

А.А. Данилов, Д.Н. Насников

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Российская Федерация

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ПУТИ

Аннотация: Обеспечение устойчивости – одна из основных проблем устройства и содержания бесстыкового пути. Недостаточная устойчивость – это прямая угроза безопасности движения поездов. В бесстыковом пути возникают продольные силы по мере изменения температуры относительно температуры закрепления. При уменьшении температуры возникают растягивающие напряжения, которые могут привести к разрыву рельса, а при увеличении температуры возникают сжимающие напряжения, которые могут привести к выбросу пути.

Данная работа посвящена исследованию устойчивости пути и мер по ее повышению. Задача исследования устойчивости бесстыкового пути сводится к определению допускаемой по устойчивости пути повышения температуры по сравнению с температурой закрепления рельсовых плетей $[\Delta t_y]$. В статье рассмотрена методика расчета С.П. Першина, с помощью этой методики произведен расчет стандартной конструкции пути. В ходе исследования моделировались части верхнего строения пути в программном комплексе NanoCad, так же с использованием программы Microsoft Excel произведена аппроксимация графика.

На основании зависимости устойчивости пути от допускаемого повышения температуры по условию устойчивости, предложена методика разработки новой шпалы с повышенной устойчивостью поперечным перемещениям. Повышение устойчивости против поперечного перемещения заключается во включении в работу балласта в шпальных ящиках. Новая конструкция пути была смоделирована на базе шпалы ШЗ-Д и проанализирована. По произведенному анализу выявлено что новая конструкция более устойчива чем стандартная.

Ключевые слова: устойчивость пути, температура, напряжения, железнодорожный путь, шпалы, балласт

A.A. Danilov, D.N. Nasnikov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

MEASURES TO INCREASE ROAD STABILITY

Abstract: Ensuring stability is one of the main problems of the device and maintenance of a seamless path. Insufficient stability is a direct threat to train safety. Longitudinal forces arise in the jointless path as the temperature changes relative to the fixing temperature. With a decrease in temperature, tensile stresses arise that can lead to a break in the rail, and with an increase in temperature, compressive stresses arise that can lead to the ejection of the track.

This work is devoted to the study of the stability of the path and measures to improve it. The task of studying the stability of a jointless track is to determine the temperature increase allowed by the stability of the path in comparison with the temperature of fixing rail lashes $[\Delta t_y]$. The article discusses the calculation method of S.P. Pershin, with the help of this technique, the calculation of the standard design of the path is carried out. During the study, parts of the upper structure of the path were modeled in the NanoCAD software package, and the graph was approximated using Microsoft Excel.

Based on the dependence of the stability of the path on the permissible temperature increase under the stability condition, a method for developing a new sleeper with increased resistance to transverse displacements is proposed. The increase in stability against transverse displacement consists in the inclusion of ballast in the sleeper boxes. The new track design was modeled on the basis of the Sh3-D sleeper and analyzed. According to the analysis, it was revealed that the new design is more stable than the standard one.

Key words: track stability, temperature, stresses, railway track, sleepers, ballast.

Введение

Одним из перспективных направлений железнодорожного транспорта является введение тяжеловесного движения поездов и движение высокоскоростного подвижного состава. Одним из наиболее важных вопросов является обеспечение стабильности рельсовой колеи, то есть поддержание устойчивости рельсошпальной решетки в балластной призме. На железных дорогах России эксплуатируется бесстыковая температурно-напряженная

конструкция пути. Недостаток такого пути заключается в появлении напряжений по мере изменения температуры по сравнению с температурой закрепления. Что в свою затрудняет эксплуатацию железнодорожного пути, и создает вероятность неисправностей пути, такие как выброс и угол в плане.

Методика расчета пути по условию устойчивости

Задача исследования устойчивости бесстыкового пути сводится к определению допускаемой по устойчивости пути повышения температуры по сравнению с температурой закрепления рельсовых плетей $[\Delta t_y]$. Допускаемое повышение температуры $[\Delta t_y]$ вычисляется по формуле [1] (1)

$$[\Delta t_y] = \frac{|P_{t-y}|}{2\alpha EF}, \quad (1)$$

где $|P_{t-y}|$ – допускаемое по устойчивости значение горизонтальной продольной температурной силы в бесстыковом пути;

α – коэффициент линейного расширения рельсовой стали;

E – модуль упругости рельсовой стали;

F – площадь поперечного сечения рельса;

2 – с учетом 2-х рельсовых нитей.

Из формулы (1) видно, что допускаемое повышение температуры зависит от допускаемой продольной силы, возникающей в пути.

Допускаемое по устойчивости значение горизонтальной продольной температурной силы в бесстыковом пути вычисляется по формуле (2)

$$|P_{t-y}| = \frac{P_k}{k_y}, \quad (2)$$

где P_k – критическая сила, при которой путь теряет устойчивость, кН;

k_y – допускаемый коэффициент устойчивости (коэффициент безопасности); $k_y \approx 1,5 - 2,0$ (в зависимости от плана пути).

