

Новые подходы к моделированию устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа

Д.В. Овчинников✉

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация

✉ovchinnikov@samgups.ru

Резюме

В статье рассмотрены подходы к решению актуального на данный момент вопроса, касающегося безопасного расширения полигона бесстыкового пути с недопущением потери устойчивости против выброса. Проведено исследование существующих методов оценки запаса устойчивости бесстыкового пути начиная от самых простых, не требующих значительных вычислений, заканчивая методиками, которые реализуются с помощью специализированного программного обеспечения, обозначены их преимущества, недостатки и возможные сферы применения в зависимости от спектра решаемых задач. Представлена модель участка бесстыкового пути, выполненная в среде конечно-элементного анализа, оптимальная с точки зрения ширины диапазона задания начальных условий и получения выходных данных (результатов). Показаны способы нивелирования одного из самых существенных недостатков метода конечных элементов – уход от необходимости перестроения модели при изменении исходных данных за счет разработанных программ-макросов в среде Visual Basic for Applications, значительно упрощающих процессы формирования моделей, а также вывода и анализа результатов. В работе описывается новый подход определения параметров максимально допустимого превышения температуры рельсов относительно температуры закрепления, основанный на моделировании процесса выброса, позволяющий получать параметры устойчивости для любой конструкции пути. При этом с помощью методов теории вероятности вычисляются значения критических температур для заранее выбранных критериев оценки запаса устойчивости бесстыкового пути, статистическая взаимосвязь в которых при использовании моделирования и эмпирических методов максимальна, что помогает вычислить «условно эмпирические» величины повышения температуры рельсовой плети, допускаемые по условию устойчивости.

Ключевые слова

бесстыковой путь, устойчивость, выброс пути, моделирование, критерии потери устойчивости

Для цитирования

Овчинников Д.В. Новые подходы к моделированию устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа / Д.В. Овчинников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 112–122. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).112-122.

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.11.2023 г.; поступила после рецензирования: 04.12.2023 г.; принята к публикации: 05.12.2023 г.

New approaches to modeling the stability of a long-welded rails in the environment of finite element analysis

D.V. Ovchinnikov✉

Samara State Transport University, Samara, the Russian Federation

✉ovchinnikov@samgups.ru

Abstract

The article discusses the existing approaches to solving the currently relevant issue concerning the safe expansion of the landfill of a joint-free track with the prevention of counter ejection stability loss. The study has been conducted of the existing methods for assessing the stability margin of a seamless path, ranging from the simplest ones not requiring significant calculations, to methods implemented with the help of specialized software, their advantages, disadvantages and possible applications depending on the range of tasks to be solved. A jointless track section model made in the environment of finite element analysis is presented, optimal in terms of the range width of setting initial conditions and obtaining output data (results). The methods of leveling one of the most significant disadvantages of the finite element method are shown i.e./ avoiding the need to rebuild the model when changing the initial data due to the developed macro programs in the Visual Basic for Applications environment, greatly simplifying the process of forming models, as well as output and analysis of results. The work also shows a new approach for determining the parameters of the maximum permissible rail temperature excess, relative to the fixing temperature, based on modeling the ejection process, which allows to obtain stability parameters for any track structure. At the same time, using the methods of probability theory, the values of critical temperatures are calculated for the pre-selected criteria for assessing the stability margin of a jointless track, whose statistical relationship, when using modeling and empirical methods, is maximal, which makes it possible to obtain «conditionally empirical» values of the temperature increase of the rail lash allowed by the stability tolerance of the track.

Keywords

joint-free track, stability, track ejection, modeling, criteria for loss of stability

For citation

Ovchinnikov D.V. Novye podkhody k modelirovaniyu ustoichivosti besстыkovogo puti v srede konechno-elementnogo analiza [New approaches to modeling the stability of a long-welded rails in the environment of finite element analysis]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 112–122. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).112-122.

Article info

Received: November 10, 2023; Revised: December 4, 2023; Accepted: December 5, 2023.

Введение

Бесстыковой путь однозначно доказал эффективность своей работы в пределах полигона железных дорог Российской Федерации. Применение температурно-напряженной конструкции пути позволяет в большей степени использовать потенциал скоростной и провозной способностей современных железнодорожных линий за счет неоспоримых преимуществ бесстыкового пути перед звеньевым. В то же время эксплуатация бесстыкового пути всегда связана с образованием значительных продольных усилий и напряжений, возникающих в рельсовых плетях при изменении их температуры относительно температуры закрепления – разница между фактической температурой и температурой закрепления рельсовых плетей всего в 1°C создает дополнительные продольные усилия величиной около 2 т. Данное обстоятельство в очередной раз подтверждает необходимость соблюдения всех существующих норм и правил безопасности при производстве работ, связанных с текущим содержанием бесстыкового пути, а также обосновывает применение наиболее точных и современных подходов к установлению предельного нагрева плетей для недопущения выброса в процессе эксплуатации. В настоящий момент нет единого универсального подхода к определению максимального повышения температуры рельсовых плетей относительно их температуры закрепления для любой конструкции пути, в том числе для перспективных разработок:

– конструкция пути, обеспечивающая наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа;

– конструкция пути для выделенных пассажирских линий и с пониженной нагрузкой на ось;

– утяжеленная конструкция пути с рельсами типа Р71.

