

На правах рукописи

Корниенко Елена Владимировна

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

Специальность 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание
и проектирование железных дорог

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

- Научный руководитель:** Новакович Василий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ») Савин Александр Владимирович
- доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)» (РУТ (МИИТ)) Коваленко Николай Иванович
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Защита диссертации состоится «16» сентября 2019 г. в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 218.010.02 ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, РГУПС.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.010.02
д.т.н., профессор

П.Н. Щербак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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

Степень разработанности темы исследования

Изучению напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути были посвящены работы отечественных и зарубежных ученых О. Аммана, А. Блоха, Е.М. Бромберга, М.Ф. Вериги, Н.П. Виногорова, К. Грюневальдта, В.В. Ершова, Н.И. Залавского, Н.Б. Зверева, В.В. Карпачевского, Г.В. Карпачевского, А.Я. Когана, А.А. Кривобородова, Р. Леви, М.А. Мартине, Г. Мейера, Т.М. Митюшина, К.Н. Мищенко, В.И. Новаковича, В.О. Певзнера, С.П. Першина, В.А. Покацкого, Ф. Рааба, Ю.С. Ромена, А.В. Савина, О.А. Сулова, В.В. Шубитидзе, В.Я. Шульги и др. К концу XX века стало ясным, что для реального отражения фактических условий работы бесстыкового пути необходимо учитывать воздействие поездов.

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

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

Цель и задачи исследования

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

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработана математическая модель происхождения процесса увеличения во времени остаточных стрел изгиба рельсов в плане при чередующихся сжимающих и растягивающих температурных продольных силах в бесстыковом пути.

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

3. Разработана методика определения коэффициента вязкости балласта, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, с учетом фактора времени по опытным данным, полученным на действующих участках железнодорожного пути.

Научная новизна:

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

2. Предложен метод определения в бесстыковом пути опасных мест, с пониженной температурой закрепления рельсовых плетей, которые для более надежного обеспечения безопасности движения поездов необходимо ликвидировать.

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

Теоретическая и практическая значимость работы

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

Методы диссертационного исследования

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

Положения, выносимые на защиту:

– метод определения механизма роста остаточных стрел изгиба рельсов в плане на напряженных неровностях в процессе эксплуатации бесстыкового пути;

– графоаналитический метод определения изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути под действием чередующихся температурных продольных сжимающих и растягивающих сил;

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

Степень достоверности и апробации результатов исследования

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

Реализация результатов работы

1. Результаты работы легли в основу предложений по корректировке нормативов устройства и эксплуатации бесстыкового пути.

2. Результаты работы учтены ВНИИЖТом при разработке «Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» (ЦП 2544) от 14.12.2016 г. в пунктах, касающихся регламентирования условий устойчивости бесстыкового пути.

Апробация работы

Основные результаты исследований были доложены и обсуждены:

– на Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2011» (Ростов-на-Дону, 2011 г.);

– на Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2013» (Ростов-на-Дону, 2013 г.);

– на Международной научно-практической конференции «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава» в ДНУЖТ (Днепропетровск, 2013 г.);

– на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» (Ростов-на-Дону, 2015 г.);

– на Международной научно-практической конференции «Транспорт-2015» (Ростов-на-Дону, 2015 г.);

– на Международной научно-практической конференции «Транспорт-2016» (Ростов-на-Дону, 2016 г.);

– на Международной научно-практической конференции «Транспорт-2017» (Ростов-на-Дону, 2017 г.);

– на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Наука -2017» (Ростов-на-Дону, 2017 г.);

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

Личный вклад автора состоит:

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

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

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

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 26 печатных работах, в том числе 11 – в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и практических рекомендаций. Диссертация изложена на 145 страницах основного текста, содержит 50 рисунков, 1 таблицу, 3 приложения, список использованных источников из 144 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано краткое обоснование актуальности поставленных в диссертации целей и задач. Показана необходимость объяснения причин роста остаточных стрел изгиба рельсов в плане, изменений напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути и определения вязких свойств балласта, сдвигаемого шпалами.

В первой главе в результате анализа отмечены ключевые моменты истории возникновения и развития отечественных и зарубежных конструкций бесстыкового пути, описаны способы его укладки, содержания и ремонта. Проанализирована эволюция методов расчета бесстыкового пути на прочность и устойчивость. Особое внимание уделено методам расчета бесстыкового пути на устойчивость.