Критическую силу P_k можно определить по формуле (3) С.П. Першина [2], полученной на основании аппроксимации результатов массовых расчетов устойчивости колеи.

$$P_k = \frac{A}{i^\mu} k_1 k_2 k_3, \quad (3)$$

где A и μ – параметры, зависящие от типа рельсов и плана линии, значения указаны в таблице (1);

i – средний уклон начальной неровности принимается 2–3‰;

k_1 – коэффициент, зависящий от сопротивления балласта поперечному сдвигу шпалы, принимается в зависимости от погонного сопротивления шпалы в балласте по рисунку (1);

k_2 – коэффициент, зависящий от эпюры шпал принимается 0,9 при эпюре шпал 1600 шт/км; 1,0 при эпюре шпал 1800 шт/км; 1,08 при эпюре шпал 2000 шт/км;

k_3 – коэффициент, учитывающий влияние сопротивлению повороту рельсов по подкладкам и шпал по рисунку 2.

Таблица 1 – Параметры A и μ

Тип рельса	Параметр	Прямая	Радиус кривой, м			
			1000	800	600	400
P75	A	6500	4280	3760	3210	2560
	μ	0,560	0385	0,350	0,280	0,175
P65	A	5830	3830	3610	3150	2480
	μ	0,585	0,410	0,385	0,335	0,232
P50	A	5170	3600	3320	2950	2380
	μ	0,600	0,450	0,410	0,365	0,300

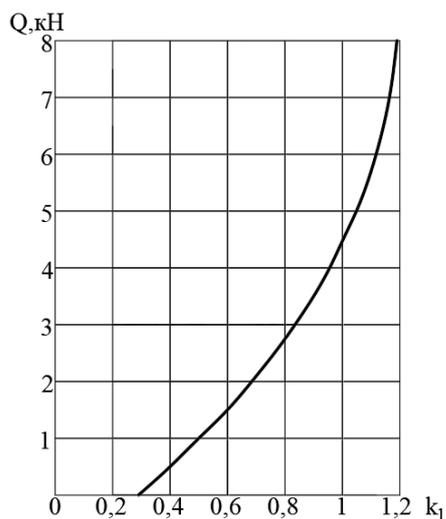


Рис. 1. Коэффициент k_1 , зависящий от сопротивления балласта поперечному сдвигу шпалы Q

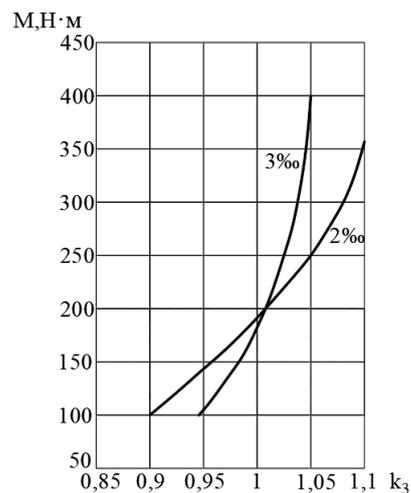


Рис. 2. Коэффициент k_3 , зависящий от затяжки гаек клеммных болтов

В настоящее время используют нормативные значения Δt_y , полученные в результате экспериментов на специальном стенде ВНИИЖТа [3]. Было сделано более 300 опытов по определению устойчивости плетей путем нагрева их (электрическим током) при разных конструкциях и состояниях пути. Значения по допускаемым повышениям температуры $[\Delta t_y]$ для уложенных вновь или переложённых повторно с переборкой рельсошпальной решетки рельсовых плетей при различных конструкциях верхнего строения пути приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Допускаемые повышения температур рельсовых плетей $[\Delta t_y]$, по условию устойчивости пути (со щебнем из скальных пород), °С

Тип рельсов	Эпюра шпал	Прямой участок	Радиусы кривых участков, м									
			2000	1200	1000	800	600	500	400	350	300	250
Р75	2000	58	53	51	49	47	45	42	39	36	–	–
	1840	54	50	47	46	44	41	39	36	33	–	–
Р65	2000	58	53	51	49	47	43	41	38	34	29	28
	1840	54	50	47	46	44	41	39	36	32	–	–
Р50	2000	63	58	55	54	51	48	46	43	39	–	–
	1840	57	52	49	48	46	43	41	38	35	–	–

Расчет пути типовой конструкции по условию устойчивости

Для расчета возьмем стандартную конструкцию верхнего строения пути – рельсы Р65, крепления ЖБР-65, железобетонные шпалы типа ШЗ-Д, щебёночный балласт с плотностью $\rho=2400 \text{ кг/м}^3$, балластное плечо равное 0,45м. Расчеты проводятся для прямого участка с эпюрой шпал 2000 шт/км.

Первым шагом нам нужно определить критическую силу P_k , при которой путь теряет устойчивость. Для этого воспользуемся формулой (2) С.П. Першина.

В формуле (2) участвует коэффициент k_1 который определяется по рисунку (1) в зависимости от сопротивления шпал поперечному перемещению. Что бы вычислить сопротивление шпал поперечному перемещению воспользуемся формулой (3) [4]

$$Q = aW + b\rho G_e + c\rho G_3 \quad (3)$$

где a , b и c – постоянные коэффициенты (на железнодорожном пути с железобетонными шпалами и щебеночным балластом: $a = 0,75$, $b = 29$ и $c = 1,8$);

W – погонный вес рельсошпальной решетки;

ρ – плотность балласта;

G_e – объем балласта, который сопротивляется ее смещению за торцом шпалы;

G_3 – объем балласта, который сопротивляется ее по боковым поверхностям шпал.

