

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

В.И. Новакович, Е.В. Корниенко, В.В. Карпачевский

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Учебно-методическое пособие
для практических работ,
расчетно-графической и курсовой работы

Ростов-на-Дону
2015

Рецензент – кандидат технических наук, доцент А.А. Ревякин

Новакович, В.И.

Проектирование и расчет элементов верхнего строения железнодорожного пути: учебно-методическое пособие для практических работ, расчетно-графической и курсовой работы / В.И. Новакович, Е.В. Корниенко, В.В. Карпачевский; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – 40 с. – Библиогр.: с. 22.

Содержит темы и краткое содержание практических занятий, изложены рекомендации по написанию расчетно-графической работы по дисциплине «Проектирование и расчет элементов верхнего строения железнодорожного пути» и курсовой работы по дисциплине «Модернизация объекта транспортной инфраструктуры». Приведены методы расчетов бесстыкового пути, которые легли в основу ряда технологических приемов, позволивших применить рельсовые плети бесстыкового пути до протяженности блок-участка, перегона и неограниченной длины; методы расчетов, показывающие техническую целесообразность ликвидации уравнильных пролетов. Учебно-методическое пособие призвано активизировать самостоятельную работу студентов, способствовать более глубокому изучению курса.

Предназначено для студентов всех форм обучения специальности «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» специализации «Управление техническим состоянием железнодорожного пути», выполняющих курсовые, расчетно-графические работы и дипломное проектирование, а также для курсов повышения квалификации и магистрантов направления – «Строительство» профиля – «Проектирование, сооружение и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры».

Одобрено к изданию кафедрой «Путь и путевое хозяйство».

Оглавление

1. Расчет бесстыкового пути на прочность и устойчивость.....	4
1.1. Расчет повышений и понижений температуры рельсовых плетей, допустимых по условиям их прочности и устойчивости.....	4
1.2. Расчет интервалов закрепления.....	6
1.3. Эпюра температурных продольных сил.....	6
1.4. Определение влияния температуры закрепления плетей на возможности выполнения путевых работ.....	8
1.5. Определение величины зазора при изломе рельсовой плети в зимнее время.....	10
2. Расчет продольных сил и деформаций в рельсовых плетях бесстыкового пути.....	11
2.1. Сопротивление сдвигу рельсов вдоль оси пути.....	11
2.2. Продольные силы в середине рельсовых плетей.....	12
2.3. Устойчивость бесстыкового пути с учетом фактора времени.....	13
3. Изменение сил при работе машин тяжелого типа.....	16
4. Продольная сила, необходимая для выпрямления, приложенная на конце изогнутого участка.....	20
Библиографический список.....	22
Приложение 1.....	23
Приложение 2.....	30
Приложение 3.....	31
Приложение 4.....	37
Приложение 5.....	38
Приложение 6.....	39

1. Расчет бесстыкового пути на прочность и устойчивость

1.1 Расчет повышений и понижений температуры рельсовых плетей, допустимых по условиям их прочности и устойчивости

Для расчета бесстыкового пути на прочность и устойчивость необходимо знать минимальные и максимальные температуры рельсов, отмеченные многолетними наблюдениями геофизических станций. Минимальная температура зимой считается равной температуре воздуха. Максимальные значения этой температуры рельсов могут быть выше температуры воздуха до 25⁰С. Минимальные из минимальных и максимальные из максимальных температуры рельсов по итогам длительных наблюдений для разных районов России приведены в приложении 1.

Допускаемое повышение температуры рельсовых плетей Δt_y устанавливается на основании теоретических и экспериментальных исследований устойчивости пути. Данные для Δt_y уложенных вновь или переложённых повторно с переборкой рельсошпальной решетки рельсовых плетей при различных конструкциях верхнего строения пути приведены в приложении 2.

Допускаемое понижение температуры рельсовых плетей определяют расчетом прочности рельсов, основанным на условии, что сумма растягивающих напряжений, возникающих от воздействия подвижного состава и от изменений температуры, не должна превышать допускаемое напряжение материала рельсов:

$$k_n \sigma_k + \sigma_t \leq [\sigma], \quad (1)$$

где k_n – коэффициент запаса прочности ($k_n = 1,3$ для рельсов первого срока службы и старогодных рельсовых плетей, прошедших диагностирование и ремонт в стационарных условиях или профильное шлифование и диагностирование в пути; $k_n = 1,4$ для рельсов, пропустивших нормативный тоннаж или переложённых без шлифования);

σ_k – напряжения в кромках подошвы рельса от изгиба и кручения под нагрузкой от колес подвижного состава, МПа;

σ_t – напряжения в поперечном сечении рельса от действия растягивающих температурных сил, возникающих при понижении температуры рельса по сравнению с его температурой при закреплении, МПа;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение (для термоупрочненных рельсов $[\sigma] = 400$ МПа, для незакаленных – 350 МПа).

Напряжения в подошве рельса σ_k определяют по правилам расчета верхнего строения пути на прочность. При этом модули упругости подрельсового основания зимой при деревянных шпалах ($U_{д}^3$) принимают равными 40 и 50 МПа; при железобетонных шпалах ($U_{жб}^3$) с резиновыми и резинокордовыми прокладками – 120 и 130 МПа (соответственно при 1840 и 2000 шпал на 1 км).

Температурное напряжение, возникающее в рельсе в связи с несостоявшимся изменением его длины при изменении температуры:

$$\sigma_t = \alpha E \Delta t \approx 2,5 \Delta t, \quad (2)$$

где α – коэффициент линейного расширения рельсовой стали

($\alpha = 0,0000118$ 1/град);

E – модуль упругости рельсовой стали ($E = 210$ ГПа = $2,1 \cdot 10^5$ МПа);

Δt – разность между температурой, при которой определяется напряжение, и температурой закрепления плети на шпалах, °С.

Наибольшее допускаемое по условию прочности рельса понижение температуры рельсовой плети по сравнению с ее температурой при закреплении:

$$\Delta t_p = \frac{([\sigma] - k_n \sigma_k)}{(\alpha E)}. \quad (3)$$

В соответствии с указанным порядком расчета определены и приведены в приложении 3 допускаемые по условию прочности понижения $[\Delta t_p]$ температуры рельсовых плетей по сравнению с температурой их

закрепления для бесстыкового пути с термоупрочненными рельсами типа Р65 первого срока службы на железобетонных шпалах и щебеночном или асбестовом балласте в зависимости от типа обращающихся локомотивов, реализуемой скорости движения и радиусов кривых.

1.2 Расчет интервалов закрепления плетей

Границы расчетного интервала закрепления (рис. 1), т.е. самую низкую ($min t_3$) и самую высокую ($max t_3$) температуры закрепления, определяют по формулам:

$$\begin{aligned} min t_3 &= t_{maxmax} - [\Delta t_y]; \\ max t_3 &= t_{minmin} + [\Delta t_p]. \end{aligned}$$

Закрепление плетей любой длины при любой температуре в пределах расчетного интервала обеспечивает надежность их работы при условии полного соблюдения требований ТУ, касающихся конструкции и содержания бесстыкового пути.

При этом следует учитывать, что закрепление плетей при очень высоких температурах может в отдельных случаях привести к образованию большого зазора при сквозном изломе плети в холодную погоду или к разрыву болтов в стыках уравнительных пролетов с большим расхождением концов рельсов.

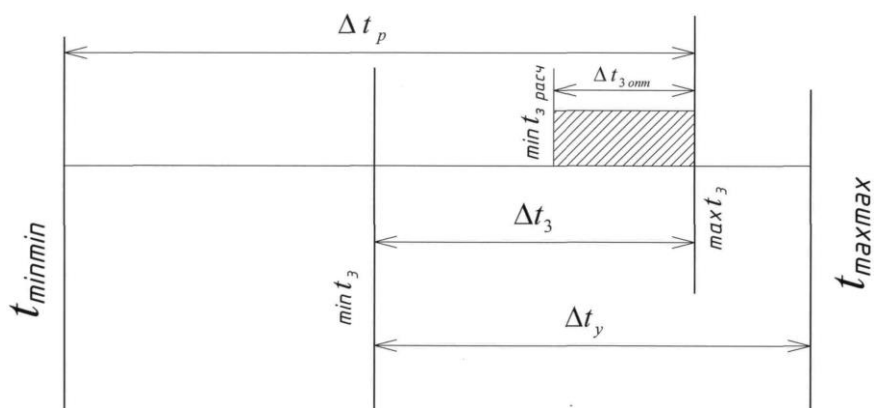


Рис. 1 Графическое изображение температурного интервала закрепления плетей на постоянный режим эксплуатации

1.3 Эпюра температурных продольных сил

Продольная температурная сила в середине плети находится по формуле:

$$F_t = \alpha \cdot E \cdot \omega \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где Δt – отступление от температуры закрепления, °С;

ω – площадь поперечного сечения двух рельсов, см².

Для растягивающей силы Δt определяется по зависимости:

$$\Delta t_{расм} = t_3 - t_{минмин}, \quad (5)$$

Для сжимающей силы Δt находится по формуле:

$$\Delta t_{сж} = t_{максмакс} - t_3, \quad (6)$$

Для наглядного изображения действия сил в плети изображается эпюра растягивающих и сжимающих сил. Для её построения необходимо рассчитать длину дышащего участка l :

$$l = \frac{F_t - R_n}{r}, \quad (7)$$

где R_n – сопротивление стыка, кН;

r – погонное сопротивление перемещению рельсошпальной решетки, кН/м.