Целью данной работы является представление на основе математического моделирования и методов статистики подхода к решению данной актуальной задачи – разработка метода оценки устойчивости бесстыкового пути для любой конструкции верхнего строения пути с учетом требований, изложенных в единственном на данный момент руководящем документе ОАО «РЖД» касательно нормирования запаса устойчивости бесстыкового пути – Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (далее – Инструкция) [1].

Результатом применения данного способа являются численные параметры максимально допустимого повышения температуры для набора радиусов аналогично Инструкции при любой конфигурации верхнего строения пути (тип рельса, промежуточных рельсовых скреплений, шпал и балластного слоя). При этом полученные результаты рассчитаны на моделях, статистическая связь которых максимальна с реальными конструкциями пути, на которых проводились экспериментальные исследования устойчивости против выброса при разработке Инструкции.

Методы оценки максимальных продольных сил, возникающих при нагреве рельсовых плетей

Методы оценки запаса устойчивости можно разделить на эмпирические (экспериментальные) и теоретические. Метод прямого эксперимента является наиболее точным и надежным способом определения предельного состояния бесстыкового пути. В то же время, применение дорогостоящего тензометрического оборудования, требующего регулярную настройку и поверку, а также значительные трудовые и материальные затраты существенно ограничивают сферы применения эмпирических методов.

Теоретические методы очень разнообразны в плане подходов к решению задачи определения устойчивости бесстыкового пути, непрерывно развиваясь параллельно с математическим аппаратом, представляют собой эволюционный процесс от решения задачи потери устойчивости сжатого стержня до применения современных пакетов автоматизированного проектирования и расчета.

В данной работе кратко остановимся на каждом наиболее значимом подходе, которые применялись и применяются в настоящее время.

Энергетический метод расчета. Данный подход, который берет начало в 30-х гг. XX в., основывается на условии равновесия или равенстве нулю суммы элементарных работ (обобщенных сил), либо условия экстремума потенциальной энергии системы, из которых находят критическую сжимающую силу. Главное достоинство данного метода – простота его применения: постановка в формулу определения критической силы заранее вычисленных коэффициентов аппроксимации экспериментальных данных. Однако ни спектр задания исходных данных, ни точность получаемых результатов не позволяют успешно использовать данный подход для решения актуальных задач в области безопасности бесстыкового пути, возможен лишь приближенный подсчет критических усилий с заранее определенной формой изгиба.

К.Н. Мищенко [2] был предложен ряд уравнений изогнутой оси, решение которых позволило приблизиться к реальным формам искривления рельсошпальной решетки.

Широкое применение энергетическая модель устойчивости бесстыкового пути получила в интерпретации С.П. Першина, который, учитывая все достижения и недоработки указанных авторов, создал фундаментальный труд по определению критических сил с применением различных уравнений кривых для описания состояния пути [3].

Также в России известна энергетическая модель устойчивости В.В. Ершова [4–6] и В.И. Новаковича [7–9].

Метод дифференциальных уравнений. Наиболее полное решение вопроса устойчивости бесстыкового пути методом дифференциальных уравнений опубликовано в работах А.Я. Когана [10–12]. Решение дифференциального уравнения, опубликованное А.В. Лебедевым под руковод-

ством А.Я. Когана [13], нашло применение при работе над Инструкцией.

Метод дифференциальных уравнений. Наиболее полное решение вопроса устойчивости бесстыкового пути методом дифференциальных уравнений опубликовано в работах А.Я. Когана [10–12]. Решение дифференциального уравнения, опубликованное А.В. Лебедевым под руководством А.Я. Когана [13], нашло применение при работе над Инструкцией.

В основу положена расчетная схема (рис. 1).

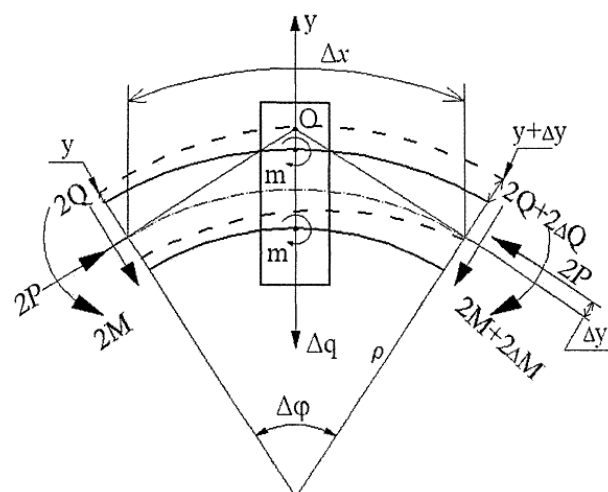


Рис. 1. Расчетная схема пути при использовании

уравнения упругой оси

Fig. 1. Calculation diagram of the track using the elastic axis equations

Поставленная задача была решена при следующих допущениях:

1. Продольные силы в обоих нитях одинаковы и постоянны $N = \text{const}$, величина продольной силы при этом равна полусумме фактически действующих в обоих рельсовых нитях сил.

2. Радиус кривизны обеих нитей один и тот же $\rho(x)$, при этом кривизна $1/\rho$ равна полусумме кривизны наружной и внутренней нитей.

3. При деформации пути шпалы перемещаются параллельно сами себе.