Рассчитаем, погонный вес рельсошпальной решетки W по формуле (4)

$$W = \frac{2 \cdot L \cdot m_{р65} + n_{шпал} \cdot m_{шпалы} + n_{скр} \cdot m_{скр}}{L} \quad (4)$$

где L – длина участка (м);

$m_{р65}$ – масса 1 м рельса (кг);

$n_{шпал}$ – количество шпал;

$m_{шпалы}$ – масса одной шпалы (кг);

$n_{скр}$ – количество креплений ;

$m_{скр}$ – масса креплений (кг);

Погонный вес рельсошпальной решетки:

$$W = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 65 + 2000 \cdot 270 + 4000 \cdot 11}{1000} = 714 \text{ кг.}$$

Для определения объема балласта, который сопротивляется ее смещению за торцом и по бокам шпал, была построена в масштабе точная модель шпал в балласте в программном комплексе NanoCAD. Модели изображены на рисунках 3 и 4.

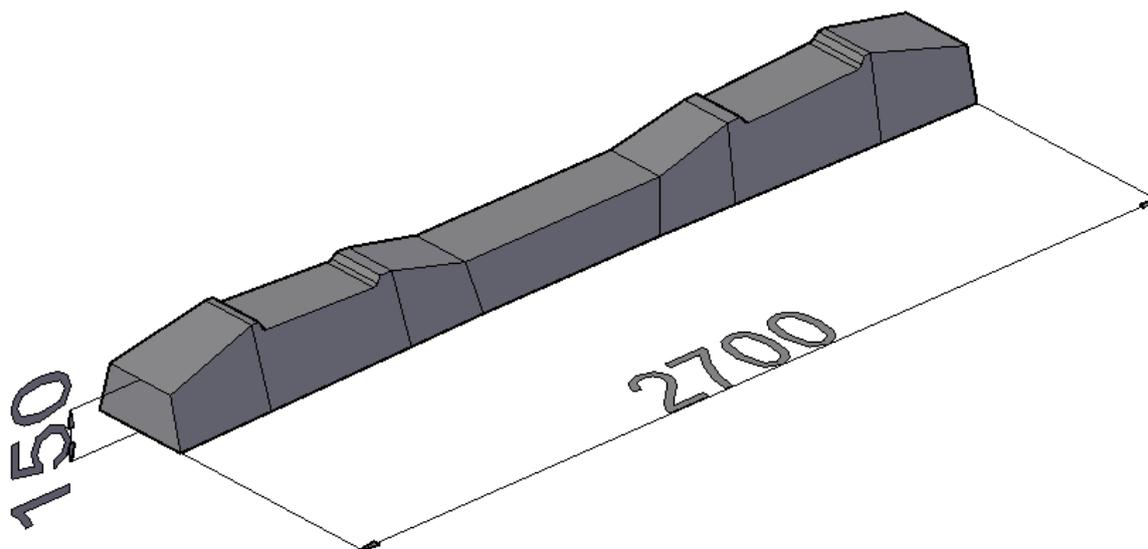


Рис. 3. Железобетонная шпала ШЗ-Д

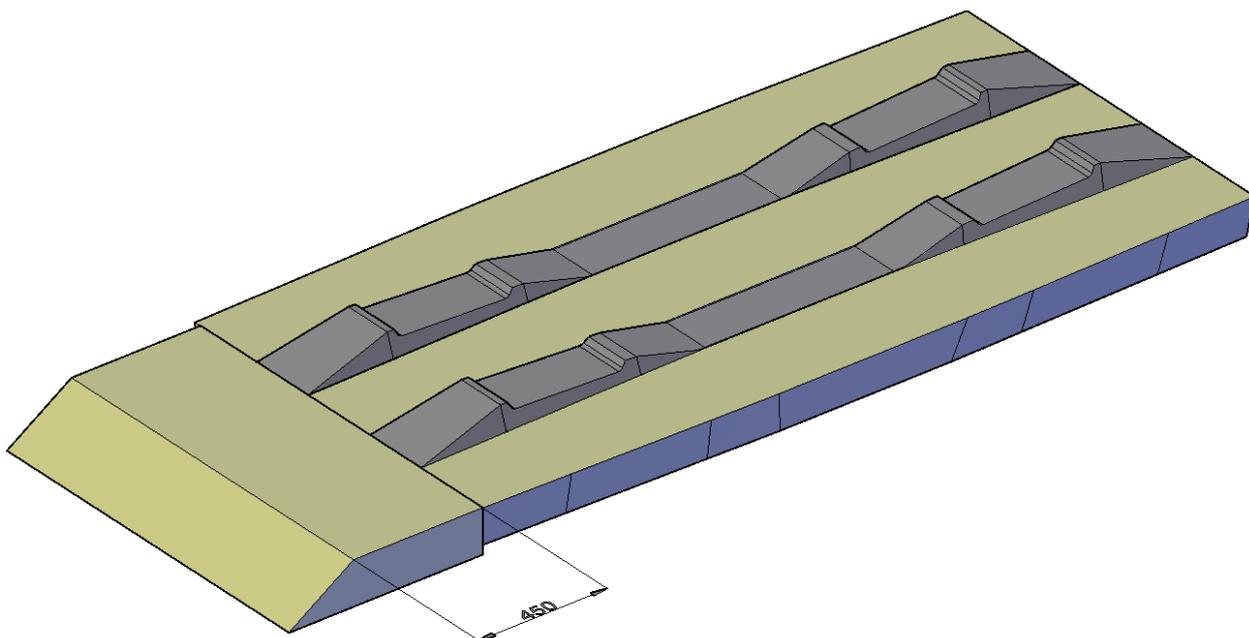


Рис. 4. Железобетонные шпалы в балласте

Так же были построены призмы балласта по боковым граням и призма волочения торцом шпалы, и посчитан их объем, ход построения и вычисления изображены на рисунках 5, 6 и 7.