Отмечены особенности методов решения задач определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути в ранних работах О. Аммана, А. Блоха, К. Грюневальдта, Р. Леви, М.А. Мартине, Т.М. Митюшина, К.Н. Мищенко. Проанализированы предпосылки и допущения, принятые в работах Е.М. Бромберга, М.Ф. Вериги, В.В. Ершова, А.Я. Когана, А.А. Кривобородова, Г. Мейера, Э. Немешди, В.И. Новаковича, Н. Нумато, В.О. Певзнера, С.П. Першина, Ф. Рааба, Ю.С. Ромена, Г. Рубина, Л. Сакмауэра, Э. Энгеля.

Существенное влияние на развитие бесстыкового пути в нашей стране оказали исследования М.С. Боченкова, Н.П. Виногорова, И.Я. Возненко, В.А. Грищенко, Х.Х. Дутаева, Н.И. Залавского, Н.Б. Зверева, В.В. Карпачевского, Г.В. Карпачевского, С.И. Клинова, З.Л. Крейниса, Е.А. Манюгиной, В.А. Несвита, М.В. Новакович, В.А. Покацкого, А.В. Савина, В.Г. Самойленко, О.А. Сулова, Н.С. Чиркова, В.Я. Шульги и др.

Во второй главе определена механико-математическая модель, на основе которой разработана методика расчета бесстыкового пути на устойчивость с

учетом воздействия поездов и при знакопеременном изменении продольной температурной силы в рельсах.

При выборе механико-математической модели бесстыкового пути были использованы экспериментальные данные В.В. Ершова, которым была проведена большая серия опытов на действующих участках по определению закономерностей перемещения шпал в балласте с разной степенью его уплотнения и при воздействии на шпалы сил различного уровня. Оказалось, что зависимость этих сил от скорости деформации с достаточной точностью соответствует закону:

$$q = q_0 + \xi \dot{y}, \quad (1)$$

где q_0 – начальное сопротивление перемещению шпал в балласте поперек оси пути, Н/м;

ξ – коэффициент вязкости среды (щебня), в которой происходит перемещение шпалы поперек оси пути, Н·с/м²;

\dot{y} – скорость перемещения железобетонных шпал в балласте поперек оси пути, м/с.

В этих экспериментах величина силового воздействия q изменялась до $q = 8$ кН/м. При этом q_0 составляла от 0,1 до 1,0 кН/м.

В существующих до настоящего время работах начальное сопротивление учитывалось в расчетах бесстыкового пути как $q_0 = \text{const}$ или принималось $q_0 = 0$.

Поскольку в расчет на устойчивость бесстыкового пути следует брать наиболее неблагоприятные значения механических характеристик, то следует определить влияние на расчет величины, при которой $q_0 \neq 0$.

На действующих участках бесстыкового пути были проведены эксперименты «на ползучесть» железобетонных шпал в щебеночном балласте вдоль оси пути. Экспериментами была определена реологическая модель, ею оказалась модель Максвелла:

$$r + n\dot{r} = K\dot{\lambda}, \quad (2)$$

где r – погонное сопротивление перемещению шпал в балласте вдоль оси пути, Н/м;

n – время релаксации, с;

K – коэффициент вязкости щебня, сдвигаемого шпалами вдоль оси пути, Н·с/м²;

λ – величина продольного перемещения шпал в балласте, м.

Если считать, что $q_0 = U_y y$, т. е. это упругая деформация (U_y – мгновенный модуль упругости щебня, сдвигаемого шпалами поперек оси пути), то и для щебня, сдвигаемого шпалами поперек оси пути, за реологическую модель можно также принять модель Максвелла:

$$q + m\dot{q} = \xi\dot{y}, \quad (3)$$

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

Известно дифференциальное уравнение (и его решение), соответствующее механико-математической модели бесстыкового пути, отражающее условие его устойчивости при действии в рельсах сжимающей продольной силы F :

$$EJy^{IV} - Fy'' + q = 0, \quad (4)$$

где EJ – жесткость рельсошпальной решетки в плоскости изгиба.

Совместное решение (3) и (4) дает:

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

где x и y – координаты, м;

τ – время, с.