В таком случае эпюра продольных температурных сил будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

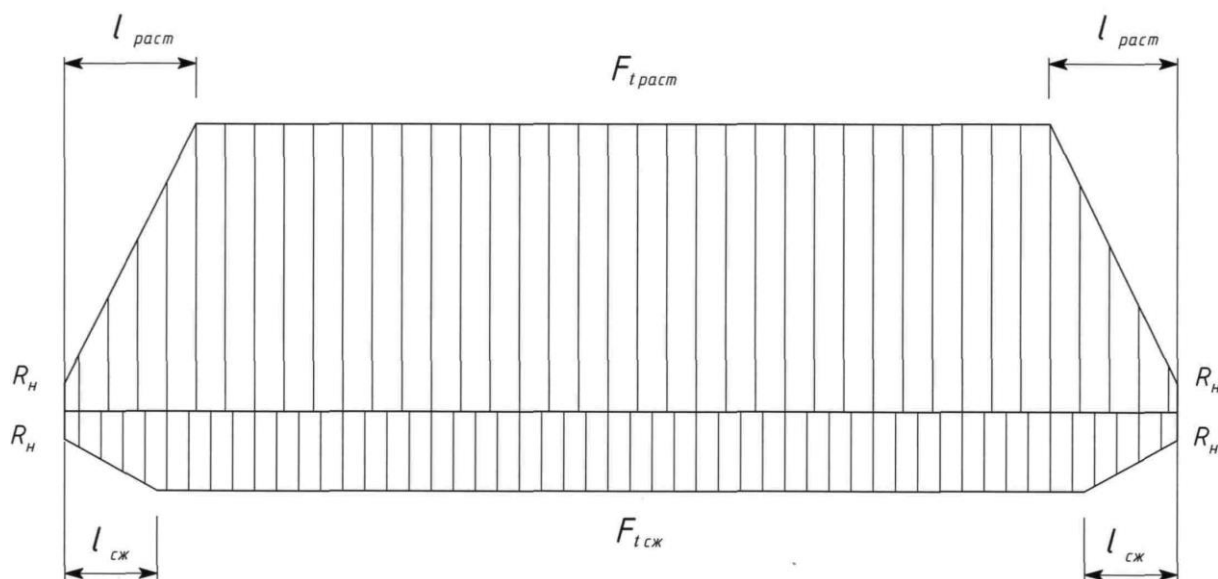


Рис.2 Эпюра продольных температурных сил

1.4 Определение влияния температуры закрепления плетей на возможности выполнения путевых работ

Путевые ремонтные работы связаны с временным ослаблением устойчивости рельсошпальной решетки против выброса. Их разрешается производить, если отклонение температуры рельсовых плетей от температуры их закрепления в течение всего периода не превышает значений, указанных в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Допускаемые изменения температуры рельсовых плетей при текущем содержании бесстыкового пути

Путевые работы	Предельные значения сдвижки, см	Заданное допустимое превышение температуры плети, °С	Допускаемое превышение температуры плети °С относительно температуры их закрепления	
			На прямой	В кривой R=1000
1	2	3	4	5
Исправление просядок, толчков и перекосов с вывеской путевой решетки домкратами	2	10	20	15
Вывеска решетки домкратами	6	10	15	10
Рихтовка гидравлическими приборами на величину	1	10	15	15
	6	10	15	10
Вырезка балласта до уровня подошвы шпал на длине пути до 25м	0	10	20	15
Одиночная смена шпал с вывеской шпальной решетки до 2 см при условии, что между одновременно заменяемыми шпалами расположено не менее 20-ти прикрепленных шпал	2	10	20	15

Допускаемые изменения температуры рельсовых плетей при работе
путевых машин

Машины	$\Delta t^{зад}$	Допускаемое отклонение Δt в сторону			
		Повышения		Понижения	
		$R \geq 800м$	$R < 800м$	$R \geq 800м$	$R < 800м$
1	2	3	4	5	6
Щебнеочистительные баровые: ЩОМ-6Б, СЧ-600, СЧ-601, СЧУ-800, РМ-76, РМ-80, РМ-800, ОТ-400(800)	10	15	10	25	20
Щебнеочистительные роторные: ЩОМ-6Р, УМ-М, ЩОМ-4 и ЩОМ-4М без использования подрезных ножей	10	20	20	25	20
ЩОМ-Д, ЩОМ-4 и ЩОМ-4М с подрезными ножами и РФУ	10	15	10	25	20
ЩОМ-Д, ЩОМ-4 и ЩОМ-4М на базе ЭЛБ-1 и ЭЛБ-3 с подрезными ножами и без РФУ	10	5	0	25	20
Балластировочные и рихтовочные: ЭЛБ-1, ЭЛБ3, ЭЛБ-1Р, ЭЛБ-3МК, Р-2000, Р-02 и ЛРБ	10	5	0	25	20
Выправочно -подбивочные ВПО-3000, ВПО-3-3000, ВПР-1200, ВПР-02, «Доуматик», ВПРС-500, ВПРС-02, ВПРС-03, «Унимат»	10	15	15	25	20
Динамические стабилизаторы ДСП	10	20	20	25	20

1.5 Определение величины зазора при изломе рельсовой плети в зимнее время

Зазор, который возникает при изломе в середине рельсовой плети, можно определить по формуле:

$$\Delta\lambda = 2\lambda, \quad (8)$$

где λ – величина температурного перемещения на конце излома, [3].

$$\lambda = \frac{F_t^2}{2 \cdot E \cdot \omega \cdot r}, \quad (9)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали, кгс/см²;

r – погонное сопротивление продольному перемещению рельсовых плетей, кН/см, зимой (при смерзшемся балласте) при нормативном натяжении клеммных и закладных болтов значение r , принимают [3] равным 25 Н/мм.

F_t – температурная сила, возникающая при отступлении температуры от максимальной температуры закрепления, кН.

$$F_{ti} = \alpha \cdot E \cdot \omega \cdot (\max t_s - t_i), \quad (10)$$

где t_i – расчетная температура плети, °С.

Зазор λ , мм, образовавшийся при изломе плети [3] пропорционален квадрату фактического понижения температуры Δt_p по сравнению с температурой закрепления и определяется по следующим формулам в зависимости от типа рельсов:

$$\lambda_{p65} = 0,24 \frac{\Delta t_p^2}{r}; \lambda_{p50} = 0,19 \frac{\Delta t_p^2}{r}, \quad (11)$$

В этом случае зазоры при изломе определяются формулами:

$$\lambda_{p65} = 0,010 \cdot \Delta t_p^2; \lambda_{p50} = 0,008 \cdot \Delta t_p^2, \quad (12)$$

При учете воздействия поездов зазор должен считаться по другой формуле:

$$\lambda_s = \frac{\alpha (\pi E \omega \tau)^{1/2} \Delta t}{K^{1/2}}, \quad (13)$$

где τ – время;

K – коэффициент вязкости балласта, сдвигаемого шпалами вдоль оси пути.

2 Расчет продольных сил и деформаций в рельсовых плетях бесстыкового пути

2.1 Сопротивление сдвигу рельсов вдоль оси пути

Сопротивление рельсошпальной решетки перемещению вдоль оси пути в расчетах учитывается через величину погонного сопротивления r , которое определяется как распределенное на единицу длины шпального пролета l (расстояние между осями соседних шпал) сопротивление шпалы сдвигу R .

При экспериментах без учета воздействия поездов зависимость погонного сопротивления r от величины перемещения λ имеет вид, показанный на рис. 3

В расчетах применяют различные виды аппроксимаций опытной зависимости $r(\lambda)$. Наиболее точной аппроксимирующей функцией следует считать степенную:

$$r = a\lambda^b. \quad (14)$$

С достаточной степенью точности для щебеночного балласта можно принять

$$a = 15 \text{ кН/м}^2, \text{ а } b = 1/3.$$

$$r = 15\sqrt[3]{\lambda}, \text{ кН/м.} \quad (15)$$

При учете вертикальной нагрузки от колес подвижного состава коэффициент α следует увеличить в 1,5 ... 2 раза.

Наиболее простой аппроксимацией, которой широко пользуются в расчетах, является замена $r(\lambda)$ прямой, параллельной оси абсцисс, т.е. принятие $r = \text{const}$. В этом случае величину находят, как среднюю на всем промежутке $0 \leq \lambda \leq \lambda_{\text{max}}$.

$$r = r_{cp} = \frac{\int_0^{\lambda_{\text{max}}} \alpha \lambda^b d\lambda}{\lambda_{\text{max}}}, \quad (16)$$

где λ_{max} – реальное максимальное перемещение шпалы вдоль оси пути для решаемой задачи.