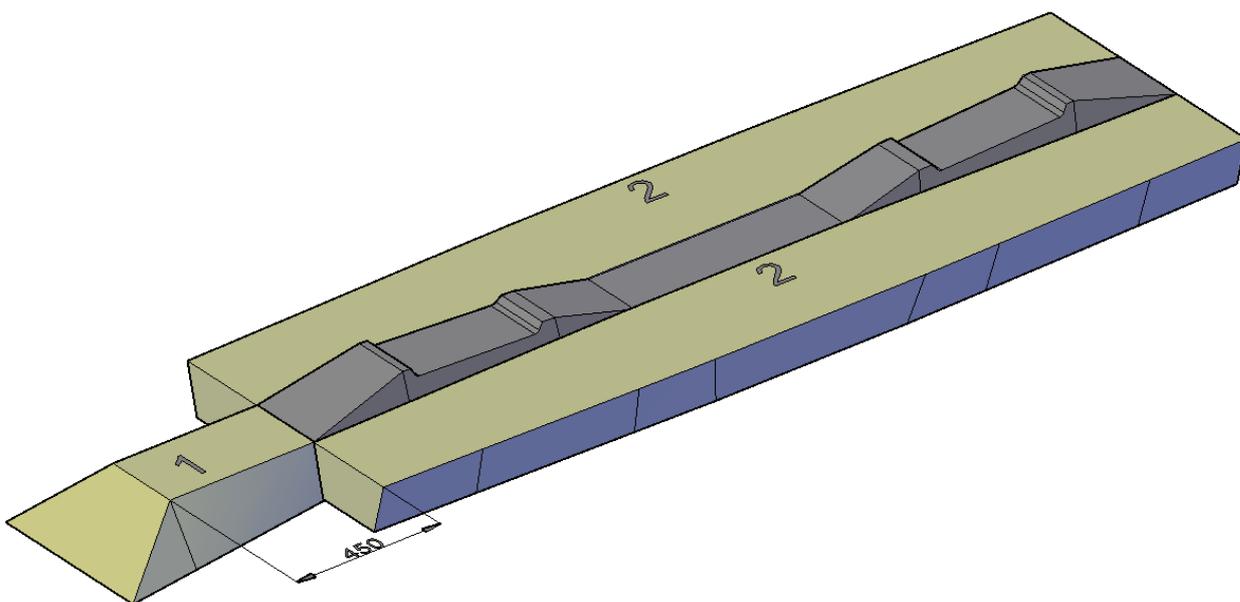
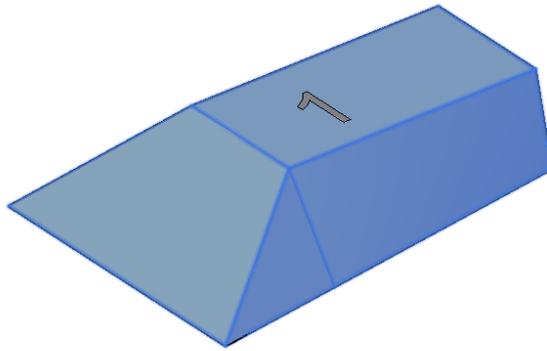
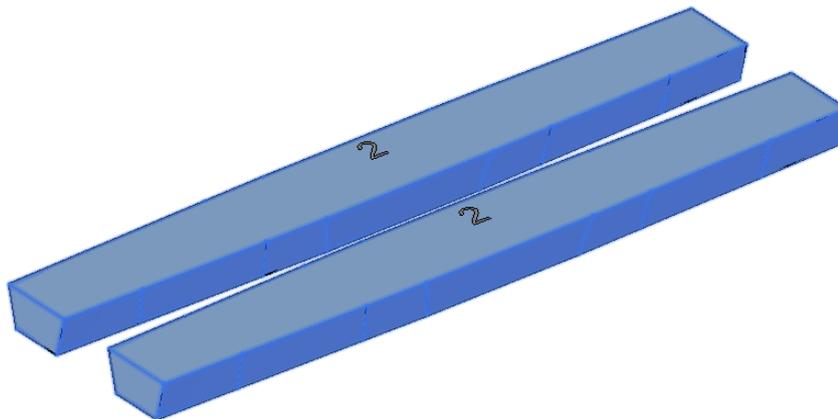


Рис. 5. Призмы балласта (1 – за торцом шпалы, 2 – по боковым поверхностям)



