21	1428	97	36	22.08.08	12:10	3	21	36	1428	97	36
6	Степан-Щучье	1	22.07.08	12:20	2	22	17	1426	128	34	08.08.08	12:30	3	36	12	1426	128	37	22.08.08	12:15	3	31	19	1426	128	37
7	Мирон-Кавказ	2	17.07.08	10:20	2	26	23	154	82	30	02.08.08	9:40	2	26	23	154	82	32	17.08.08	9:00	3	36	21	154	82	33
7	Кавказ-Горы	1	19.07.08	12:20	2	29	24	1592	321	38	05.08.08	12:20	2	25	21	1592	321	38	19.08.08	11:30	3	26	19	1592	321	35
9	Кан-Курган	2	17.07.08	11:00	2	27	22	1773	569	31	02.08.08	10:40	2	28	22	1773	569	33	17.08.08	11:00	3	30	17	1773	569	36

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

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

Москва, 2012 г.

щих моментов затяжки гаек клеммных, закладных, стыковых болтов, шурупов, сил прижатия рельсов к основанию клеммами анкерных скреплений, положения прокладок-амортизаторов, возможных подвижек плетей, соответствия фребуемым нормам состояния балластной призмы, соответствия нормам стыковых зазоров в уравнивательных стыках и проведены работы по устранению обнаруженных неисправностей.

3.4 Закрепление плетей при укладке

3.4.1 Для обеспечения прочности и устойчивости бесстыкового пути все вновь укладываемые плети должны закрепляться при оптимальной температуре согласно таблице 3.1.

Нормы оптимальной температуры закрепления ($t_{\text{опт}}$) касаются вновь укладываемых, перекладываемых плетей, а также плетей, в пределах которых восстанавливается нарушенная температура закрепления. Эти нормы действуют с момента ввода их распоряжением ОАО «РЖД» № 2022 от 01.10.2009 г. «Об установлении временных норм эксплуатации бесстыкового пути».

Плети, уложенные до 01.10.2009 г., если у них не нарушен температурный режим работы, разрешается эксплуатировать при температуре закрепления, установленной в табл. 3.1 «Технических указаний по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» от 31.03.2000 г. (далее - ТУ-2000).

Таблица 3.1 Оптимальные температуры закрепления плетей в дирекциях инфраструктуры

Дирекция инфраструктуры	Оптимальная температура закрепления плетей $t_{\text{опт}}$, °С
Октябрьская	35±5
Калининградская	35±5
Московская	35±5
Горьковская	35±5
Северная	35±5*
Северо-Кавказская	40±5
Юго-Восточная	40±5
Приволжская	40±5

Дирекция инфраструктуры	Оптимальная температура закрепления плетей $t_{\text{опт}}$, °С
Куйбышевская	35±5
Свердловская	35±5*
Южно-Уральская	35±5
Западно-Сибирская	35±5*
Красноярская	30±5*
Восточно-Сибирская	35±5*
Забайкальская	35±5*
Дальневосточная	35±5*

* - на участках с минимальными температурами рельсов $t_{\text{мин}} - 50^{\circ}\text{C}$ и ниже разрешается закреплять плети при температурах $30 \pm 5^{\circ}\text{C}$

3.4.2 Плети при укладке закрепляют по направлению хода укладки (от начала плети до ее конца).

После обкатки вновь уложенных и введенных в оптимальную температуру закрепления, плетей (после пропуска 200-500 тыс. тонн груза брутто) должна быть произведена повторная затяжка болтов, шурупов промежуточных рельсовых скреплений. Затяжка должна производиться крутящими моментами в соответствии с требованиями п.2.5.2 настоящей Инструкции.

3.4.3 Температурой закрепления короткой рельсовой плети считается средняя из температур, измеренных в начале и конце работ при условии закрепления плети не реже, чем на каждой пятой шпале. Разница температур закрепления соседних коротких плетей, составляющих длинную плеть, не должна превышать 5°C , а максимальная разность по всей длине плети - 10°C .

Разница между температурами закрепления правой и левой рельсовых нитей не должна превышать 10°C . Во всех случаях фактические температуры закрепления должны находиться в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$ от оптимальной температуры.