Профессором А.Я. Коганом получено интегро-дифференциальное уравнение, которое описывает продольно-поперечный изгиб рельсовой нити под действием продольных температурных сил:

$$EJy^{IV} + \left(P_t - q - \frac{M \cdot r}{r^2 + (y')^2} \right) \cdot y'' + B \cdot \arctg \frac{y}{b} - \frac{h}{4\eta} (y'' + y_0'') \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\eta|x-z|} [y'(z)]^2 dz = -P_t y_0'',$$

где $y = y(x)$ – поперечный сдвиг рельсовой плети; EJ – изгибная жесткость рельса; $B \cdot \arctg(y/b)$ – функция, описывающая сопротивление поперечному перемещению рельсовой нити в зависимости от величины перемещения; P_t – продольная сила в рельсе; $y_0 = y_0(x)$ – ордината начальной ненапряженной неровности рельсовой нити; B, b, q, M, r – коэффициенты, получаемые при аппроксимации экспериментальных данных.

Метод дифференциальных уравнений обладает широким набором необходимых исходных данных и, в отличие от метода энергетического, позволяет в процессе решения получать форму изгиба рельсошпальной решетки под действием продольных сжимающих сил. Однако данный подход не располагает возможностью задания отступлений от норм содержания элементов верхнего строения пути, отступлений от норм содержания в плане и профиле, а также не дает возможности исследовать сам процесс деформации плетей при нагреве, ограничиваясь лишь значением предельных параметров стрел изгиба и критических усилий.

Метод имитационного моделирования (метод конечных разностей). Профессором М.Ф. Вериго [14], по сути, было представлено свое видение решения уравнения балки на упру-

гом основании с дополнительным введением параметра, отвечающего за кинетику процесса развития деформаций, возникающих при возрастании температуры рельсовых плетей. Решение полученного уравнения осуществлено в среде конечно-разностного анализа посредством языка программирования Delphi – имитационные модели пути ИМ-1 и ИМ-2. Использование данного подхода, по мнению автора, позволяло перейти от статического нагружения бесстыкового пути к динамическому с добавлением вариативного фактора. При всех описанных достоинствах данного метода, полноценно оценить работу имитационных моделей в настоящий момент не представляется возможным ввиду присутствия в коде программы ряда критических ошибок. Отчасти по этой же причине данная методика не нашла развития и не обрела последователей вплоть до настоящего времени.

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными и интегральных уравнений в задачах прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [15–19].

Также абсолютно обоснованным выглядит применение метода конечных элементов для оценки максимально допустимого повышения температуры рельсов относительно температуры закрепления, вследствие неограниченного набора задания исходных данных, а также возможности отслеживания всего про-

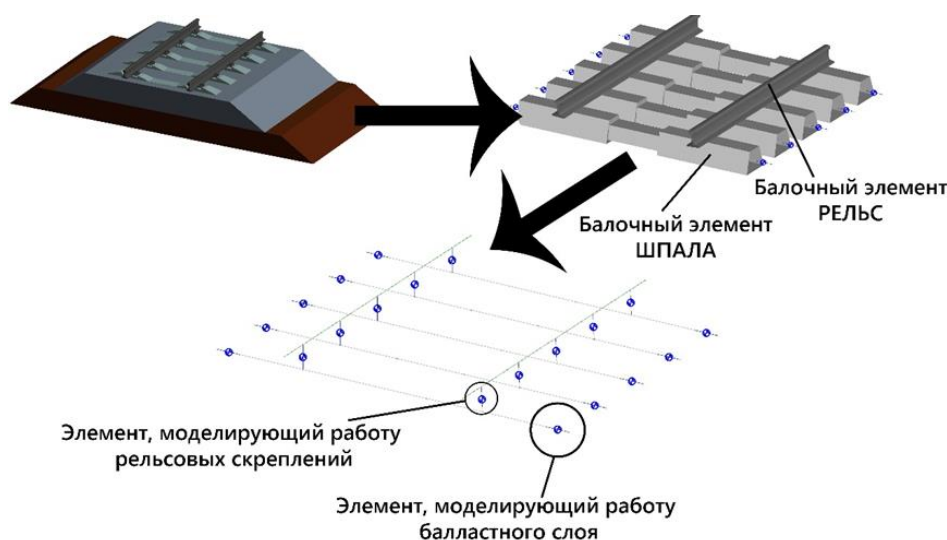


Рис. 2. Концепция создания модели для определения устойчивости бесстыкового пути
Fig. 2. The concept of creating a model to determine the stability of a seamless track

процесса нагрева рельсов вплоть до потери устойчивости.

Разработка модели по оценке устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа

Пример участка пути для решения задач устойчивости пути, состоящий из балочных элементов (рельс, шпала), а также нелинейных связей с шестью степенями свободы (промежуточные рельсовые скрепления, балластный слой), представлен на рис. 2.

Такой подход к построению модели позволяет учитывать в расчете следующие параметры:

- макрогеометрия пути (радиус);
- микрогеометрия пути (наличие локальных неровностей);
- поперечное сопротивление балластного слоя;
- сопротивление шпалы в балласте вдоль пути;
- сопротивление кручению рельса относительно рельсовых скреплений;
- продольное сопротивление сдвигу рельса относительно рельсовых скреплений;
- неравномерность нагрева плетей;
- накопление напряжений и деформаций, возникающих при нагреве плети;
- неравномерность основных типов сопротивлений, оказывающих влияние на устойчивость, причем как в виде случайной величины, подчиняющейся закону распределения, так и в формате хаотично заданной величины в ручном режиме (к примеру, ослабление балласта на нескольких шпалах подряд).