ТЕЛА	
Масса:	26444999,9998
Объем:	26444999,9998
Ограничивающая рамка:	X: 2268,5987 -- 2943,5987 Y: -937,5000 -- -787,5000 Z: -5772,8574 -- -5272,8574
Центр масс:	X: 2636,9995 Y: -874,4966 Z: -5522,8574
Моменты инерции:	X: 8,2714E+14 Y: 9,9155E+14 Z: 2,0495E+14
Ц/б.ж. мом. инерции:	XY: 6,0939E+13 YZ: -1,2772E+14 ZX: 3,8514E+14
Радиусы инерции:	X: 5592,6409 Y: 6123,2879 Z: 2783,8914
Главные моменты и направления X-Y-Z относительно центра масс:	

Рис. 6. Модель призмы волочения за торцом шпалы и ее объем



ТЕЛА	
Масса:	208521067,1064
Объем:	208521067,1064
Ограничивающая рамка:	X: 2943,5987 -- 5643,5987 Y: -932,5000 -- -787,5000 Z: -8022,3338 -- -7204,3338
Центр масс:	X: 4293,5986 Y: -856,7565 Z: -7613,3339
Моменты инерции:	X: 1,2254E+16 Y: 1,6065E+16 Z: 4117608725933648
Ц/б.ж. мом. инерции:	XY: 7,6706E+14 YZ: -1,3601E+15 ZX: 6816261729784351
Радиусы инерции:	X: 7665,9769 Y: 8777,3791 Z: 4443,7290
Главные моменты и направления X-Y-Z относительно центра масс:	

Рис. 7. Модель призмы по бокам шпалы и ее объем

После расчета получили следующие данные: объем балласта, который сопротивляется ее смещению за торцом шпалы $G_e = 26444999,99 \text{ мм}^3$; объем балласта, который сопротивляется ее по боковым поверхностям шпал $G_3 = 208521067,1 \text{ мм}^3$. Переведем объемы в м^3 и получим $G_e = 0,0264 \text{ м}^3$, $G_3 = 0,208 \text{ м}^3$.

Подставляем все данные в формулу

$$Q = 0,75 \cdot 714 + 29 \cdot 2400 \cdot 0,0264 + 1,8 \cdot 2400 \cdot 0,208 = 3,271 \text{ кН.}$$

Для удобства расчета коэффициента k_1 , выполним аппроксимацию графика зависимости k_1 от Q с помощью программного комплекса Microsoft Excel. Было получено полиномиальное уравнение (5) с величиной доверительности аппроксимации $R^2=1$.

$$k_1 = 0,0005x^3 + 0,0187x^2 + 0,2431x + 0,2745. \quad (5)$$

На рисунке (8) представлен график аппроксимации.

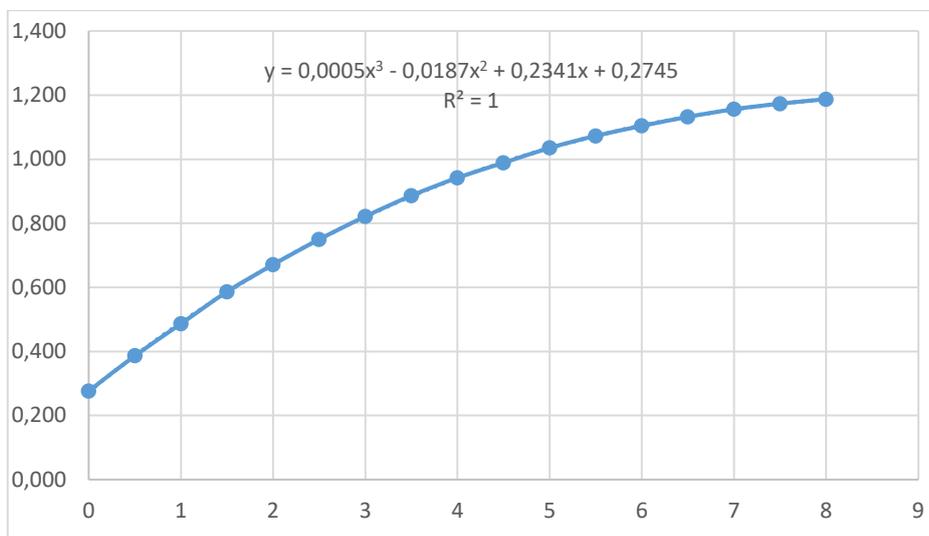


Рис. 8. График зависимости k_1 от Q

Далее вычисляем k_1

$$k_1 = 0,0005 \cdot 3,271^3 - 0,0187 \cdot 3,271^2 + 0,2341 \cdot 3,271 + 0,2745 = 0,86$$

Затяжка болтов ЖБР-65 равна 200 Нм, значит принимает k_3 равным 1, коэффициент $k_2 = 1,08$ при эюре шпал 2000 шт/км, i принимаем 2%.

Подставляем полученные данные в формулу (3) и получаем P_k . Для прямого участка: $A=5830$; $\mu=0,585$

$$P_k = \frac{5830}{2 \cdot 0,585} 0,86 \cdot 1,08 \cdot 1 = 3609,84 \text{ кН}$$

Далее определяем допускаемое по устойчивости значение горизонтальной продольной температурной силы и допускаемое повышение температуры

$$|P_{t-y}| = \frac{3609,84}{1,5} = 2406,56 \text{ кН};$$

$$[\Delta t_y] = \frac{2406,56}{2 \cdot 0,000118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 8200} = 59 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Сравним полученные допускаемые повышения температуры с нормативными, нормативная $[\Delta t_y]=58^\circ\text{C}$, у нас получилось $[\Delta t_y]=59^\circ\text{C}$. Погрешность составляет 1°C , учтем эту погрешность в дальнейших расчетах.