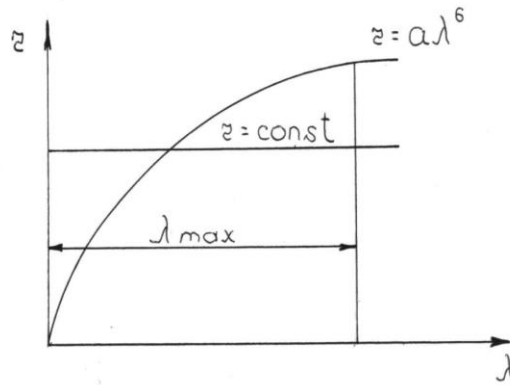


Рис. 3 Аппроксимация $r(\lambda)$

Зависимость $r = \text{const}$ соответствует упрощенному представлению процесса деформирования, характерного для идеального жесткопластического элемента (рис. 3).

Для пути в нормальном состоянии можно принимать $r = 10$ кН/м, при нестабилизированном балласте $r \approx 5$ кН/м.

2.2. Продольные силы в середине рельсовых плетей

Рельсы считаем идеально упругим элементом конструкции верхнего строения пути, т.е. подчиняющимся закону Гука:

$$F = E\omega \frac{d\lambda}{dx}, \quad (17)$$

где F – продольная сила;

E – модуль упругости;

ω – площадь поперечного сечения;

$d\lambda/dx$ – относительная деформация.

Из условия равновесия элементарного участка рельса dx с приращением на его длине силы dF

$$r = dF / dx. \quad (18)$$

Тогда получим дифференциальное уравнение продольных деформаций:

$$d^2l / dx^2 = r(\lambda) / E\omega. \quad (19)$$

В этом случае длина x конечного участка, на котором произойдут продольные перемещения, определяется из формулы:

$$x = F / r, \quad (20)$$

а величина температурного перемещения на конце – из формулы, полученной при решении дифференциального уравнения:

$$\lambda = F^2 / 2E\omega r. \quad (21)$$

Из (21) может быть рассчитан зазор, который возникает при изломе в середине рельсовой плети. Очевидно, что этот зазор $\Delta\lambda = 2\lambda$.

При многократном изменении температуры вместо (21) следовало бы дать формулу, учитывающую явление гистерезиса. Однако многократные изменения температуры происходят за значительный промежуток времени, а при учете фактора времени следует пользоваться уже другой теорией.

2.3. Устойчивость бесстыкового пути с учетом фактора времени

С учетом фактора времени, т. е. с учетом упруго-вязких свойств рельсошпальной решетки в горизонтальной плоскости при деформациях поперек оси пути, следует решить дифференциальное уравнение

$$EJ_{рш} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \xi \frac{\partial y}{\partial \tau} = 0, \quad (22)$$

где $J_{рш}$ – приведенный момент инерции рельсошпальной решетки в горизонтальной плоскости;

τ – текущее время;

ξ – коэффициент вязкости балласта, сдвигаемого шпалой поперек пути.

При постоянном значении продольной силы решение (17) возможно методом Фурье.

Частное решение получено в виде двух функций [4]. Первая из них определяет форму изогнутой оси упруго сжатой продольной силой рельсошпальной решетки (рис.4).

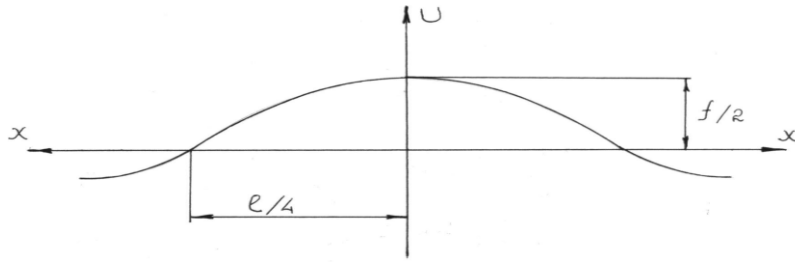


Рис.4 Форма изогнутой оси

$$U = \frac{f}{2} \cos \sqrt{\frac{F}{2EJ_{пу}}} x, \quad (23)$$

Если $U = 0$, то $x = l/4$ и, если $x=0$, $U=f/2$, получим выражение, известное из многих расчетных методов:

$$l = 2\pi \sqrt{\frac{2EJ_{пу}}{F}}. \quad (24)$$

Вторая функция определяет закон изменения во времени прогиба рельсошпальной решетки в плане

$$f = f_0 \exp \frac{F^2 \tau}{4EJ_{\delta\phi} \xi}. \quad (25)$$

Здесь f_0 – начальная неровность пути в плане.

При постоянных во времени значениях температурной сжимающей продольной силы ($F = 0$, $F > 0$, $F < 0$) можно получить зависимость изменения стрелы изгиба путевой решетки во времени (рис. 5)

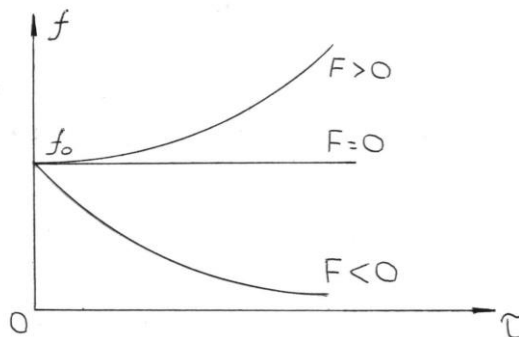


Рис. 5 Изменение стрелы изгиба

Для практических целей в виде аппроксимации достаточно принять наихудшие значения $F = \text{const}$ на всем интересующем промежутке времени τ . При этом должны быть использованы худшие из возможных для устойчивости пути значения параметров (максимальное F , f_0 и минимальное $J_{pш}, \xi$). Промежуток времени в расчете следует принимать такой, за который нет возможности обнаружить и принять меры по своевременной ликвидации неровности со стрелой f_0 (по нормам содержания пути в плане)

3. Изменение сил при работе машин тяжелого типа

Машины тяжелого типа ЩОМ-4, ЭЛБ, ВПО и некоторые другие работают с поднятой рельсошпальной решеткой. При подъеме рельсошпальной решетки рельсы изгибают в вертикальной плоскости по кривой, которой соответствуют уравнение (26) и рис. 6.

$$y = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l}\right), \quad (26)$$

где h – стрела изгиба (величина подъема);

l – длина хорды изогнутой оси рельсов.

На месте первоначального изгиба в пределах средней части рельсовой плети возникает дополнительная продольная растягивающая сила, которая может быть определена по параметрам изогнутой оси рельсов с учетом погонных сопротивлений рельсошпальной решетки продольным перемещениям за концами изгиба.

Если пользоваться (26) и значением $r = \text{const}$, то величина дополнительной растягивающей силы может быть найдена по следующей формуле:

$$F_n = \frac{rl}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\pi^2 E \omega h^2}{rl^3}} - 1 \right). \quad (27)$$

Учет зависимости $r(\lambda) = 15 \sqrt[3]{\lambda}$ и учет влияния пригруза рельсошпальной решетки тележками машины за концами изогнутой оси рельсов дают уточнение (27) примерно на 15 %. Однако первый фактор влияет на снижение величины продольной силы, а второй почти в такой же степени – на ее повышение. График зависимости $F_n(h)$ в пределах $0,15 < h < 0,45$ м весьма близок к прямой. В связи с этим для расчета можно рекомендовать пользоваться следующими аппроксимирующими зависимостями:

для рельсов типа Р50 $F_n = 1720h - 108$ (кН);

для рельсов типа Р65 $F_n = 2000h - 120$ (кН). (28)

После подъема рельсошпальной решетки в начале работы на заданную величину h машина перемещается вдоль пути. При этом изогнутая часть рельсов также перемещается, поднимаясь на h и опускаясь перед колесами задней

тележки машины, ограничивающими ее свободный пролет l . От возникающей в начале ремонтируемого участка продольной растягивающей силы при ремонте непрерывно вступает в деформацию все большая часть рельсовой плети, лежащая впереди машины.

При перемещении от места ее зарядки на бесконечно малом отрезке пути dx в деформацию вступит такой же участок рельсов, тогда дополнительная продольная сила уменьшится на dF (рис.6)

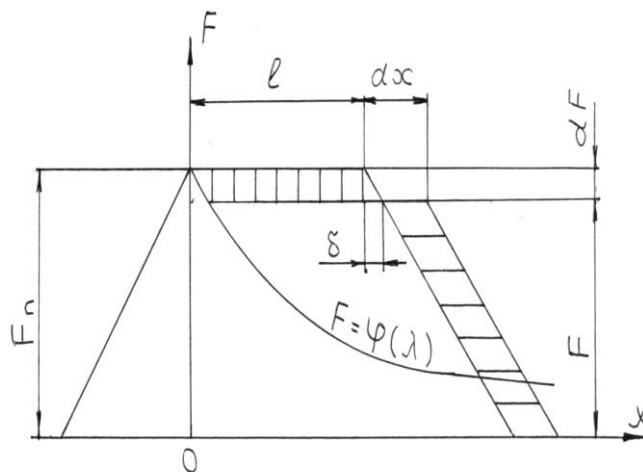


Рис. 6 Изменение $F(x)$ при движении ЩОМ

По закону сохранения энергии при деформациях две по-разному заштрихованные на рис. 6 площади должны быть равны друг другу. Равенство площадей заштрихованных фигур представляет собой дифференциальное уравнение изменений дополнительной растягивающей продольной силы в рельсах бесстыкового пути при движении машины вдоль пути:

$$-ldF = F(dx - d), \quad (29)$$

где $d = -dF/r$.