Функции сопротивления для математической модели представляют собой аппроксимацию экспериментальных данных, полученных с помощью специализированных испытаний по сдвигу шпалы в балласте, кручению рельса в узле скрепления и пр., т.е. для исследования новой конструкции верхнего строения пути, у которой имеются существенные отличия от типовой в аспекте сопротивления температурным деформациям, достаточно провести ряд несложных испытаний. Удобнее всего при моделировании использовать функции арктангенса с коэффициентами B и b , полученными экспериментальным путем $B \cdot \arctg(x/b)$.

Таким образом, применение метода конечных элементов позволяет использовать

наиболее широкий спектр задания начальных условий, ограниченных лишь необходимостью перестроения заново макро- и микрогеометрии исследуемого участка пути, что делает затруднительными и трудоемкими многовариантные расчеты. Это обстоятельство до определенного времени являлось препятствием для широкого внедрения оценки устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа. Однако в настоящее время с появлением инструментов программирования, интегрированных в программные комплексы на основе метода конечных элементов, становится возможным автоматизировать процесс создания моделей, тем самым значительно расширив область применения метода конечных элементов для решения задач устойчивости.

Несмотря на обилие существующих в настоящее время теоретических средств оценки предельных продольных температурных усилий, расчетные параметры повышения температуры рельсовой плети, допускаемые по условию устойчивости пути (обозначается как $[\Delta t_y]$), представленные в Инструкции, невозможно получить аналитическим путем только с помощью моделирования. Это говорит о том, что при разработке Инструкции были добавлены дополнительные (поправочные) коэффициенты запаса, учитывающие не только тип рельса, радиус кривой и эпюру шпал, но также и деградиационные процессы, происходящие в элементах пути при воздействии подвижного состава на путь. Точно установить порядок вычисления дополнительных коэффициентов, использованный в Инструкции, в настоящее время не представляется возможным, однако ряд значений, наиболее статистически близких к данным коэффициентам, поддается вычислению с помощью методов математической статистики по следующему алгоритму:

1. Определение многообразия исходных данных для моделирования. В данном случае рассмотрим макро- и микрогеометрию пути, где исследуемые радиусы кривых идентичны радиусам, представленным в Инструкции. В качестве микрогеометрии выступают локальные неровности различной длины и амплитуды.

2. Назначение критериев критического состояния пути (более подробно разобраны далее).

3. Вычисление массива критических температур для выбранного множества вариантов.

4. Определение корреляции между мас-

сивом предельных повышений температур из Инструкции и полученных с помощью моделирования.

5. Вычисление дополнительных коэффициентов запаса устойчивости как частное от теоретического значения повышения температуры рельсовой плети, допускаемого по условию устойчивости пути, и эмпирического для состояния пути с максимальной статистической связью.

6. Вычисление параметров $[\Delta t_y]$ исследуемой новой конструкции верхнего пути по критерию, для которого корреляционная связь максимальна относительно типовой, представленной в Инструкции.

В качестве критериев выступают:

- максимальная скорость роста стрелы изгиба при нагреве рельсовых плетей – отношение приращения стрелы изгиба к приращению температуры, $\Delta f/\Delta t$ (как правило, данный критерий идентичен образованию выброса пути, так как именно при выбросе наблюдается наибольший и резкий рост стрелы изгиба);

- поперечное перемещение на 0,2, 0,4, 0,5, 1, 2 и 3 мм;

Достаточно малые перемещения (0,2–0,5 мм) соответствуют критериям, на основе которых были получены первые величины $[\Delta t_y]$, использованные в дальнейшем при фор-

мировании Инструкции, критерии 1–3 мм соответствуют границам зон упругой работы балластного слоя в различном его состоянии, при сдвиге шпал поперек оси пути.

Следует отметить, что применение такого подхода становится возможным только посредством автоматизации процесса создания модели, запуска на расчет и последующего анализа данных с помощью макросов.

В качестве примера использования данного подхода к установлению показателей устойчивости бесстыкового пути представлено определение величин $[\Delta t_y]$ для перспективного типа верхнего строения с рельсами Р71 разработки ООО «ЕВРАЗ ТК» и Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). Общие размеры рельса представлены на рис. 3.

На рис. 4 приведен пример потери устойчивости пути, выполненный в среде конечно-элементного моделирования.