Мероприятия по повышению устойчивости пути

Повышение устойчивости пути может быть достигнуто путем усиления шпал, на которых укладывается рельсовая колея. Сопротивление балласта сдвигу шпалами в значительной степени влияет на устойчивость бесстыкового пути, поскольку является одной из основных реактивных сил, противодействующих активной продольной температурной сжимающей силе [5].

Наиболее эффективной мерой признана идея включения в работу при поперечном сдвиге щебня в шпальных ящиках. С такой целью в Австрии были разработаны шпалы с поперечными выступами как на рисунке 9.

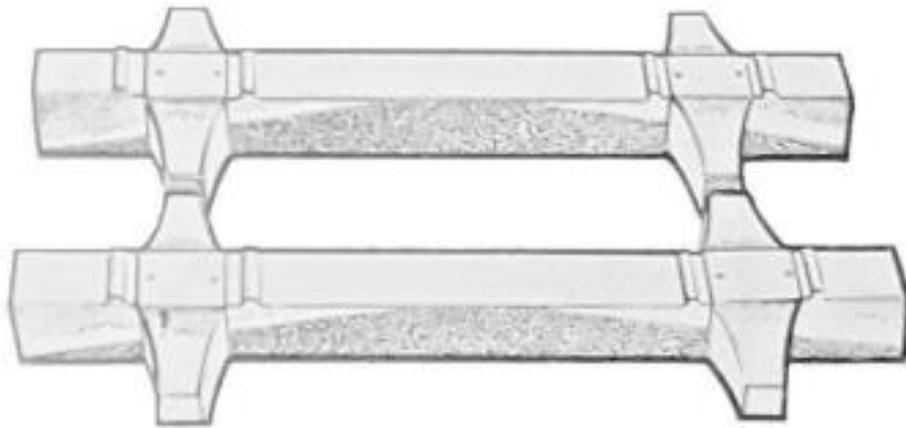


Рис. 9. Австрийские шпалы с поперечными выступами

Применение поперечных выступов способствует повышению сопротивления в балласте в поперечном направлении в 1,5-2 раза.

Поскольку метод устройства поперечных выступов является наиболее эффективным, предлагается разработать шпалы по данному методу с учетом всех факторов влияющих на их пригодность.

Предложена железобетонная шпала с поперечными выступами на базе шпалы ШЗ-Д и на основании ее смоделирована новая шпала, представлена на рисунке 10.

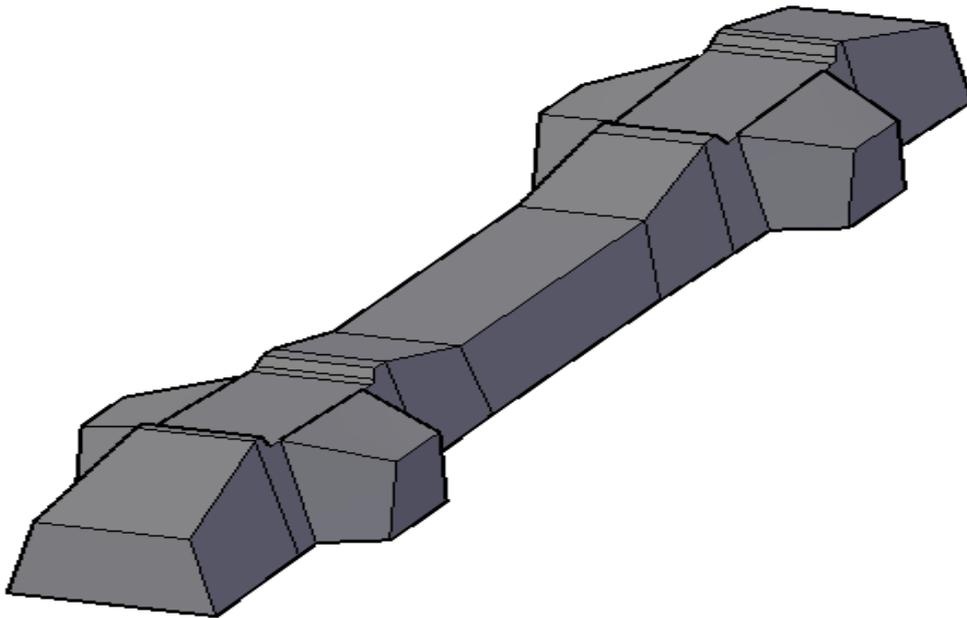
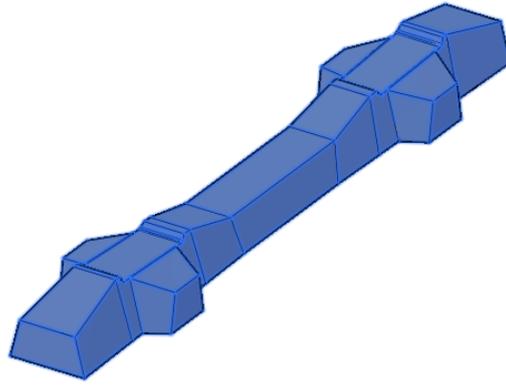


Рис. 10. Разработанная шпала с поперечными выступами

Расчет новой шпалы произведен для прямого участка с эпюрой 2000 шпал/км, рельсом Р65, щебеночным балластом с плотностью $\rho=2400 \text{ кг/м}^3$, балластным плечом равным 0,45м, и для кривого участка с радиусом $R=400\text{м}$ с таким же верхним строением.