Частным решением (27) для начального условия $F = F_n$ при $x = 0$ будет

$$x = l \ln \frac{F_n}{F} - \frac{F_n - F}{r}. \quad (30)$$

По (30) можно определить, что передвижение путевой машины с места ее зарядки в начале работы уменьшает дополнительную продольную силу по асимптоте к нулю. Это изменение происходит так быстро, что после прохода

щелочестой машины 50 м от начала работы дополнительная продольная сила уменьшается до значений $F = F_n/8$, которые в расчетах можно не учитывать.

Таким образом, на достаточном расстоянии от места начала работы машины тяжелого типа под ее свободным пролетом в изогнутой части рельсов дополнительная продольная сила практически уже отсутствует. Это значит, что при опускании рельсошпальной решетки на месте окончания работы в рельсовой плети возникнет дополнительная продольная сжимающая сила. По абсолютной величине она приблизительно равна растягивающей, найденной по (29) или (30).

После ухода машины с отремонтированного участка рельсовой плети на местах начала и окончания ее работы эпюра дополнительной продольной силы уже не будет иметь вид трапеции, поскольку сопротивление r , взятое ранее в учет, уменьшится. Можно вычислить величину максимальной продольной силы в зависимости от продольного перемещения λ_0 , которое в этом случае будет равно разнице длины кривой изогнутой оси и стягивающей ее хорды:

$$\lambda_0 = 2 \int_0^l \left(\sqrt{1 + (y')^2} - 1 \right) \cdot dx. \quad (31)$$

Если взять в расчет

$$\lambda_0 \approx \frac{\pi^2 h^2}{4h}, \quad (32)$$

то, зная связь между F , λ и x , можем по остаточному перемещению λ_c и площади эпюры $\lambda_0 E \omega$ найти максимальное значение возникшей дополнительной продольной силы:

$$F_{qmax} = 3,03 \sqrt{E \omega} \lambda_0^{2/3}. \quad (33)$$

На рис. 7 представлен график зависимости $F_{qmax}(\lambda_c)$ для рельсов Р50 и Р65.

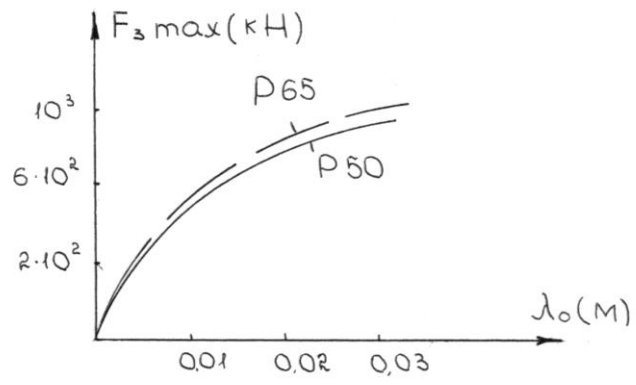


Рис. 7 График зависимости $F_{q \max}(\lambda_0)$ для рельсов Р50 и Р65

4 Продольная сила, необходимая для выпрямления, приложенная на конце изогнутого участка

Необходимость знания выпрямляющей изогнутую часть рельсов продольной силы, приложенной в соответствии со схемой (рис.8), возникает, например, при выполнении процесса надвигки рельсовых плетей при замене инвентарных рельсов или во время сварки рельсов способом предварительного изгиба. При надвигке рельсов бесстыкового пути в кривой по внутренней нити для нормального продолжения работ требуется периодически вытягивать рельсовую плеть продольной силой, а во время сварки способом предварительного изгиба такую же силу создает рельсосварочная машина при оплавлении и осадке в месте сварки.

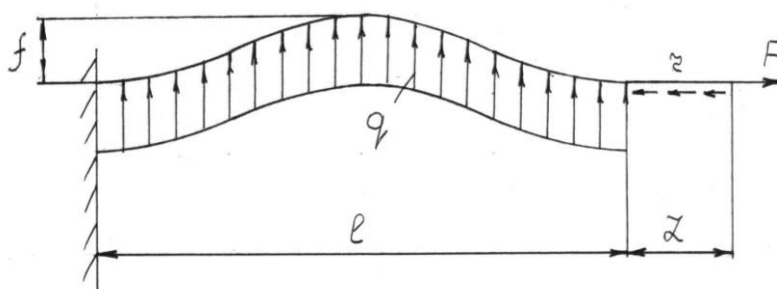


Рис. 8 Расчетная схема для определения F

Продольная сила F может быть определена из решения уравнения равновесия, составленного на основании принципа возможных перемещений:

$$\sum_i^n A_i = 0. \quad (34)$$

(сумма работ внешних и внутренних сил на возможных бесконечно малых перемещениях).

Если учесть работу распределенных сил сопротивления (сил трения) q на бесконечно малом перемещении df :

$$A_1 = \frac{ql}{2} df; \quad (35)$$

работу силы F на бесконечно малом продольном перемещении $d\lambda$:

$$A_2 = Fd\lambda; \quad (36)$$

работу внутренних сил изгиба:

$$A_3 = \frac{2\pi^4 E E J f d f}{l^3} \quad (37)$$

и работу сил сопротивления продольным перемещениям прямого участка на длине L :

$$A_4 = r L d \lambda, \quad (38)$$

то с учетом (38)

$$d\lambda = \frac{\pi^2 f d f}{2l} \quad (39)$$

получим расчетную формулу

$$F = \frac{q l^2}{\pi f} - \frac{4\pi^2 E J}{l^2} + r L. \quad (40)$$

График зависимости (40) представлен на рис. 9

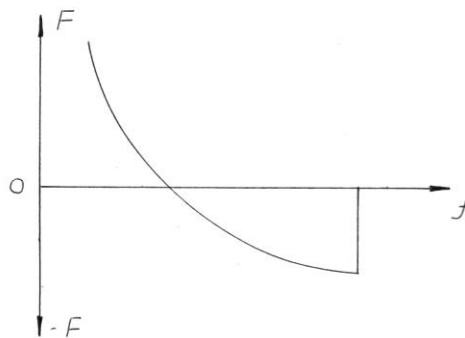


Рис. 9 График зависимости $F(f)$

При уменьшении стрелы продольная сила F растет, стремясь к очень большой величине. При условии, что рельсовая плеть нерастяжима, это допущение практически не влияет на точность расчета: $F = \infty$ при $f = 0$, т.е. с помощью силы F полностью выпрямить изогнутую часть не удастся.

При больших же значениях f сила F будет с обратным знаком. Это значит, что под действием внутренних упругих сил изгиба рельсовая плеть стремится выпрямиться, а если бы необходимо было сохранить на какое-то время достаточно большую стрелу, то следовало бы удерживать плеть сжимающей силой F .

Библиографический список

1. Виноградов, В.В. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие для студентов вузов / В.В. Виноградов. – М.: Маршрут, 2003.
2. Новакович, В.И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями: учебное пособие / В.И. Новакович, Я.Я. Клим. – Ростов н/Д: РГУПС, 1998.
3. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. – М.: Транспорт, 2000.
4. Новакович, В.И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / В.И. Новакович. – М.: Маршрут, 2005.

Экстремальные температуры рельсов для сети железных дорог России

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Абаза	58	-50
Абакан	58	-50
Абакумовка	58	-59
Абалаково	56	-58
Абдулино	60	-49
Агрыз	57	-52
Азов	60	-33
Айдырля	61	-45
Алагир	58	-31
Алатырь	58	-44
Алейская	61	-47
Александров	56	-47
Александров Гай	63	-43
Алексеевка	62	-37
Амазар	58	-55
Амурская	60	-53
Анна	61	-38
Апатиты	51	-41
Арзамас	57	-45
Армавир	62	-34
Арск	58	-47
Архангельск	54	-45
Архара	56	-51
Арчеда	61	-38
Асбест	58	-43
Аскиз	58	-51
Астрахань	60	-34
Аткарск	60	-42
Ахтари	58	-30
Ахтуба	65	-37
Ачинск	59	-60
Бабаево	56	-50
Бабушкин	53	-38
Баженово	58	-43
Базыр	58	-52
Балай	58	-52
Балашов	61	-38
Барабинск	58	-48
Барановский	59	-38
Барнаул	58	-52
Батайск	60	-33
Батецкая	54	-45
Бежецк	55	-52
Безенчук	61	-44
Белев	57	-42

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Белогорск	57	-49
Белореченская	61	-34
Бельково	58	-40
Бердяуш	58	-46
Беслан	57	-34
Бийск	59	-53
Бикин	58	-46
Бира	60	-43
Биробиджан	57	-44
Бисер	54	-52
Бискамба	56	-52
Благовещенск	58	-48
Благодарное	63	-37
Богданович	58	-43
Боготол	58	-53
Богоявленск	60	-38
Богучаны	58	-58
Бологое	55	-50
Болонь	57	-50
Болотная	57	-51
Большая Леприндо	52	-57
Бомнак	55	-52
Борзя	60	-54
Борисоглебск	63	-41
Боровичи	55	-54
Брасово	58	-42
Броды	61	-46
Брянск	58	-42
Бугульма	58	-44
Бугуруслан	60	-49
Будогощь	55	-51
Бузулук	59	-48
Буй	55	-48
Буйнакск	62	-30
Буря	60	-53
Бысса	50	-51
Вагай	59	-47
Валдай	53	-46
Веймарн	54	-39
Вельск	56	-50
Великие Луки	55	-46
Венев	57	-41
Веребье	54	-45
Вернадовка	58	-44
Верхний Баскунчак	65	-37