Наибольший коэффициент корреляции, близкий к единице, между показателями запаса устойчивости для рельса Р65, эпюры 1 840 и 2 000 шп./км, представленными в Инструкции и вычисленными в среде конечно-элементного анализа, наблюдается для участка пути с локальной неровностью длиной 10 м и амплитудой 8 мм для критерия максимальной

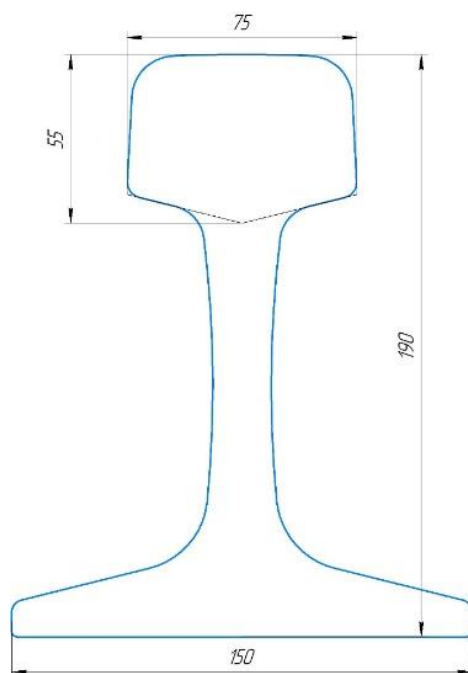


Рис. 3. Общие размеры рельса типа Р71
Fig. 3. General dimensions of rail type P71

скорости роста деформации (табл. 1). Такой высокий показатель корреляции подтверждает сильную статистическую связь между представленной математической моделью и реальной конструкцией пути, использованной при разработке Инструкции.

В этом случае график зависимости поправочного коэффициента от радиуса кривой примет вид как на рис. 5. Здесь также представлены уравнения аппроксимации данной зависимости.

Результаты графического отображения однозначно говорят о невозможности проведения аппроксимации функции поправочного коэффициента по всему диапазону радиусов ввиду резких скачков в кривых малого радиуса, параметры $[\Delta t_y]$ для которых были введены начиная с 2012 г. Связано это с изменением подхода к определению $[\Delta t_y]$:

– переход на новые критерии оценки предвыбросного состояния пути, исключающий предельные малые перемещения величиной 0,2–0,4 мм;

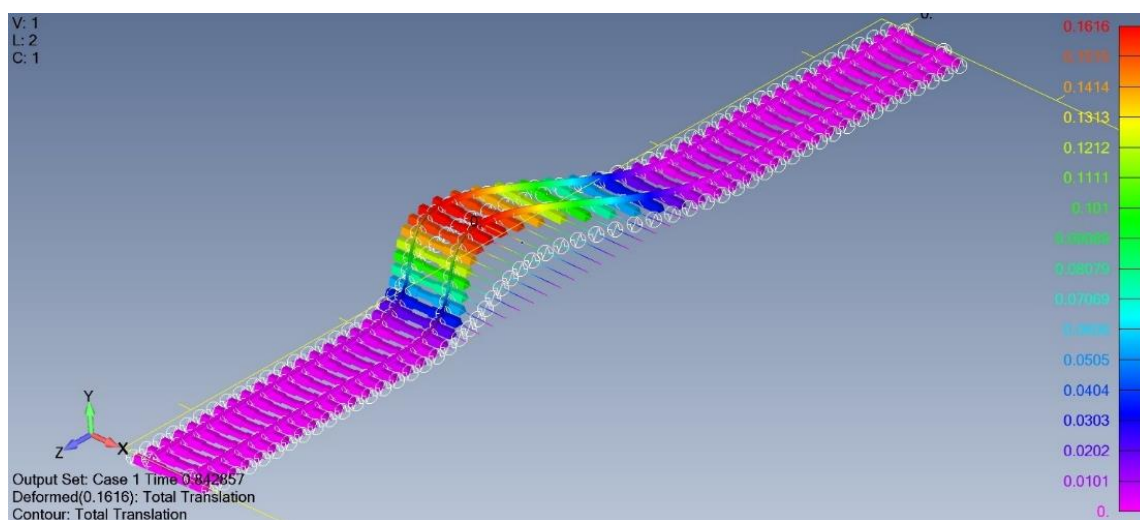


Рис. 4. Пример потери устойчивости бесстыкового пути, выполненный с помощью представленной модели
Fig. 4. An example of buckling of a seamless track, performed using the presented model

Таблица 1. Корреляция между моделированием и значениями, представленными в Инструкции
Table 1. Correlation between simulation and values presented in the Instructions

Параметры локальной неровности (длина/амплитуда), мм Parameters of local unevenness (length/amplitude), mm	Инструкция Instruction	Максимальная скорость роста Maximum growth rate	Перемещение, мм Displacement, mm					
			0,2	0,4	0,5	1	2	3
10/8	28	57	11	20	23	33	41	44
	29	60,5	13	23	27	38	48	51
	34	67	15	26	30	44	55	60
	38	75	16	29	34	50	63	68
	41	86	20	35	42	62	77	83
	43	96,5	23	42	49	73	90	96
	47	115	30	53	63	93	112	115
	49	128,5	35	63	74	108	128	128,5
	51	142,5	41	74	87	125	142	142,5
53	171	57	100	116	159	171	171	
Корреляция с Инструкцией Correlation with Instructions		0,9791	0,9324	0,9503	0,9506	0,9611	0,9724	0,9784