Расчет прямого пути с эпюрой шпал 2000 шт/км.

Для начала определим сопротивление шпал поперечному перемещению Q . Для этого определим погонный вес рельсошпальной решетки и объем щебня. Поскольку форма и объем шпалы изменилась, то рассчитаем вес шпалы. Находим в программе NanoCad объем шпалы, информация представлена на рисунке 11.



ТЕЛА	
Масса:	127165612.6683
Объем:	127165612.6683
Ограничивающая рамка:	X: 1000.0000 -- 1230.0000 Y: -74438.4398 -- -71738.4398 Z: 10756.9400 -- 11211.6609
Центр масс:	X: 1086.0261 Y: -73088.4398 Z: 10984.3005
Моменты инерции:	X: 6.9474E+17 Y: 1.5494E+16 Z: 6.7954E+17
Ц/без. мом. инерции:	XY: 1.0094E+16 YZ: 1.0209E+17 ZX: -1.5170E+15
Радиусы инерции:	X: 73913.8558 Y: 11038.3396 Z: 73101.1476

Главные моменты и направления X-Y-Z относительно центра масс:

Рис. 11. Объем разработанной шпалы

Получили значение $V_{\text{нов.шп}} = 127165612.67 \text{ мм}^3$, переведем объем в м^3 и получим $V_{\text{нов.шп}} = 0,127 \text{ м}^3$. Находим вес шпалы используя формулу (6):

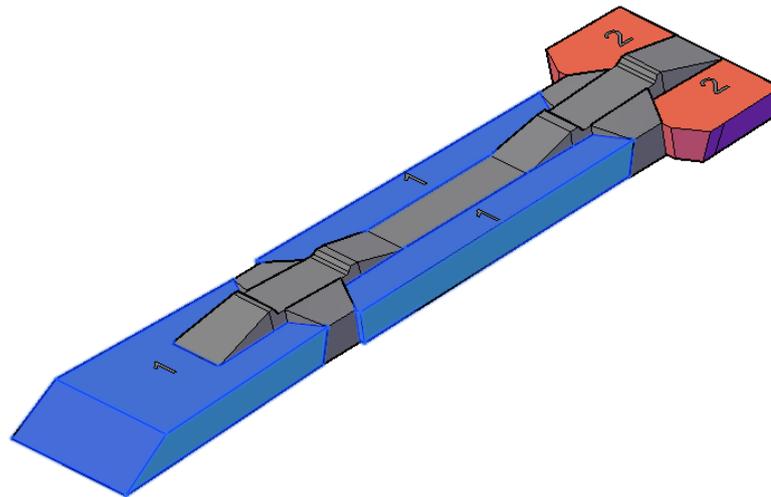
$$m_{\text{нов.шп}} = V_{\text{нов.шп}} \cdot \gamma_0^{\text{бет}}; \quad (10)$$

$$m_{\text{нов.шп}} = 0,127 \cdot 2500 = 317,5 \text{ кг.}$$

Далее находим погонный вес рельсошпальной решетки:

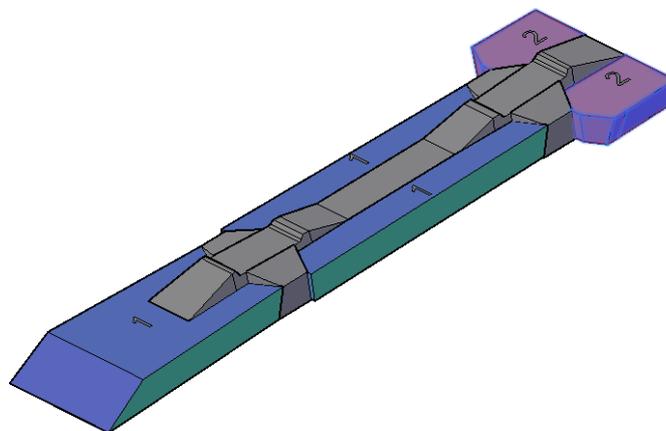
$$W = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 65 + 2000 \cdot 317,5 + 4000 \cdot 11}{1000} = 809 \text{ кг.}$$

Моделируем балласт и находим его объем, т.к. присутствуют выступы он изменится, в работу, учитываемую как за торцом шпалы включается объем за выступами. Информация по объему балласта представлена на рисунках 12 и 13.