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Верховье	57	-39
Верхний Уфалей	57	-48
Верхотурье	56	-52
Видлица	54	-54
Владивосток	55	-31
Владикавказ	57	-34
Владимир	57	-48
Вожега	55	-48
Волгоград	62	-36
Волово	57	-40
Вологда	55	-48
Волоколамск	56	-47
Волочаевка	60	-43
Волховстрой	53	-49
Вольск	60	-43
Воркута	51	-52
Воронеж	61	-38
Воскресенск	58	-40
Воткинск	58	-49
Выборг	52	-38
Выдрино	51	-44
Высокогорная	54	-49
Вышний Волочек	55	-48
Вяземская	58	-50
Вязники	57	-45
Вязьма	56	-43
Вятка	57	-45
Вятские Поляны	59	-47
Гагарин	56	-50
Галич	56	-44
Гдов	53	-37
Георгиевск	61	-33
Глазов	57	-48
Головинская	55	-52
Голутвин	58	-44
Горбачеве	58	-41
Горин	57	-60
Гороблагодатская	56	-48
Гороховец	57	-43
Графская	61	-38
Гродеково	57	-41
Грозный	61	-33
Грязи	59	-40
Грязовец	55	-48
Гудермес	62	-30

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Гурская	58	-51
Гусиное Озеро	58	-46
Гусь-Хрустальный	57	-44
Дальнереченск	57	-42
Данилов	56	-46
Данков	57	-40
Дарасун	59	-51
Дербент	58	-21
Дмитров	56	-48
Дно	55	-42
Дружинино	58	-48
Евгеньевка	58	-42
Егоршино	58	-43
Ейск	59	-31
Елец	58	-38
Ельня	55	-43
Емца	55	-50
Енисей	57	-59
Ербинская	57	-50
Ерофей Павлович	57	-54
Ершов	62	-41
Ессентуки	59	-32
Ефимовская	55	-51
Ефремов	58 [^]	-37
Железноводск	61	-33
Жердевка	59	-38
Жуковка	57	-41
Журавлево	56	-51
Забайкальск	60	-53
Завитая	56	-49
Заливы	55	-43
Занозная	56	-43
Заозерная	57	-52
Западная Двина	55	-46
Зашеек	51	-42
Зверево	60	-33
Зейск	56	-52
Земетчино	58	-44
Зилово	59	-55
Зима	55	-53
Златоуст	58	-46
Злынка	59	-38
Иваново	58	-46
Идрица	55	-46
Ижевск	57	-47

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Ильмень	61	-38
Имандра	51	-41
Ин	58	-44
Инголь	56	-52
Инза	59	-44
Ирбейское	58	-60
Ирбит	58	-48
Иркутск	56	-50
Иртышский	62	-46
Исакогорка	54	-45
Исилькуль	60	-46
Ишим	60	-49
Ишимбаево	60	-48
Йошкар-Ола	58	-47
Кавказская	62	-33
Казань	58	-47
Казачинское	57	-57
Калач	62	-40
Калининград	56	-33
Калининск	61	-39
Калино	57	-45
Калуга	58	-45
Каменская	59	-33
Камень-на-Оби	57	-41
Камень-Рыболов	59	-52
Камышин	62	-37
Канаш	57	-45
Кандалакша	51	-44
Канск-Енисейский	58	-53
Карасук	60	-47
Карачев	58	-39
Карталы	61	-44
Карымская	60	-52
Касторная	61	-37
Кача	58	-55
Кашин	57	-47
Кашира	59	-44
Кемерово	58	-55
Кемчуг	58	-57
Кемь	55	-43
Керки	66	-24
Киев	59	-32
Кизел	56	-52
Кизляр	62	-30
Кильмезь	58	-48
Кингисепп	52	-43

Продолжение приложения 1

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Кинель	59	-43
Кинешма	58	-45
Киржач	56	-47
Кировск-Мурманский	51	-41
Кирсанов	60	-41
Кисловодск	57	-29
Кия-Шалтырь	54	-50
Клин	58	-45
Клинцы	57	-38
Клюквенная	58	-52
Ковда	52	-40
Ковров	57	-48
Кокшеньга	56	-50
Кола	53	-38
Колежма	54	-44
Колодезная	61	-38
Коломна	58	-44
Комаричи	58	-39
Комсомольск- на-Амуре	59	-50
Конотоп	57	-37
Коноша	55	-48
Копьево	56	-52
Коренево	57	-38
Коростень	59	-34
Кострома	57	-46
Котельниково	62	-38
Котельнич	57	-54
Котлас	57	-51
Кошурниково	56	-50
Кравченко	55	-55
Красная Сопка	58	-58
Краснодар	62	-36
Краснокаменск	59	-42
Красноуфимск	58	-48
Красноярск	58	-53
Красный Кут	60	-41
Красный Узел	58	-44
Крестцы	53	-46
Критово	58	-56
Кроначево	58	-48
Кротовка	60	-43
Крымская	59	-24
Ксеньевская	57	-56
Кувандык	62	-44

Продолжение приложения 1

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Кузино	58	-49
Кузнецк	59	-46
Кулунда	61	-48
Кунгур	57	-45
Купино	60	-47
Курагино	56	-53
Курган	60	-49
Курганная	62	-34
Кургенча	62	-25
Куровская	57	-46
Курск	57	-38
Кустаревка	58	-42
Кушевка	60	-33
Куэнга	60	-58
Кыц	57	-49
Кыштам	58	-46
Ладва	55	-40
Лазо	58	-42
Лев Толстой	59	-39
Ленинск	57	-47
Лесогорский	52	-38
Лесозаводск	57	-43
Ливны	58	-39
Липецк	59	-38
Лисий Нос	53	-36
Лиски	62	-38
Литовко	57	-45
Лихая	62	-40
Лихославль	58	-50
Лодейное Поле	53	-48
Л осиноостровская	57	-43
Лоухи	51	-46
Луга	54	-42
Лукоянов	57	-43
Льгов	57	-38
Любань	54	-41
Магдагачи	57	-51
Магнитогорск	59	-46
Майкоп	61	-34
Максатиха	55	-52
Макушино	59	-47
Малиновка	57	-53
Малоузенск	63	-43
Малоярославец	58	-48
Манзовка	58	-42

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Мариинск	59	-54
Мармыжи	61	-37
Масельская	55	-45
Махачкала	57	-26
Медвежья Гора	55	-45
Междуреченск	55	-54
Мелекес	59	-47
Мелеуз	61	-45
Мелитополь	61	-33
Миллерово	60	-36
Минеральные Воды	61	-33
Минино	58	-54
Минусинск	59	-52
Митрофановка	62	-37
Михайлов	59	-41
Михайловка-Алтайская	62	-48
Михнево	58	-40
Мичуринск	60	-37
Мишиха	53	-39
Могзон	58	-55
Могоча	57	-56
Можайск	56	-44
Можга	58	-48
М оршанск	58	-40
Москва	58	-42
Мундыбаш	58	-52
Мураши	56	-46
Мурманск	53	-48
Муром	57	-45
Мцвнок	57	-44
Мнили	57	-38
Нагорный	55	-56
Назарово	59	-62
Мазываевка	60	-46
Нальчик	60	-31
Наурская	62	-32
Находка	56	-29
Нсвель	55	-46
Нелята	56	-57
Нерехта	57	-46
Нерчинск	60	-57
Нижнеангарск	54	-47
Нижнедевицк	61	-37

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Нижнеудинск	56	-54
Нижний Новгород	57	-41
Нижний Тагил	57	-49
Николо-Полома	56	-45
Новгород	54	-45
Новки	57	-48
Новozyбков	57	-37
Новоиерусалимская	57	-53
Новокузнецк	58	-52
Новороссийск	59	-24
Новосибирск	57	-51
Новосокольники	55	-46
Новый Оскол	62	-37
Нора	56	-53
Няндама	53	-47
Обливская	61	-38
Обловка	60	-39
Облучье	57	-46
Овинище	55	-52
Огорон	55	-50
Ожерелье	59	-44
Окатово	57	-44
Октябрьский Прииск	56	-53
Окуловка	53	-46
Оловянная	60	-53
Олонец	54	-54
Омск	59	-49
Онега	53	-46
Опарино	56	-48
Оредеж	54	-45
Орел	58	-39
Оренбург	62	-42
Орехово	57	-45
Орск	62	-44
Осташков	55	-47
Остров	56	-41
Павелец	58	-42
Павлово-Посад	57	-45
Павловск	53	-36
Палласовка	64	-38
Партизанск	57	-37
Пачелма	58	-43
Пенза	58	-43
Пермь	57	-45
Петровский Завод	58	-55
Петрозаводск	55	-40