Решение (5) в отличие от (4), получаемого в виде элементарных функций при $q = \xi\dot{y}$, возможно только численными методами. В (5) активной силой является F , а силами сопротивления изгибу – жесткость упругого стержня и погонное вязкое сопротивление балласта сдвигу шпал поперек оси пути.

Дифференциальному уравнению (5) соответствует реологическая модель в виде упругого стержня в упруго-вязкой среде, изображенная на рис. 1.

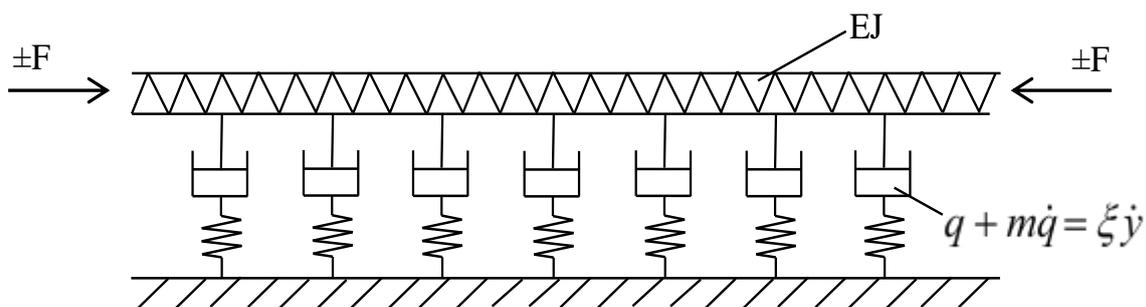


Рис. 1. Реологическая модель бесстыкового пути

Решение уравнений (4) от (5) отличается тем, что при учете упругой составляющей сопротивления балласта рост стрелы происходит с некоторым запаздыванием.

Если после увеличения стрелы изгиба рельсов в плане под действием продольной сжимающей силы температура рельсов понижается и продольная сила в рельсах бесстыкового пути становится растягивающей, то вместо (5) нужно решать уравнение следующего вида:

$$EJ \left(m \frac{\partial^5 y}{\partial x^4 \partial \tau} + \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right) + F \left(m \frac{\partial^3 y}{\partial x^2 \partial \tau} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \xi \frac{\partial y}{\partial \tau} = 0. \quad (6)$$

В (6) активная продольная растягивающая сила F , которая создает момент $F \cdot f_0$, выпрямляющий стержень, жесткость EJ – внутренние упругие силы также способствуют выпрямлению стержня, а вязкое сопротивление (реактивная сила) препятствует этому выпрямлению.

Анализируя результаты решения при знакопеременном изменении продольной силы за суточный период в самые жаркие летние дни, можно отметить следующие особенности. При сжимающей продольной силе рост стрелы идет с ускорением во времени, и при учете упругости балласта этот рост идет с запаздыванием по сравнению с решением, в котором упругость не учитывается. Учет этого обстоятельства несколько улучшает устойчивость бесстыкового пути. Но такое запаздывание существенным фактором признать нельзя, тем более что время релаксации m является, как показали эксперименты, относительно малой величиной, не превышающей 0,5 часа (1800

с). Время релаксации t и коэффициент вязкости ξ даже при одинаковых условиях имеют большую дисперсию, поэтому в расчетах необходимо принимать наиболее неблагоприятные их значения.

Но запаздывание выпрямления при растягивающих продольных силах является фактором, ухудшающим условия устойчивости. В результате этого запаздывания в течение суточных знакопеременных колебаний температуры рельсов стрела их изгиба в плане за время действия сжимающей продольной силы увеличивается. При действии растягивающей силы стрела уменьшается с замедлением и с запаздыванием, что в итоге ведет к росту во времени остаточной стрелы. В среднем за несколько суток в самый жаркий период года остаточная стрела изгиба рельсов в плане растет. Это явление происходит при образовании напряженной неровности, которая возникает при воздействии поездов и при достаточно большой продольной силе, т. е. при относительно низкой температуре закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути.

В третьей главе рассмотрены наиболее типичные изменения напряженно-деформированного состояния в рельсах бесстыкового пути в процессе эксплуатации, которые существенно влияют на прочность и устойчивость конструкции.