3.4.4 При выполнении ремонтно-путевых работ, связанных с разрыхлением балласта и снижением устойчивости бесстыкового пути (подъемка, рихтовка, машинизованная очистка щебня и др.), температурой закрепления бесстыкового пути следует считать наименьшую из температур закрепления правой и левой нитей.

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 превышении температуры рельсовых плетей относительно их температуры закрепления менее чем на 15°C, но при ожидаемом 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.

4.1.1.5 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 сохранении (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 отрихтовать 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.

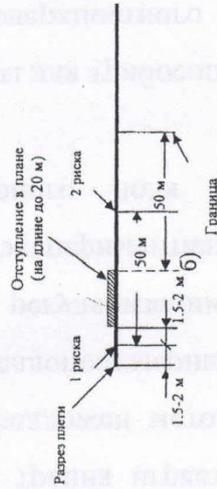


Рисунок 4.1

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 $t_{ф}$ вычисляется по известной зависимости:

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

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

Δl - изменение длины 50-метрового участка, мм;

УТВЕРЖДЕНА
распоряжением ОАО «РЖД»
от _____ 2016 г. № _____

ИНСТРУКЦИЯ
по устройству, укладке, содержанию и ремонту
бесстыкового пути

Москва, 2016 год

Электронная подпись. Подписал: Верховых Г.В.
№2544/р от 14.12.2016

3.4 Закрепление плетей при укладке

3.4.1 Для обеспечения прочности и устойчивости бесстыкового пути, определяемых по методике, приведенной в Приложении 6, все вновь укладываемые плети должны закрепляться при оптимальной температуре согласно таблице 3.1.

Т а б л и ц а 3.1 Оптимальные температуры закрепления плетей в дирекциях инфраструктуры

Дирекция инфраструктуры	Оптимальная температура закрепления плетей $t_{\text{опт}}$, °С
Октябрьская	30±5
Калининградская	30±5
Московская	30±5
Горьковская	30±5
Северная	30±5
Северо-Кавказская	35±5
Юго-Восточная	35±5
Приволжская	35±5
Куйбышевская	30±5
Свердловская	30±5
Южно-Уральская	30±5
Западно-Сибирская	30±5
Красноярская	30±5
Восточно-Сибирская	30±5
Забайкальская	30±5
Дальневосточная	30±5
<p><i>Примечание.</i> Распоряжением начальника Управления пути и сооружений разрешается вводить на отдельных участках дорог (регион, ПЧ) значения оптимальной температуры закрепления, отличающиеся от приведенных.</p>	

Утверждаю:

Заместитель начальника по
эксплуатации Северо-Кавказской
дирекции инфраструктуры –
филиала Центральной дирекции

ОАО «РЖД»  К.С. Щерблякин
2017 г.

АКТ

**использования результатов и рекомендаций, разработанных в
диссертационной работе соискателя Шубитидзе В.В. на тему «Определение
условий устойчивости бесстыкового пути энергетическим методом
с учетом 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» Лисунова Л.О., зав. лабораторией кафедры «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС к.т.н., доцент Карпачевский В.В., д.т.н., профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС Новакович В.И., автор предложения, инженер Шубитидзе В.В. составили настоящий акт в том, что в Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований Шубитидзе В.В. в плане внедрения разработанных автором предложений по ограничению допустимых отклонений от температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути для обеспечения устойчивости пути.

Выполненные Шубитидзе В.В. исследования позволили:

- а) сформулировать критерии оценки стрелы изгиба, а также ее скорости для определения условий потери устойчивости бесстыкового пути под воздействием поездов;
- б) определять места предвыбросного напряженного состояния бесстыкового пути по данным, фиксируемым путеизмерительным вагоном.

По предлагаемой методике ежегодно с мая по сентябрь производится анализ диаграмм характеризующих положение рельсов в плане, получаемых с помощью путеизмерительных средств. Полученные диаграммы положения рельсов в плане (по рихтовке) сохраняются; после каждого очередного прохода путеизмерительного средства две смежные по времени диаграммы совмещаются, определяется разность стрел изгиба, эта разность стрел делится на

время, прошедшее между двумя съёмками положения рельсов в плане, таким образом определяется скорость роста стрел. По скорости роста стрел определяется опасное место и тогда принимаются известные меры по ликвидации этого опасного места в бесстыковом пути.