Продолжение приложения 1

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя $t_{\max\max}$	зимняя $t_{\min\min}$
Петрокрепость	53	-36
Петропавловск	61	-53
Петрунь	54	-54
Петруши	60	-52
Пиrowsкая	56	-57
Платоновка	60	-39
Плесецкая	54	-48
Поворино	61	-39
Подборовье	55	-50
Подкаменная	55	-47
Покровск- Приволжский	60	-41
Поканаевка	57	-52
Покровск- Уральский	55	-52
Половина	55	-51
Поронайск	56	-42
Посадниково	53	-46
Посевная	58	-48
Посьет	56	-29
Почеп	58	-37
Починки	57	-41
Починск	55	-41
Пржевальская	54	-30
Приаргунск	60	-51
Приднепровская	55	-41
Приозерск	53	-36
Проектное	57	-53
Промышленная	56	-53
Прохладная	62	-32
Псков	56	-41
Пугачевск	62	-41
Пулозеро	52	-42
Пятигорск	61	-33
Раевка	60	-46
Раненбург	60	-38
Ребриха	59	-50
Решоты	57	-51
Ржев	56	-47
Рославль	56	-41
Россошь	63	-37
Ростов-Главный	60	-33
Ростов- Ярославский	59	-46
Рощино	53	-36
Ртищево	60	-43
Рубцовск	61	-49

Продолжение приложения 1

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя	зимняя
	t _{maxmax}	t _{minmin}
Ружино	58	-42
Рузаевка	58	-44
Рыбинск	56	-46
Рязск	61	-40
Рязань	58	-41
Саблино	53	-36
Сальск	62	-34
Сама	55	-52
Самара	59	-43
Санкт-Петербург	53	-36
Саранск	58	-44
Саранчет	57	-57
Сарапул	58	-46
Саратов	60	-41
Сасово	58	-42
Саянская	57	-56
Свердловск	58	-43
Свирь	54	-44
Свиягино	57	-48
Свободный	58	-53
Сегежа	55	-46
Селемджинск	60	-54
Селенга	57	-41
Семенов	57	-47
Сергач	58	-44
Сергиев-Посад	56	-48
Серов	56	-52
Серпухов	58	-44
Сестрорецк	53	-36
Сибирцево	57	-42
Сковородино	57	-56
Скопин	61	-40
Скуратово	57	-42
Славгород	60	-48
Сланцы	53	-38
Слободчиково	57	-51
Слюдянка	51	-40
Смоленск	55	-41
Соблаго	55	-47
Советск	56	-35
Советская Гавань	56	-38
Соликамск	56	-48
Соловьевск	61	-52
Сонково	55	-50
Сорочинская	59	-48
Сортавала	51	-41

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя	зимняя
	t _{maxmax}	t _{minmin}
Сосыка	61	-34
Сочи	58	-14
Спас-Демьянск	56	-43
Спасск-Дальний	56	-48
Средняя Нюкжа	58	-61
Сретенск	60	-58
Ставрополь	60	-36
Старая Русса	54	-42
Старица	56	-47
Стародуб	57	-39
Старожилово	58	-40
Староминская	62	-34
Старый Оскол	61	-37
Стерлитамак	60	-48
Сулемка	58	-52
Суоярви	54	-43
Сургут	54	-55
Суриково	56	-62
Суслово	57	-55
Сухиничи	58	-42
Сучан	58	-32
Сущево	55	-44
Сызрань	61	-44
Сычевка	56	-42
Тавда	58	-48
Таганрог	58	-33
Тагул	57	-56
Тайга	57	-53
Тайшет	56	-53
Талдан	60	-52
Таловая	61	-38
Тамань	57	-27
Тамбов	60	-39
Танхой	51	-40
Татарская	60	-47
Тверь	58	-50
Теба	56	-53
Тигей	58	-50
Тихвин	55	-51
Тихорецкая	62	-34
Тогучин	58	-55
Токари	55	-40
Токсово	53	-36
Толмачево	53	-43
Торжок	56	-49
Торопец	55	-46

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя	зимняя
	t _{maxmax}	t _{minmin}
Троицк	60	-46
Туапсе	61	-19
Тула	58	-42
Тулат	56	-60
Тулун	56	-54
Тумнин	57	-48
Тургутуй	58	-52
Турий Рог	59	-39
Туринск	58	-48
Туймазы	60	-50
Тыгда	58	-53
Тында	56	-54
Тюмень	60	-50
Углич	57	-47
Ужур	57	-54
Узловая	58	-42
Уйбат	58	-50
Улан-Удэ	60	-51
Ульяновск	60	-48
Унаха	56	-54
Уоян	57	-60
Урбах	61	-41
Ургал	60	-58
Уса	52	-53
Уссурийск	57	-43
Усть-Кут	58	-55
Усть-Лабинская	63	-31
Усть-Луга	52	-42
Уфа	60	-48
Ухта	55	-53
Уяр	56	-55
Фаленки	57	-46
Фосфоритная	56	-47
Хабаровск	60	-43
Хаджох	61	-34
Хасав-Юрт	61	-29
Хвойная	55	-52
Хибины	52,	-44
Хилок	58	-55
Холмск	50	-29
Целина	61	-34
Цивильск	57	-43
Цимлянская	61	-38
Чайда	56	-63
Чакино	60	-39

Продолжение приложения 1

Железнодорожная станция	Температура рельсов, °С	
	летняя	зимняя
	t _{maxmax}	t _{minmin}
Чара	55	-57
Чебоксары	58	-44
Челябинск	59	-44
Чскунда	60	-58
Ченча	56	-59
Червленая-Узлов	62	-30
Черемхово	55	-52
Череповец	56	-49
Черкесск	60	-31
Чернореченская	58	-59
Чернушка	58	-54
Чернышевск	57	-57
Черняховск	56	-35
Чертково	60	-34
Черусти	58	-45
Чита	59	-52
Чишмы	60	-48
Чудово	54	-46
Чулымская	58	-52
Чульман	55	-61
Чунояр	57	-54
Чусовая	58	-49
Шабалино	56	-45
Шадринск	59	-47
Шарыпово	58	-52
Шарья	56	-44
Шаховская	56	-45
Шахунья	57	-47
Шелковская	62	-30
Шепетовка	58	-36
Шилка	60	-56
Шилово	59	-41
Шимановская	58	-55
Шира	56	-49
Шумерля	57	-42
Шушь	58	-55
Шуя	58	-46
Щербакты	60	-46
Щетинкино	56	-52
Щигры	60	-37
Эльтон	65	-36
Юрьев-Польский	57	-46
Янаул	58	-51
Яр	57	-46
Ярославль	56	-46

Допускаемые повышения температур рельсовых плетей

Тип рельсов	Эпюра шпал	Повышение температуры рельсовой плети [Δt_y], °С, допускаемое по условию устойчивости пути								
		в прямом участке	в кривых радиусом, м							
			2000	1200	1000	800	600	500	400	350
Со щебнем из скальных пород										
P65	2000	58	53	51	49	47	43	41	38	35
	1840	54	50	47	46	44	41	39	36	33
P50	1600	47	43	41	40	38	36	33	—	—
	2000	63	58	55	54	51	48	46	43	39
	1840	57	52	49	48	46	43	41	38	35
	1600	50	46	43	42	40	37	36	—	—
С асбестовым балластом										
P65	2000	55	52	48	47	44	42	39	35	—
	1840	52	48	45	43	41	39	36	32	32
	1600	46	42	39	37	36	34	31	—	29
P50	2000	60	55	52	51	49	47	43	40	—
	1840	55	51	48	47	45	44	39	37	37
	1600	49	45	42	41	39	37	34	—	34
Со щебнем из валунов и гальки										
P65	1840	42	38	35	33	31	27	—	—	—
	1600	36	33	30	29	27	24	—	—	—
P50	2000	52	46	43	41	38	34	—	—	—
	1840	47	42	39	38	35	31	—	—	—
	1600	41	37	34	33	30	27	—	—	—
С гравийным и песчано-гравийным балластом										
P65	1840	42	37	33	32	29	25	—	—	—
	1600	36	32	29	28	25	22	—	—	—
	2000	49	44	40	38	35	30	—	—	—
P50	1840	46	40	36	35	32	27	—	—	—
	1600	39	35	32	30	28	24	—	—	—

Допускаемые понижения температур рельсовых плетей

Скорость, км/ч.	Допускаемое по условию прочности рельсов понижение температуры $[\Delta t_p]$, °С.								
	в прямом участке	в кривых радиусом, м							
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350
Электровоз ВЛ8									
60	101	100	102	102	101	100	99	97	94
Л80	92	91	94	93	93	91	90	88	85
Электровоз ВЛ10									
60	110	106	107	106	104	102	102	97	95
80	103	98	100	99	97	94	92	89	87
К100	96	90	92	91	89	86	84	-	-
Электровозы ВЛ10 с люлочным подвешиванием и ВЛ11									
60	111	107	107	106	104	103	101	100	98
80	105	100	100	99	97	95	93	92	90
К100	98	93	93	92	89	87	85	-	-
Электровозы ВЛ10 ^у , ВЛ82 ^м									
60	107	104	104	103	101	99	97	94	92
80	99	96	97	96	94	91	89	86	83
К100	92	88	89	88	85	83	80	-	-
Электровозы ВЛ22, ВЛ22 ^м , ВЛ61 ^д									
60	106	103	104	104	101	99	97	94	92
80	98	93	95	94	92	89	87	84	82
Л90	94	89	91	89	86	84	82	79	-
Электровоз ВЛ23									
60	105	104	106	105	105	102	100	95	93
80	97	95	98	97	96	93	91	85	82
К100	88	86	89	88	87	84	81	-	-