Как было показано в работе, величина зазоров в уравнильных пролетах бесстыкового пути при длительном действии растягивающих сил почти всегда приводит к работе стыковых болтов на срез, что заставляет при низких температурах менять рельсы на концах плетей на удлиненные.

С учетом фактора времени и воздействия поездов продольное перемещение конца рельсовой плети при понижении температуры на Δt характеризуется следующей зависимостью:

$$\lambda = \frac{\alpha \sqrt{\pi \tau \Delta t}}{2N}, \quad (7)$$

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

ω – площадь поперечного сечения рельсов, м^2 ;

Δt – разница температуры рельсов и температуры закрепления рельсовой плети, °С.

При постоянной продольной растягивающей силе $F_t = \alpha E \omega \Delta t = \text{const}$, что характерно для осенне-зимнего периода времени, расчеты по (7) показывают, что перемещения концов смежных плетей составят, например, при $\Delta t = 35$ °С $\tau = 24$ часа и $N = 1,5 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{1/2}$:

$$\lambda = \frac{11,8 \cdot 10^{-6} \sqrt{3,14 \cdot 86,4 \cdot 10^3 \cdot 35}}{2 \cdot 1,5} \approx 0,072 \text{ м} = 72 \text{ мм}. \quad (8)$$

Эпюра продольных сил на концевых участках рельсовых плетей бесстыкового пути при этом во времени будет изменяться по закону, определяемому следующей зависимостью:

$$F(x, \tau) = F_t \operatorname{erf} \left(\frac{Nx}{2\sqrt{\tau}} \right). \quad (9)$$

На рис. 2 представлен вид эпюр продольных сил на концевых участках рельсовых плетей за 4 временных этапа. 1-й – начало осеннего понижения температуры от 35 до 0 °С; 2-й – конец этого этапа; 3-й – продолжение работы при температуре 0 °С при предельно раскрытых зазорах; 4-й – при замене уравнительного рельса на удлиненный.

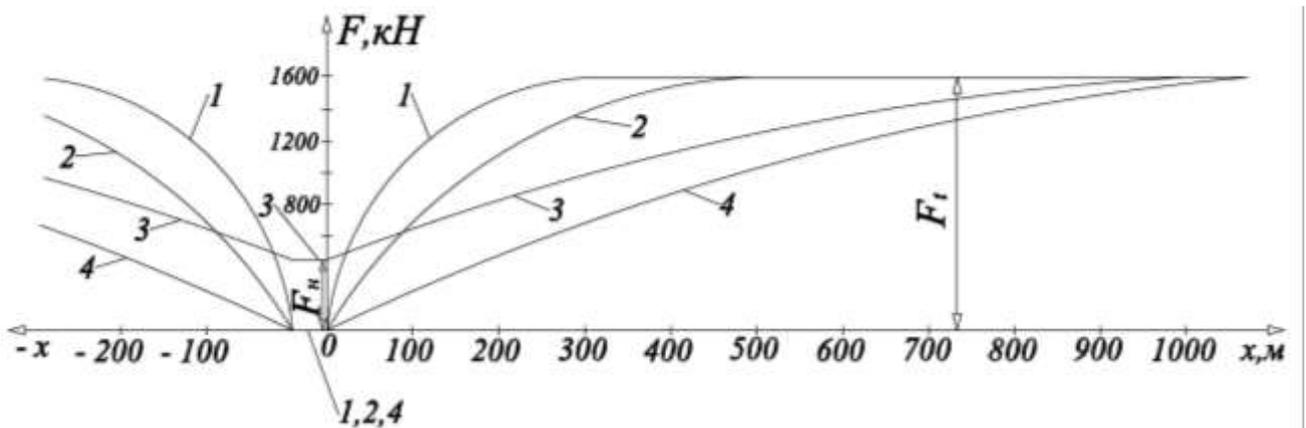


Рис. 2. Эпюра продольных сил на концевых участках бесстыкового пути (с учетом воздействия поездов и фактора времени)