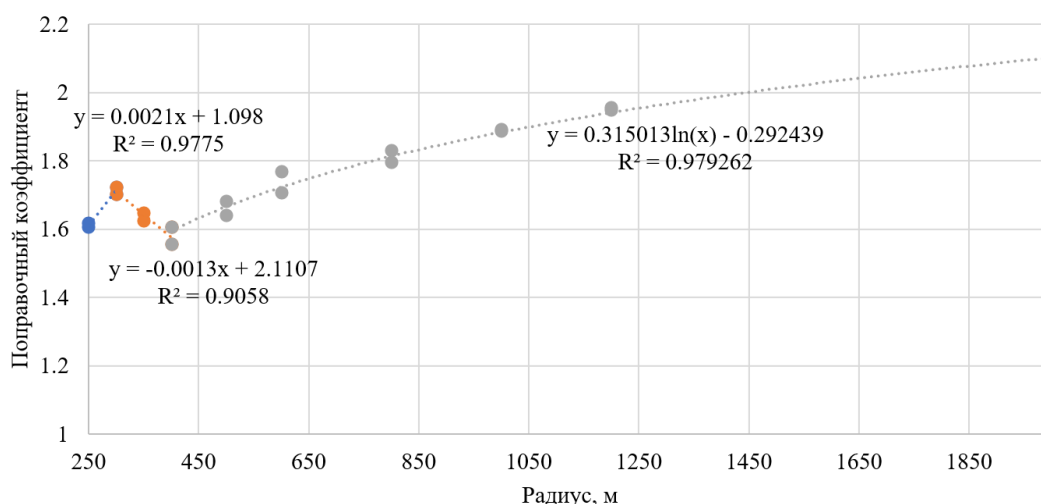


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента от радиуса кривой и уравнение аппроксимации
Fig. 5. Dependence of the correction factor on the radius of the curve and the approximation equation

– нагрев рельсовых плетей электротокотом;
 – фиксирование скорости роста стрел изгиба без доведения до потери устойчивости с последующим выводом критической температуры.

Применение одной универсальной функции перехода от аналитических данных к «условно экспериментальным» невозможно ввиду отсутствия строгой математической зависимости, описывающей функцию k для различных радиусов:

$$k = \frac{[\Delta t_y]_{\text{МКЭ}}}{[\Delta t_y]_{\text{ТУ}}}, \quad (1)$$

где $[\Delta t_y]_{\text{МКЭ}}$ – максимальное допустимое превышение температуры рельсов относительно температуры закрепления, полученное с помощью моделирования при условии наивысшей корреляции модели и эмпирических данных; $[\Delta t_y]_{\text{ТУ}}$ – максимально допустимое превышение температуры рельсов относительно температуры закрепления, представленное в Инструкции для верхнего строения пути с наивысшей статистической связью с результатами моделирования; k – переходной (поправочный) коэффициент для конкретного типа верхнего строения пути.

Для определения допустимого повышения температуры рельсов по сравнению с температурой закрепления при использовании типовой конструкции верхнего строения пути с рельсами Р71 целесообразно выполнить цепочку следующих решений:

1. Разработка конечно-элементной модели типовой конструкции пути с утяжеленными

рельсами типа Р71 при наличии отступления от норм содержания в плане в виде неровности длиной 10 м и амплитудой 8 мм при эюре 1 840 и 2 000 шп./км.

2. Расчет величин $[\Delta t_y]$ в среде конечно-элементного анализа при использовании рельсов Р71 для пути с неровностью длиной 10 м и амплитудой 8 мм при эюре шпал 1 840 и 2 000 шп./км.

3. Определение переходного (поправочного) коэффициента k по (1).

4. Определение «условно эмпирических» значений $[\Delta t_y]$ при использовании рельсов Р71 в виде частного аналитического значения и поправочного коэффициента для эюры шпал 1 840 и 2 000 шп./км.

Величины $[\Delta t_y]$, полученные с помощью математического моделирования и поправочного коэффициента, представлены в табл. 2.

Заключение

1. Показана актуальность проблемы определения запаса устойчивости пути как одного из важнейших критериев обеспечения безопасности движения поездов, а также расширения полигона наиболее эффективной температурно-напряженной конструкции верхнего строения пути.

2. Рассмотрены и проанализированы существующие подходы к определению запаса устойчивости бесстыкового пути, обозначены их основные достоинства и недостатки, а также возможные сферы применения той или иной методики в зависимости от поставленных задач.

Таблица 2. Повышение температуры рельсовой плети, допускаемое по условию устойчивости пути с рельсами типа Р71**Table 2.** An increase in the temperature of the rail line, allowed under the condition of stability of the track with type Р71 rails

Радиус кривой, м Curve radius, m	Рельсы Р71, эпора 1 840 Rails Р71, diagram 1 840	Рельсы Р71, эпора 2 000 Rails Р71, diagram 2 000
250	26,0	24,2
300	27,0	26,8
350	32,0	31,8
400	36,0	35,4
500	39,0	38,5
600	41,0	40,3
800	44,6	44,1
1 200	45,5	45,5
2 000	47,5	47,6
Прямая Straight line	50,5	49,8

3. Существующие методы не позволяют в полной мере перейти от эмпирических исследований к теоретическим при определении запаса устойчивости бесстыкового пути для перспективных конструкций, как утяжеленного типа, так и верхнего строения пути для пассажирских перевозок.

4. Разработана и представлена конечно-элементная модель бесстыкового пути, позволяющая определять повышение температуры рельсовой плети, допускаемое по условию устойчивости пути, при неограниченном наборе исходных данных.