Скорость, км/ч.	Допускаемое по условию прочности рельсов понижение температуры $[\Delta t_p]$, °С.								
	в прямом участке	в кривых радиусом, м							
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350
Электровоз ВЛ41									
60	108	105	105	105	102	100	98	96	95
70	104	101	102	101	98	96	94	92	90
Электровозы ВЛ60, ВЛ60 ^к , ВЛ60 ^п									
60	109	104	103	102	100	97	93	89	88
80	101	96	95	94	92	88	84	79	77
К100	93	87	87	85	83	78	74	-	-
Электровозы ВЛ80, ВЛ80 ^к , ВЛ82									
60	112	106	106	103	101	99	98	98	98
80	104	98	98	95	93	91	90	90	89
100	96	90	90	87	85	83	82	-	-
К110	93	86	86	83	81	79	-	-	-
Электровозы ВЛ80 ^г , ВЛ80 ^р , ВЛ80 ^с									
60	110	107	108	107	105	102	100	97	95
80	102	99	100	99	97	94	92	89	86
100	95	91	92	91	89	86	84	-	-
К110	91	87	88	88	85	82	-	-	-
Электровоз ВЛ81									
60	111	107	108	106	104	100	98	94	92
80	104	100	101	99	97	93	91	87	84
100	98	94	94	92	90	86	84	-	-
К120	91	87	88	86	83	-	-	-	-
Электровозы ВЛ85, ВЛ65									
60	108	104	105	104	102	99	97	95	89
80	101	97	98	97	95	92	89	87	80
100	94	89	90	89	88	84	80	-	-
К110	91	85	86	85	84	-	-	-	-
Электровозы ЧС1, ЧС3									
60	116	113	114	113	112	111	110	107	105
80	111	108	109	108	107	105	104	101	99
100	106	102	104	103	102	99	98	-	-
К120	100	97	98	97	96	-	-	-	-
Электровозы ЧС2, ЧС2 ^г									
60	121	117	112	109	107	105	102	99	96
80	115	111	106	103	101	98	95	92	89
100	109	105	100	97	95	91	88	-	-
120	103	99	94	91	89	-	-	-	-
140	98	93	88	85	-	-	-	-	-
К160	92	87	81	-	-	-	-	-	-

Скорость, км/ч.	Допускаемое по условию прочности рельсов понижение температуры $[\Delta t_p]$, °С.								
	в прямом участке	в кривых радиусом, м							
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350
Электровозы ЧС4, ЧС4Г									
60	113	113	111	110	109	107	105	102	100
80	107	107	105	104	103	101	99	95	93
100	101	101	99	98	97	95	92	-	-
120	95	95	93	92	90	-	-	-	-
140	89	89	87	86	-	-	-	-	-
К160	82	83	80	-	-	-	-	-	-
Электровозы ЧС7, ЧС8									
60	117	114	111	109	106	103	99	94	91
80	111	109	105	103	100	96	92	87	83
100	106	103	99	97	94	89	85	-	-
120	100	97	93	91	-	-	-	-	-
140	95	92	87	84	-	-	-	-	-
К160	89	86	81	-	-	-	-	-	-
Электровоз ЧС200									
60	119	116	112	110	107	105	101	96	93
80	114	111	107	105	102	99	95	90	87
100	109	106	102	100	97	93	89	-	-
120	104	101	97	95	92	-	-	-	-
140	99	96	92	89	-	-	-	-	-
160	94	91	86	-	-	-	-	-	-
Тепловозы М62, 2М62									
60	118	116	116	115	114	112	110	107	105
80	113	111	111	110	108	106	104	101	99
К100	107	105	105	104	102	100	98	-	-
Тепловоз ТГ102									
60	119	114	114	114	112	109	107	105	104
80	114	109	109	108	106	103	101	99	98
100	109	104	104	102	100	97	95	-	-
К120	103	98	98	96	94	-	-	-	-
Тепловоз ТГ106									
60	115	111	110	108	106	103	100	97	95
80	110	105	105	102	100	96	94	90	88
К100	104	99	99	96	94	90	87	-	-
Тепловоз ТЭ1									
60	107	106	107	106	106	104	100	95	92
80	98	97	98	97	97	94	90	84	80
К95	90	89	91	90	89	86	82	76	-
Тепловоз ТЭ2									
60	112	112	113	113	113	112	108	104	102
80	105	105	106	106	106	104	101	96	93
К95	99	99	100	100	100	98	94	89	-

Скорость, км/ч.	Допускаемое по условию прочности рельсов понижение температуры $[\Delta t_p]$, °С.								
	в прямом участке	в кривых радиусом, м							
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350
Тепловозы ТЭЗ, 2ТЭЗ, 3ТЭЗ									
60	111	108	108	107	104	101	99	97	95
80	103	100	101	100	97	93	90	88	96
К100	95	92	93	92	88	84	81	-	-
Тепловоз ТЭ7									
60	111	110	108	106	104	100	97	94	93
80	103	102	100	98	95	91	88	85	84
100	95	94	92	90	86	82	79	-	-
120	87	86	83	81	77	-	-	-	-
К140	78	77	74	72	-	-	-	-	-
Тепловозы ТЭ10, 2ТЭ10									
60	108	105	105	104	101	97	95	93	91
80	100	97	98	97	93	89	87	84	82
К100	93	89	90	89	85	80	78	-	-
Тепловозы ТЭ10В, 2ТЭ10В, 3ТЭ10В, 2ТЭ10М, 3ТЭ10М									
60	112	110	110	109	105	102	98	92	89
80	105	103	103	102	97	94	90	84	79
К100	98	96	96	95	90	86	82	-	-
Тепловоз ТЭ10Л									
60	110	108	108	107	104	100	98	96	94
80	103	100	100	100	96	92	90	87	86
К100	96	92	93	92	88	84	81	-	-
Тепловозы 2ТЭ10Л, 3ТЭ10Л									
60	106	103	103	102	101	98	95	93	90
80	99	95	96	95	93	89	87	84	81
К100	91	87	88	87	85	81	78	-	-
Тепловоз ТЭ109									
60	113	114	114	113	113	110	108	103	100
80	106	108	108	107	107	104	102	97	94
100	100	102	102	101	101	98	96	-	-
120	93	97	96	96	95	-	-	-	-
К140	87	91	90	89	-	-	-	-	-
Тепловоз 2ТЭ116									
60	113	111	111	110	106	103	100	94	90
80	107	104	105	104	99	96	92	85	81
К100	100	97	98	97	91	88	83	-	-
Тепловоз 2ТЭ121									
60	109	106	106	104	101	95	91	85	80
80	102	98	99	98	94	87	83	75	70
К100	95	91	92	90	86	79	73	-	-

Скорость, км/ч.	Допускаемое по условию прочности рельсов понижение температуры $[\Delta t_p]$, °С.								
	в прямом участке	в кривых радиусом, м							
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350
Тепловоз ТЭМ1									
60	110	107	107	106	104	100	98	95	93
80	103	99	100	99	96	91	89	86	84
К100	95	91	92	90	86	79	73	-	-
Тепловозы ТЭП10, ТЭП10Л									
60	111	110	108	107	105	101	99	97	95
80	104	103	101	100	97	93	91	88	87
100	97	96	94	93	89	85	82	-	-
120	89	89	86	85	81	-	-	-	-
К140	81	81	78	77	-	-	-	-	-
Тепловозы ТЭП60, 2ТЭП60									
60	120	118	114	112	110	107	104	100	98
80	114	112	108	106	104	101	98	94	91
100	108	106	102	100	98	95	91	-	-
120	102	100	96	94	92	-	-	-	-
К160	90	88	84	-	-	-	-	-	-
Тепловоз ТЭП70									
60	122	119	116	114	114	111	110	106	104
80	118	115	112	110	110	106	105	101	98
100	114	111	108	106	105	101	100	-	-
120	110	107	104	102	100	-	-	-	-
140	106	103	99	97	-	-	-	-	-
К160	101	98	95	-	-	-	-	-	-
Тепловоз ТЭП80									
60	122	117	116	115	112	109	107	104	102
80	118	112	112	110	107	104	101	97	95
100	114	107	107	104	101	98	95	-	-
120	109	102	101	99	96	-	-	-	-
140	104	97	96	94	-	-	-	-	-
К160	99	91	91	-	-	-	-	-	-
Электропоезда ЭР1, ЭР2									
60	120	118	117	116	114	110	108	105	103
80	115	113	112	111	109	105	103	100	98
100	110	108	107	106	104	100	98	-	-
120	105	104	103	101	100	-	-	-	-
К130	103	101	100	99	97	-	-	-	-
Электропоезд ЭР9 ^г									
60	120	118	117	116	114	110	108	105	103
80	115	113	112	111	109	105	103	100	98
100	110	108	107	106	104	100	98	-	-
120	105	104	102	101	99	-	-	-	-
К130	103	101	100	98	96	-	-	-	-