Сумма зазоров в стыках уравнильного пролета (8) не может быть допущена, т.к. превышает конструктивный зазор. После того как стыковые болты начнут работать на срез и смятие, закон изменения продольной силы в уравнильных рельсах будет подчиняться уже другому закону:

$$F(x, \tau) = F_t + \frac{F_0}{2} \left\{ \left(1 + \frac{x}{l} \right) \operatorname{erf} \left[\frac{N(x+l)}{2\sqrt{\tau}} \right] - \frac{2x}{l} \operatorname{erf} \left(\frac{Nx}{2\sqrt{\tau}} \right) + \left(1 - \frac{x}{l} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{N(x-l)}{2\sqrt{\tau}} \right) \right\} + \frac{F_0}{Nl} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \left\{ \exp \left[-\frac{N^2(x+l)^2}{4\tau} \right] - 2 \exp \left(-\frac{N^2 x^2}{4\tau} \right) + \exp \left[-\frac{N^2(x-l)^2}{4\tau} \right] \right\}. \quad (10)$$

Чтобы найти итоговую конфигурацию эпюры, необходимо применить графоаналитический метод, т. е. ординаты эпюры рис. 2 следует сложить с ординатами эпюры, полученной по (10) (рис. 3).

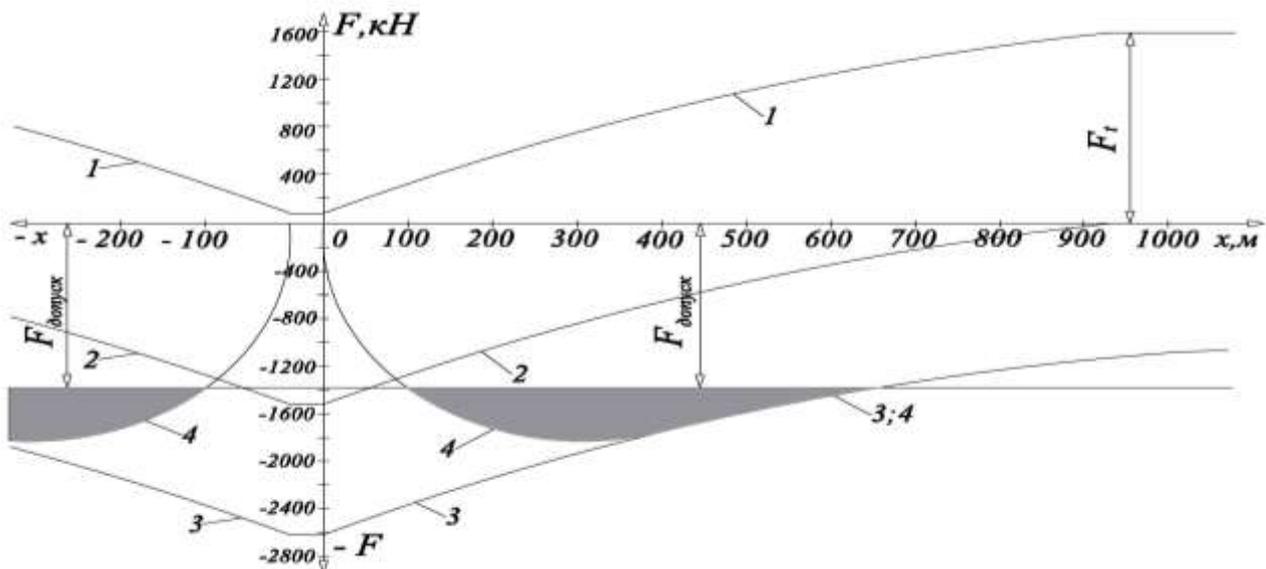


Рис. 3. Эпюра продольных сил в пределах концевых участков рельсовых плетей (с учетом воздействия поездов и фактора времени)

Необходимость применения графоаналитического метода в настоящей работе возникла из-за того, что только аналитическим методом определить изменения продольных сил практически невозможно. В этом способе использованы методы определения изменений продольных сил на концах и в середине рельсовых плетей с учетом воздействия поездов и фактора времени.

Приведенные методы основаны на одном законе, определяемом дифференциальным уравнением изменений продольных сил:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{K}{E\omega} \frac{\partial F}{\partial \tau}. \quad (11)$$

Но (9) и (10) были получены из решения (11) при различных начальных и граничных условиях.