5. Посредством специализированных программ-макросов автоматизирован процесс создания моделей в среде конечно-элементного анализа, запуска на расчет и вывода результатов, благодаря чему проведен многовариантный расчет нагрева рельсовых плетей криволинейных участков с различными радиусами, а также начальной неровностью.

6. Предложены критерии определения запаса устойчивости бесстыкового пути с

дальнейшим определением варианта с наибольшей корреляцией результатов математического моделирования и данных, полученных опытных путем.

7. Получены поправочные коэффициенты, с помощью которых совместно с математическим моделированием возможно определение параметров $[\Delta t_r]$ для любой конфигурации верхнего строения пути, упрощающее и снижающее стоимость проведения трудоемких эмпирических исследований.

8. С помощью представленной модели бесстыкового пути продемонстрирован новый подход к определению запаса устойчивости бесстыкового пути: определены величины максимального повышения температуры рельсовой плети для верхнего строения пути с рельсами типа Р71 (перспективная разработка ООО «ЕВРАЗ ТК» и СамГУПС).

9. Использование рельса Р71 не является препятствием для применения бесстыкового пути в регионах с большими температурными амплитудами.

Список литературы

1. Об утверждении и введении в действие инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р (ред. 10.04.2023). Доступ из справ.-правовой системы АС-ПИЖТ в локал. сети.
2. Мищенко К.Н. Бесстыковой рельсовый путь. М. : Трансжелдориздат, 1950. 88 с.
3. Першин С.П. Метод расчета устойчивости бесстыкового пути. // Труды МИИТ : сб. ст. М., 1962. Вып. 147 : путь и путевое хозяйство. С. 28–97.
4. Ершов В.В. Аналитический метод определения устойчивости бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2006. № 6. С. 10–12.
5. Ершов В.В. Устойчивость бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 3. С. 13–15.
6. Ершов В.В., Корся В.Б., Шувалова О.М. Выбор расчетного сечения при определении поперечной устойчивости

бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 6. С. 27–28.

7. Новакович В.И., Карпачевский Г.В., Курилина И.А. Изменения в рельсошпальной решетке при воздействии поездов // Путь и путевое хозяйство. 2004. № 5. С. 25–28.

8. Новакович В.И. Продольные силы при вывеске рельсошпальной решетки бесстыкового пути // Вестник ВНИИЖТ. 1967. № 6. С. 49–52.

9. Новакович В.И. О ползучести бесстыкового пути в поперечном направлении под действием продольных сил // Вестник ВНИИЖТ. 1976. № 5. С. 39–42.

10. Коган А.Я., Грищенко В.А., Косенюк В.К. Устойчивость бесстыкового пути при температурном воздействии // Обеспечение надежности и эффективности бесстыкового пути в сложных условиях эксплуатации : межвуз. сб. науч. тр.. Новосибирск, 1991. С. 5–15.

11. Коган А.Я., Грищенко В.А. Нелинейная устойчивость бесстыкового пути в прямых участках при наихудшей форме начальной ненапряженной неровности // Вестник ВНИИЖТ. 1992. № 3. С. 40–45.

12. Коган А.Я. Продольные силы в железнодорожном пути. М. : Транспорт, 1967. 168 с.

13. Коган А.Я., Лебедев А.В. Устойчивость бесстыкового пути при различных конструкциях скреплений и условиях их эксплуатации // Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 2. С. 3–9.

14. Вериго М.Ф. Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути. М. : Интекст, 2000. 184 с.

15. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов / А.Ю. Абдурашитов, Д.В. Овчинников, В.П. Сычев и др. // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 62–73.

16. Овчинников Д.В. 3D-моделирование напряженно-деформированного состояния элементов пути // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 50–53.

17. Ovchinnikov D.V., Gall'yamov D.I. Evaluation of Rail Overturning under the Influence of Lateral Forces by Mathematical Modeling // Transportation Research Procedia : proceedings of the XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. Irkutsk, 2022. P. 717–725.

18. Ковенькин Д.А., Сулемина А.Э., Покацкий В.А. Оценка зоны влияния бокового воздействия подвижного состава на рельсошпальную решетку // Проблемы путевого хозяйства Восточной Сибири : сб. науч. тр. Иркутск, 2004. Т. 2. С. 71–74.

19. Ковенькин Д.А. Исследование воздействия суммарных боковых сил на элементы верхнего строения пути при вписывании экипажа в кривые участки пути // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации российских железных дорог : материалы всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2007. Т. 1. С. 23–26.

References

1. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.12.2016 № 2544r «Ob utverzhdenii i vvedenii v deistvie instruksii po ustroistvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti» (red. 10.04.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated December 14, 2016 No 2544r «On the approval and implementation of the instructions for the installation, installation, maintenance and repair of a jointless track» (ed. April 10, 2023)].

2. Mishchenko K.N. Besstykovoi rel'sovyi put' [Joint-less rail track]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1950. 88 p.

3. Pershin S.P. Metod rascheta ustoichivosti besstykovogo puti [Method of calculating the stability of a joint-less track]. *Sbornik statei «Trudy MIIT». Vyp. 147: put' i putevoe khozyaistvo* [Proceedings of the Moscow Institute of Railway Transport. Iss. 147. Track and Track Facilities]. Moscow, 1962, pp. 28–97.

4. Ershov V.V. Analiticheskiy metod opredeleniya ustoichivosti besstykovogo puti [Analytical method for determining the stability of a jointless track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2006, no. 6, pp. 10–12.