ТЕЛА	
Масса:	109279089.8547
Объем:	109279089.8547
Ограничивающая рамка:	X: 1000.4000 -- 1150.0000
	Y: -41949.5727 -- -39181.0339
	Z: 17914.0671 -- 18464.0166
Центр масс:	X: 1076.5207
	Y: -40398.3541
	Z: 18189.0418
Моменты инерции:	X: 2.1458E+17
	Y: 3.6284E+16
	Z: 1.7855E+17
Ц/б.ж. мом. инерции:	XY: 4752982156930852
	YZ: 8.0299E+16
	ZX: -2.1398E+15
Радиусы инерции:	X: 44312.1919
	Y: 18221.7028
	Z: 40421.0507
Главные моменты и направления X-Y-Z относительно центра масс:	

Рис. 12. Объем балласта при новой шпале за торцом и за выступами



ТЕЛА	
Масса:	29896684.7932
Объем:	29896684.7932
Ограничивающая рамка:	X: 1000.0000 -- 1150.0000
	Y: -42555.4339 -- -42099.5727
	Z: 17792.2626 -- 18585.8211
Центр масс:	X: 1081.4585
	Y: -42343.0106
	Z: 18189.0418
Моменты инерции:	X: 6.3496E+16
	Y: 9928107451202777
	Z: 5.3638E+16
Ц/б.ж. мом. инерции:	XY: 1369033156358464
	YZ: 2.3026E+16
	ZX: -5.8809E+14
Радиусы инерции:	X: 46085.2970
	Y: 18223.0773
	Z: 42357.0140
Главные моменты и направления X-Y-Z относительно центра масс:	

Рис. 13. Объем балласта при новой шпале по бокам

Были получены значения $G_c = 0,109 \text{ м}^3$, $G_z = 0,029 \text{ м}^3$. Подставляем полученные данные в формулу (3) и получаем:

$$Q = 0,75 \cdot 809 + 29 \cdot 2400 \cdot 0,109 + 1,8 \cdot 2400 \cdot 0,029 = 8,318 \text{ кН.}$$

Вычисляем k_1 :

$$k_1 = 0,0005 \cdot 8,318^3 - 0,0187 \cdot 8,318^2 + 0,2431 \cdot 8,318 + 0,2745 = 1,21.$$

Подставляем полученные данные и находим P_k :

$$P_k = \frac{5830}{2^{0,585}} 1,21 \cdot 1,08 \cdot 1 = 5078,96 \text{ кН}.$$

Определяем допускаемое по устойчивости значение горизонтальной продольной температурной силы и допускаемое повышение температуры:

$$|P_{t-y}| = \frac{5078,964}{1,5} = 3385,97 \text{ кН};$$

$$[\Delta t_y] = \frac{3385,97}{2 \cdot 0,0000118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 8200} = 83 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Сравнив результаты стандартной конструкции и новой; в прямом участке с эпюрой 2000 шп/км для обычной конструкции имеем $[\Delta t_y]=58^\circ\text{C}$, а при новой с учетом погрешности на 1°C $[\Delta t_y]=82^\circ\text{C}$, что на много выше чем при стандартной. Из проделанных расчетов видно, что конструкция эффективна и имеет ряд преимуществ. Можно считать целесообразным укладку такой конструкции на железнодорожный путь.

Заключение

Из произведенных расчетов видно, что предложенная методика расчета в данной работе имеет небольшую погрешность, это значит, что она может применяться для расчета. По полученным данным можно сделать вывод, что разработанная новая конструкция шпалы имеет большую устойчивость поперечным перемещениям, так устойчивость пути повысилась на $24 \text{ }^\circ\text{C}$, что составляет 40%. Путь такой конструкции будет выдерживать температурные напряжения больше чем стандартный, и можно будет производить закрепление такого пути при меньшей температуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. – Москва «Транспорт» 1987.
2. Проектирование и расчет элементов верхнего строения железнодорожного пути : учеб. пособие / Д.Н. Насников, Е.В. Филатов. – Иркутск : ИрГУПС, 2022. – 120 с.
3. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути, утвержденная распоряжением ОАО "РЖД" № 2788р от 29.12.2012
4. В.О. Певзнер, М.В. Новакович, В.В. Третьяков, В.В. Шубитидзе Уточнение условий эксплуатации бесстыкового пути в период экстремального повышения температур//Вестник РГУПС. - Вып.№4 2018г
5. Насников Д.Н. Формы и особенности динамического взаимодействия звеньев в виброзащитных системах с расширенным набором типовых элементов: автореф. дис. ... канд. техн. Наук / Д.Н. Насников. – Иркутск, 2009. – 22 с.

REFERENCES

1. Shakhunyants G.M. The desired path. - Moscow "Transport" 1987.
2. Design and unwinding of the elements of the upper structure of the desired for: studies. manual / D.N. Nasnikov, Or. S. Filatov. - Irkutsk: IrGUPS, 2022. - 120 P.
3. Instructions for installation, debugging, maintenance and repair of the shameless path held by the distribution of JSC "Russian Railways" No. 2788r dated 29.12.2012
4. S.O. Pevtsner M.S. Novakovich V.S. Tretyakov, V.S. Shubitidze Clarification of the operating conditions of the shameless path during the period of extreme temperature rise//Bulletin of the RSUPS. - Issue No. 4 of 2018
5. Nasnikov, D.N.: Forms and features of dynamic interaction of units in vibration protection systems with an extended set of typical elements, 22 pp. Author's abstract of Ph.D. (Engineering) thesis, IrGUPS Publ., Irkutsk (2009)

Информация об авторах

Данилов Андрей Алексеевич – студент гр. СЖД.2-18-1, кафедра «Путь и путевое хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: andrewdanilov25@mail.ru.

Насников Дмитрий Николаевич – к.т.н, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: nasnikov_dn@irgups.ru.

Author information

Danilov Andrey Alekseevich - student gr. SZD.2-18-1, Department of Railways and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: andrewdanilov25@mail.ru.

Nasnikov Dmitry Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: nasnikov_dn@irgups.ru.