В отличие от результатов статического расчета, дополнительно выполненного в диссертационной работе, изменения продольных сил в процессе эксплуатации происходят на значительно больших длинах рельсовых плетей и с большими отступлениями от принимаемых в расчет по формуле $F_t = \alpha E\omega \Delta t$. На концевых участках такие отступления нами были для образности названы «айсбергами», поскольку невидимая часть путейского «айсберга» представляет наибольшую опасность для движения поездов. Исключить образование «айсбергов» можно, если использовать рельсовые плети длиной до перегона, а на их концевых участках длиной до 400 м производить сезонное перезакрепление.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального определения вязких свойств балласта, сдвигаемого шпалами вдоль и поперек оси пути.

Результаты экспериментов показали, что при сотрясениях пути от проходящих поездов балласт, сдвигаемый шпалами в горизонтальной плоскости, становится вязко-пластичным или вязкоупругим. Упругость или пластичность балласта проявляются в виде начального сопротивления, которое составляет по величине деформации относительно малую величину, часто равную точности измерений. В связи с чем этой составляющей погонного сопротивления в расчетах бесстыкового пути на устойчивость можно пренебречь.

В начале 80-х годов прошлого века под руководством Е.М. Бромберга на экспериментальном кольце ВНИИЖТа на ст. Щербинка были проведены эксперименты с нагревом рельсовых плетей бесстыкового пути и пропуском

подвижного состава по искусственно нагретым рельсовым плетям. При этом проводились измерения изменяющейся стрелы рельсов напряженной неровности. Напряженная неровность возникала только во время движения поезда, ибо без воздействия поездов рост стрелы не наблюдался.

Наблюдаемый процесс роста и уменьшения стрел объясняется закономерностями, имеющими вид экспоненциальных кривых:

$$f = f_0 \exp\left(\pm \frac{AF^2\tau}{EJ\xi}\right), \quad (12)$$

где f и f_0 – соответственно текущая и начальная стрелы изгиба, м;

A – коэффициент, зависящий от конфигурации изогнутой оси рельсов.

Но в экспериментах ВНИИЖТа продольная температурная сила не была постоянной, что не позволяет в явном виде наблюдать процесс ползучести и таким образом вычислить коэффициент вязкости по (12):

$$\xi = \frac{AF^2\tau}{EJ \ln(f/f_0)}. \quad (13)$$

В (12) и (13) $F = \text{const}$, а в экспериментах $F \neq \text{const}$, что затрудняет определение вязких свойств балласта, возникающих при сотрясениях пути проходящими поездами. Однако на каждом малом участке $\Delta\tau$ графиков, где $F = F(\tau)$, можно осреднить значения температурных сил и тогда по формуле (13) вычислить значение коэффициента вязкости ξ .

По нашим расчетам, с использованием результатов опытов ВНИИЖТа и формулы (13), значения ξ оказались равными от $0,5 \cdot 10^6$ до $5 \cdot 10^6 \frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$.

Средняя величина составила $2,75 \cdot 10^6 \frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$. Эти значения ξ оказались значительно меньшими, чем полученные на реальных участках бесстыкового пути. Объясняется это тем, что интенсивность движения, а значит, и частота сотрясений пути поездами на Экспериментальном кольце значительно большие, чем на реальном участке пути.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

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

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

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

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

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

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

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

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы:

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

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

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ

1. Предложения по изменению проекта Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути / Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 15.

2. Корниенко, Е.В. Определение реологических свойств балласта, сдвигаемого железобетонными шпалами поперек оси пути / Е.В. Корниенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014.

– № 2. – С. 82–86.

3. Корниенко, Е.В. Устойчивость бесстыкового пути и вязкость балласта / Е.В. Корниенко // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 10–13.

4. Возможно ли содержание пути с 25-метровыми рельсами без температурных напряжений? / Г.В. Карпачевский, М.В. Новакович, Е.Н. Зубков, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 31–32.

5. Влияние формы и площади поперечного сечения рельса на устойчивость бесстыкового пути / Н.И. Залавский, М.В. Новакович, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 22–23.

6. Об опасностях невидимой части «айсберга» / Г.В. Карпачевский, Б.С. Бабадеев, А.В. Варданын, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 30–33.

7. Натяжители или нагреватели? / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 6. – С. 21–22.

8. Напряженные и ненапряженные неровности / Н.И. Залавский, М.В. Новакович, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 23–25.