Скорость, км/ч.	Допускаемое по условию прочности рельсов понижение температуры $[\Delta t_p]$, °С.								
	в прямом участке	в кривых радиусом, м							
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350
Электропоезд ЭР22									
60	113	111	110	110	109	104	102	98	96
80	108	106	105	105	103	98	96	92	90
100	103	101	100	99	97	92	90	-	-
120	98	96	95	93	91	-	-	-	-
К130	103	101	100	98	96	-	-	-	-
Электропоезд ЭР2 ^Р									
60	112	111	112	111	109	107	105	103	101
80	107	106	107	106	104	101	100	97	95
100	102	100	102	101	99	95	94	-	-
120	96	95	96	96	93	-	-	-	-
К130	93	92	94	93	91	-	-	-	-
Электропоезд ЭТ2									
60	120	119	120	119	117	114	113	111	109
80	116	115	116	115	113	110	108	105	103
100	112	110	111	111	108	105	103	-	-
120	107	105	107	106	103	-	-	-	-
К130	105	103	105	104	101	-	-	-	-
Электропоезда ЭР2 ^Г , ЭД2 ^Г , ЭД4, ЭД4 ^М , ЭД9 ^Г									
60	116	115	116	115	113	110	109	106	105
80	111	110	111	111	109	105	104	101	99
100	106	105	107	106	104	100	98	-	-
120	101	100	102	101	99	-	-	-	-
К130	98	97	99	99	96	-	-	-	-
Электропоезд ЭР200									
60	127	124	124	124	123	120	118	116	114
80	123	120	120	120	119	116	114	112	110
100	119	116	116	116	115	112	110	-	-
120	115	112	112	112	112	-	-	-	-
140	111	108	108	-	-	-	-	-	-
160	107	103	104	-	-	-	-	-	-
180	103	100	-	-	-	-	-	-	-
К200	99	96	-	-	-	-	-	-	-

Оптимальные температуры закрепления плетей на железных дорогах России

Железная дорога	Оптимальная температура закрепления плетей t_{opt} , °С	
	Общая	Исключение
Октябрьская	30±5	Севернее С.-Петербурга $t_{onm} = 25±5$
Калининградская	30±5	—
Московская	30±5	—
Горьковская	25±5	В кривых $R < 500$ м $t_{onm} = 30±5$
Северная	25±5	В кривых $R < 500$ м $t_{onm} = 30±5$
Северо - Кавказская	35±5	—
Юго-Восточная	35±5	—
Приволжская	35±5	—
Куйбышевская	30±5	В кривых $R < 500$ м $t_{onm} = 33±3$
Свердловская	25±5	В кривых $R < 500$ м, расположенных В районах с $t_{min\ min} < -50$, $t_{onm} = 28±3$
Южно-Уральская	30±5	В кривых $R < 500$ м $t_{onm} = 32±3$
Западно - Сибирская	30±5	В кривых $R < 500$ м, расположенных в районах с $t_{min\ min} < -50$, $t_{onm} = 29±3$
Красноярская	25±5	В кривых $R < 500$ м, расположенных в районах с $t_{min\ min} < -50$, $t_{onm} = 28±3$
Восточно-Сибирская	25±5	В кривых $R < 500$ м, расположенных В районах с $t_{min\ min} < -50$, $t_{onm} = 28±3$
Забайкальская	25±5	В кривых $R < 500$ м, расположенных в районах с $t_{min\ min} < -50$, $t_{onm} = 28±3$
Дальневосточная	30±5	—

Оптимальные температуры закрепления плетей на железных дорогах России

Железные дороги	Предельные значения		ТУ-2000	Временные нормы	Примечание
	$t_{\min\min}^{\circ\text{C}}$	$t_{\max\max}^{\circ\text{C}}$			
Калининградская	-33+-35	+56	30 ± 5	35 ± 5	
Октябрьская	-36+-51	+52++58	30 ± 5	35 ± 5 *	*Петрозаводское и Мурманское отделения 30 ± 5
Московская	-38+-47	+56++61	30 ± 5	35 ± 5	
Горьковская	-42+-54	+56++59	25 ± 5	35 ± 5	
Северная	-45+-54	+53++59	25 ± 5	35 ± 5 *	*Севернее Коноши 30 ± 5
Северо-Кавказская	-14+-40	+58++62	35 ± 5	40 ± 5	
Юго-Восточная	-34+-42	+57++63	35 ± 5	40 ± 5	
Приволжская	-34+-43	+57++65	35 ± 5	40 ± 5	
Куйбышевская	-40+-50	+58++62	30 ± 5	35 ± 5	
Свердловская	-43+-52	+56++60	25 ± 5	35 ± 5	
Южно-Уральская	-42+-49	+58++62	30 ± 5	35 ± 5	
Западно-Сибирская	-46+-54	+58++62	30 ± 5	35 ± 5 *	*Кемеровское отделение 30 ± 5
Красноярская	-49+-62	+56++59	25 ± 5	30 ± 5	
Восточно-Сибирская	-40+-54	+55+60	25 ± 5	35 ± 5 *	*Участок Тайшет – Ханя 30 ± 5
Забайкальская	-49+-58	+57++60	25 ± 5	35 ± 5	
Дальневосточная	-29+-54	+56++60	30 ± 5	35 ± 5 *	*Участки Хани – Комсомольск-на-Амуре, Штуры-Нерюнгри 30 ± 5
Сахалинская	-28+-49	+50++58	30 ± 5	35 ± 5	

Исходные данные для выполнения расчетно-графической работы

№ варианта	t _{max} , °C	t _{min} , °C	Допускаемое повышение температуры рельсовых плетей, [Δt _y], °C			Допускаемое понижение температуры рельсовых плетей, [Δt _p], °C			Коэффициент вязкости ξ*10 ⁸ , кН*м/с ²	Погонное сопротивление γ, кН/м		Тип рельсов	Приведенный износ δ, мм	Сопротивление стыка R _{ст} , кН	Температура зимой, t ₁ , °C	Промежуток времени τ, час	Начальная стрела f ₀ , мм	Стрела f, см
			Эпюра, шт/км	Балласт	R, м	Скорость, км/ч	Электровоз	R, м		Летом γ _л	Зимой γ _з							
1	55	25	1840	щеб.из валунов и гальки	800	60	ВЛ41	800	0,32	6	12	R65	6	120	20	81	8	80
2	59	28	2000	асбестовый	500	80	ТЭЗ	500	0,31	5	10			85	25	90	5	60
3	58	30	1840	щеб.из скальных пород	500	60	ВЛ11	500	0,29	8	22			50	29	60	10	90
4	62	33	2000	щеб.из скальных пород	500	80	ВЛ80	500	0,41	9	24			115	33	75	15	70
5	63	35	1840	щеб.из скальных пород	600	80	ВЛ10 ^у	600	0,28	7	14			95	24	80	23	110
6	60	31	2000	щеб.из скальных пород	600	80	ВЛ11	600	0,27	10	25			70	28	92	7	50
7	56	27	1840	грав.и песч.-гравийный	600	80	ВЛ10	600	0,40	6	15			25	31	88	11	100
8	58	32	1840	асбестовый	600	60	ВЛ41	600	0,35	8	24			100	22	77	16	65
9	61	40	1840	щеб.из валунов и гальки	600	100	ЧС4	600	0,39	7	18			45	26	65	6	85
10	55	37	1840	асбестовый	600	80	ВЛ11	600	0,33	9	25			18	32	96	24	115
11	57	42	2000	асбестовый	400	60	ВЛ10	400	0,36	5	16			80	23	84	14	95
12	59	44	1840	асбестовый	400	60	ВЛ41	400	0,42	6	20			30	27	72	17	105
13	63	45	2000	щеб.из скальных пород	400	80	ЧС1	400	0,38	10	23			40	34	64	20	55
14	58	39	1840	асбестовый	500	60	ВЛ8	500	0,34	7	21			135	21	95	13	88
15	61	26	2000	асбестовый	600	60	ВЛ10	600	0,44	5	13			60	30	76	18	75
16	56	29	1840	асбестовый	600	60	ВЛ10 ^у	600	0,37	9	22			35	35	85	21	108
17	62	34	2000	щеб.из скальных пород	800	60	ВЛ10	800	0,30	6	19			110	40	98	12	94
18	55	36	1840	грав.и песч.-гравийный	800	60	ВЛ60	800	0,45	7	22			55	38	67	19	67
19	58	41	2000	асбестовый	800	60	ВЛ11	800	0,50	8	24			130	42	100	22	83
20	60	38	1840	асбестовый	800	70	ВЛ41	800	0,43	10	21			20	36	62	9	77
21	63	43	1840	щеб.из скальных пород	400	60	ЧС2	400	0,48	5	11			75	44	79	28	102
22	59	45	1840	асбестовый	800	60	ВЛ23	800	0,51	7	23			105	37	82	26	57
23	61	35	1840	грав.и песч.-гравийный	800	80	ВЛ80 ^г	800	0,46	9	24			65	39	99	29	112
24	57	40	1840	щеб.из скальных пород	800	60	ВЛ80 ^к	800	0,49	6	17			90	41	61	30	72
25	62	38	2000	щеб.из скальных пород	350	60	ВЛ8	350	0,47	10	20			140	43	71	27	81

Учебное издание

Новакович Василий Иванович
Корниенко Елена Владимировна
Карпачевский Вячеслав Вадимович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

Печатается в авторской редакции
Технический редактор Т.М. Чеснокова

Подписано в печать 30.12.15. Формат 60×84/16.
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,32.
Тираж экз. Изд. № 50220. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.