5. Ershov V.V. Ustoichivost' besstykovogo puti pri otstupleniyakh ot norm soderzhaniya [Stability of a jointless track with deviations from the standards of maintenance]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2008, no. 3, pp. 13–15.

6. Ershov V.V., Korsya V.B., Shuvalova O.M. Vybora raschetnogo secheniya pri opredelenii poperechnoi ustoichivosti besstykovogo puti [The choice of the design cross-section when determining the transverse stability of a jointless track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2010, no. 6, pp. 27–28.

7. Novakovich V.I., Karpachevskii G.V., Kurilina I.A. Izmeneniya v rel'soshpal'noi reshetke pri vozdeistvii poezdov [Changes in the rail-sleeper grid under the influence of trains]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2004, no. 5, pp. 25–28.

8. Novakovich V.I. Prodol'nye sily pri vyveske rel'soshpal'noi reshetki besstykovogo puti [Longitudinal forces at the signboard of the rail-sleeper grating of the jointless track]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Union Scientific and Research Institute of Railway Transport], 1967, no. 6, pp. 49–52.

9. Novakovich V.I. O polzuchesti besstykovogo puti v poperechnom napravlenii pod deistviem prodol'nykh sil [On the creep of a jointless track in the transverse direction under the action of longitudinal forces]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Union Scientific and Research Institute of Railway Transport], 1976, no. 5, pp. 39–42.

10. Kogan A.Ya., Grishchenko V.A., Kosenyuk V.K. Ustoichivost' besstykovogo puti pri temperaturnom vozdeistvii [Stability of a joint-less track under temperature influence]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Obespechenie nadezhnosti i effektivnosti besstykovogo puti v slozhnykh usloviyakh ekspluatatsii»* [Interuniversity proceedings «Ensuring reliability and efficiency of a joint-less track in difficult operating conditions»]. Novosibirsk, 1991, pp. 5–15.

11. Kogan A.Ya., Grishchenko V.A. Nelineinaya ustoichivost' besstykovogo puti v pryamykh uchastkakh pri naikhudshei forme nachal'noi nenapryazhennoi nerovnosti [Nonlinear stability of a jointless track in straight sections with the worst form of initial unstressed unevenness]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Russian Scientific and Research Institute of Railway

Transport], 1992, no. 3, pp. 40–45.

12. Kogan A.Ya. Prodol'nye sily v zhelezodorozhnom puti [Longitudinal forces in the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1967. 168 p.

13. Kogan A.Ya., Lebedev A.V. Ustoichivost' besstykovogo puti pri razlichnykh konstruktivnykh skrepleni i usloviyakh ikh ekspluatatsii [Stability of the joint-less track under various structures with fasteners and their operating conditions]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Russian Scientific and Research Institute of Railway Transport], 2007, no. 2, pp. 3–9.

14. Verigo M.F. Novye metody v ustanovlenii norm ustroystva i sodержaniya besstykovogo puti [New methods in the establishment of standards for the device and maintenance of a seamless track]. Moscow: Intekst Publ., 2000. 184 p.

15. Abdurashitov A.Yu., Ovchinnikov D.V., Sychev V.P., Sycheva A.V. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rel'sov pri razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii na osnove modelirovaniya metodom konechnykh elementov [Evaluation of the stress-strain state of rails under various operating conditions based on modeling of finite element methods]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2023, no. 1 (53), pp. 62–73.

16. Ovchinnikov D.V. 3D-modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov puti [3D-modeling of the stress-strain state of track elements], *Zhelezodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no. 3, pp. 50–53.

17. Ovchinnikov D.V., Gall'yamov D.I. Evaluation of Rail Overturning under the Influence of Lateral Forces by Mathematical Modeling // *Transportation Research Procedia : Proceedings of the XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability*. Irkutsk, 2022, pp. 717–725.

18. Koven'kin D.A., Sulemina A.E., Pokatskii V.A. Otsenka zony vliyaniya bokovogo vozdeystviya podvizhnogo sostava na rel'soshpal'nyu reshetku [Assessment of the zone of influence of lateral impact of rolling stock on the rail-sleeper grid]. *Sbornik nauchnykh trudov «Problemy putevogo khozyaistva Vostochnoi Sibiri»* [Proceedings «Problems of the track facilities of Eastern Siberia»]. Irkutsk, 2004, vol. 2, pp. 71–74.

19. Koven'kin D.A. Issledovanie vozdeystviya summarnykh bokovykh sil na elementy verkhnego stroeniya puti pri vpisyvanii ekipazha v krivye uchastki puti [Investigation of the impact of total lateral forces on the elements of the upper structure of the track when fitting equipment into curved sections of the track]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy izyskani, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii rossiiskikh zheleznykh dorog»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference «Problems and prospects of research, design, construction and operation of Russian railways»]. Irkutsk, 2007, vol. 1, pp. 23–26.

Информация об авторах

Овчинников Дмитрий Владиславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Управления научных работ, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: ovchinnikov@samgups.ru.

Information about the authors

Dmitrii V. Ovchinnikov, Ph.D. in Engineering Science, Senior Researcher of the Department of Scientific Works, Samara State Transport University, Samara; e-mail: ovchinnikov@samgups.ru.