9. Когда может быть потеряна температура закрепления? / Г.В. Карпачевский, М.В. Новакович, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 29–30.

10. Как восстанавливать плети сваркой, обеспечивая температурный режим? / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко, А.В. Варданын [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 5–6.

11. Корниенко, Е.В. Изменение напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации бесстыкового пути / Е.В. Корниенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1. – С. 100–105.

Публикации в других изданиях

12. Корниенко, Е.В. Эволюция развития методов расчета бесстыкового пути на устойчивость / Е.В. Корниенко // Транспорт-2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф., май 2011 г. В 3 ч. Ч. 2. Технические науки / РГУПС. – Ростов н/Д, 2011. – С. 227–229.

13. Расчет бесстыкового пути на устойчивость энергетическим методом с учетом фактора времени и воздействия поездов / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, В.В. Карпачевский [и др.] // Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава : тр. Междунар. науч.-практ. конф. / ДНУЖТ. – Днепропетровск, 2013. – С. 15–18.

14. Реологическая модель расчета бесстыкового пути на устойчивость / М.В. Новакович, В.В. Карпачевский, В.В. Шубитидзе, Е.В. Корниенко [и др.] // Транспорт-2013 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. В 3 ч. Ч. 3. Естественные и технические науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2013. – С. 46–48.

15. Корниенко, Е.В. Устойчивость пути и вязкость щебеночного балласта / Е.В. Корниенко // Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России : тр. Междунар. науч.-практ. конф., междунар. форума «Транспорт Юга России», посвящ. 85-летию РГУПС, 20–21 ноября 2014 г. В 3 ч. Ч. 2. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 98–100.

16. Новакович, М.В. Графоаналитическое определение напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, А.С. Хадукаев // Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России : тр. Междунар. науч.-практ. конф., междунар. форума «Транспорт Юга России», посвящ. 85-летию РГУПС, 20–21 ноября 2014 г. В 3 ч. Ч. 2. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 114–116.

17. Корниенко, Е.В. Устойчивость бесстыкового пути с учетом вязкости щебеночного балласта / Е.В. Корниенко // Транспорт-2015 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО

РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 44–46.

18. Новакович, М.В. Графоаналитический метод определения напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, А.С. Хадукаев // Транспорт-2015 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 64–66.

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

20. Корниенко, Е.В. Графоаналитический метод определения изменений продольных сил в рельсах бесстыкового пути / Е.В. Корниенко // Транспорт-2016 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Т. 4. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – С. 67–72.

21. Об особенностях работы концевого участка бесстыкового пути / Г.В. Карпачевский, М.В. Новакович, В.Н. Залавский, В.В. Шубитидзе, Е.В. Корниенко // Транспорт-2016 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Т. 4. Технические и естественные науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – С. 52–54.

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

23. Корниенко, Е.В. Изменение напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути с учетом воздействия поездов / Е.В. Корниенко // Транспорт-2017 : тр. Междунар. науч.-технич. конф., 18–19 апр. Т. 2. Технические науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – С. 269–273.

24. Обоснование «оптимальной» температуры закрепления рельсовых плетей / Г.В. Карпачевский, Е.Н. Зубков, В.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко [и др.] // Наука-2017 : тр. Всерос. нац. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО РГУПС. –

Ростов н/Д, 2017. – С. 141–144.

25. Новакович, М.В. О вяжущих материалах для щебеночного балласта / М.В. Новакович, Е.В. Корниенко, В.В. Шубитидзе // Наука-2017 : тр. Всерос. нац. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – С. 161–163.

26. О способе обнаружения опасных мест в бесстыковом пути по условиям устойчивости / В.В. Карпачевский, Е.В. Корниенко, В.В. Шубитидзе, [и др.] // Транспорт-2018 : тр. Междунар. науч.-техн. конф., 17–20 апр. Т. 2. Технические науки / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2018. – С. 266–269.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве

В работах [13, 14] – постановка задач исследований, разработка моделей и алгоритмов реализации; [5, 6, 8, 9, 16, 18, 19, 25, 26] – проведение расчетов и обобщение полученных результатов; [1, 4, 7, 10, 21, 24] – идеи технических решений.

Корниенко Елена Владимировна

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,4.
Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.
Адрес университета: 344038, Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.