Предложение В.В. Шубитидзе развивает и уточняет методику контроля над устойчивостью бесстыкового пути, введенную в действие на сети железных дорог России Распоряжением ОАО «РЖД» №1063/р от 18.15.2010 г.

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



Л.О. Лисунова

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



В.В. Карпачевский

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



В.И. Новакович

Автор предложения, инженер



В.В. Шубитидзе

УТВЕРЖДАЮ:

**Директор
проектно-конструкторского
бюро по инфраструктуре ОАО «РЖД»,
кандидат технических наук**

В.Б. Воробьев

20.09.2017г.

Заключение

о возможности использования результатов кандидатской диссертационной работы Шубитидзе Виктории Викторовны на тему «Определение условий устойчивости бесстыкового пути энергетическим методом с учетом воздействия поездов» в проектно-конструкторской работе при совершенствовании элементов верхнего строения железнодорожного пути

Преимущество бесстыкового пути обуславливается не только снижением расходов на текущее содержание пути и подвижного состава, но и снижением сопротивления движению, а также уменьшения шума и загрязнение окружающей среды.

Вместе с тем ежегодно происходят сходы подвижного состава по причине нарушения устойчивости рельсошпальной решетки при действии в рельсах продольных сжимающих сил. Одной из причин этого является отсутствие в нормативных документах учета влияния воздействия поездов на железнодорожный путь. В работе Шубитидзе В.В. показано, что учет воздействия поездов существенно влияет на устойчивость бесстыкового пути. В подтверждение этого автором разработана методика расчета скорости роста стрел изгиба рельсов бесстыкового пути под действием продольных сил с учетом воздействия поездов при разных температурах закрепления.

Выполненные В.В. Шубитидзе теоретические и экспериментальные исследования по сути являются научной основой для разработки методики определения предвыбросного напряженного состояния бесстыкового пути, позволяющей не только определить места предвыбросного напряженного состояния бесстыкового пути по данным, фиксируемым путеизмерительным вагоном, но и сформулировать практические рекомендации по определению допустимых отступлений от температуры закрепления, что может быть рекомендовано в нормативные документы путевого хозяйства.

Главный инженер

Отделения пути и путевых машин ПКБ И



А.А. Корсаков

Приложение 6

Утверждаю:

Заместитель Генерального директора –
Руководитель научно-образовательного
комплекса АО «ВНИИЖТ»



Справка

дана Шубитидзе Виктории Викторовне в том, что **результаты** ее диссертационной работы на тему: «Определение условий устойчивости бесстыкового пути энергетическим методом с учетом воздействия поездов» являются одним из перспективных направлений совершенствования методики определения предвыбросного напряженного состояния бесстыкового пути. Работа включает в себя определение закономерностей и причин потери устойчивости бесстыкового пути с учетом воздействия поездов энергетическим методом, что позволяет уточнить действующую нормативную базу в части определения допускаемых отступлений от температуры закрепления рельсов бесстыкового пути.

Установленные автором закономерности скорости роста стрел изгиба рельсов в плане, в зависимости от состояния пути и действующих в плетях температурных сжимающих сил, открывают дополнительные перспективы, позволяющие уточнять результаты работы применяющихся программных комплексов по автоматизированной диагностике обнаружения опасных мест в бесстыковом пути по условиям его устойчивости.

Кандидат технических наук,
директор научного центра
«Путевая инфраструктура и вопросы
взаимодействия колесо-рельс»
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного
транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)
129626, Россия, г. Москва,
Ул. 3-я Мытищинская, д. 10а,
тел.: 8 (499) 260-44-64
e-mail: suslov.oleg@vniizht.ru

Перишь Сулова О.А. заверено
21.09.2017 г.

 Олег Александрович Суслов
Начальник отдела управления
персоналом АО «ВНИИЖТ»
Даничева Н.А.

