

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

---

**БЕССТЫКОВОЙ ПУТЬ СО СВЕРХДЛИННЫМИ**  
**РЕЛЬСОВЫМИ ПЛЕТЯМИ**

Учебно-методическое пособие

Ростов-на-Дону  
2021

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

Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями: учебно-методическое пособие / В. И. Новакович, В. В. Карпачевский, Е. В. Корниенко, В. В. Шубитидзе; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2021. – 23 с. – Библиогр.: с. 21.

Изложены основы теории, темы и краткое содержание практических занятий, приведены рекомендации по написанию расчетно-графической работы по дисциплине «Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями» и курсовой работы по дисциплине «Инновационные технологии в путевом хозяйстве». Описаны методы расчетов бесстыкового пути, которые легли в основу ряда технологических приемов, позволивших применить рельсовые плети бесстыкового пути до протяженности перегона и более; 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 по 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 слушателей курсов повышения квалификации и обучающихся магистратуры направления «Строительство», профиль «Проектирование, сооружение и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры».

Одобрено к изданию кафедрой «Путь и путевое хозяйство».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Теоретические основы расчета бесстыкового пути на устойчивость .....	4
1.1	Расчет допускаемых повышений температуры рельсовых плетей по условиям устойчивости бесстыкового пути .....	4
2	Теоретические основы расчета бесстыкового пути на прочность .....	8
2.1	Расчет допускаемых понижений температуры рельсовых плетей по условиям прочности рельсов бесстыкового пути .....	8
2.2	Расчет допускаемых понижений температуры рельсовых плетей по условиям прочности стыковых болтов и по величине раскрытия зазора при изломе рельсов бесстыкового пути .....	10
3	Расчет интервалов закрепления плетей .....	13
3.1	Эпюра температурных продольных сил .....	13
4	Определение влияния температуры закрепления плетей на возможности выполнения путевых работ .....	14
5	Определение величины зазора при изломе рельсовой плети в зимнее время .....	15
6	Расчет продольных сил и деформаций в рельсовых плетях бесстыкового пути, возникающих во время производства ремонтных работ .....	16
6.1	Сопrotивление сдвигу рельсов вдоль оси пути .....	16
6.2	Изменение сил при работе машин тяжелого типа .....	17
7	Продольная сила, необходимая для выпрямления, приложенная на конце изогнутого участка .....	20
	Библиографический список .....	21
	Приложение .....	22

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

## 1.1 Расчет допустимых повышений температуры рельсовых плетей по условиям устойчивости бесстыкового пути

При повышении температуры рельсов по сравнению с температурой закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути в рельсах возникает продольная сжимающая сила, которая может вызвать потерю устойчивости колеи.

Математической моделью бесстыкового пути является упругий стержень, помещенный в вязкую среду [1].

Расчетная схема (рис. 1.1) – это упругий стержень, имеющий начальный изгиб на длине  $l$  со стрелой  $f_0$ , на который воздействует продольная сила (со знаком «+» – растягивающая, и со знаком «-» – сжимающая). Изгибу упругого стержня сопротивляется погонная распределенная сила  $q$ , при этом  $q$  может считаться чисто вязким погонным сопротивлением ( $q = \xi \dot{y}$ ).

Изгибу стержня сопротивляются внутренние силы, зависящие от максимальной кривизны ( $\rho$  – радиус кривизны) изогнутой оси стержня

$$\frac{1}{\rho} = y'' = \frac{M}{EI}. \quad (1.1)$$

Уравнением равновесия является сумма моментов всех внешних и внутренних сил, равная нулю:

$$\sum M = EIy'' - Fy + \frac{qx^2}{2} = 0. \quad (1.2)$$

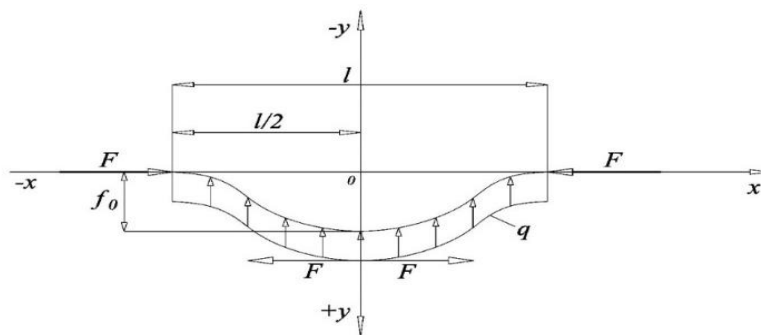


Рис. 1.1. Расчетная схема изгиба упругого стержня

В (1.2) продольная сжимающая сила  $F$  является активной силой, а погонное сопротивление  $q$  и внутренние силы сопротивления изгибу упругого стержня  $EJ$  – это реактивные силы.

Дважды дифференцируя (1.2) по  $x$ , получим:

$$EIy^{IV} - Fy'' + q = 0. \quad (1.3)$$

Найдем решения дифференциального уравнения (3) с учетом зависимости  $q = \xi \dot{y}$ .

Решение однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (1.3) может быть найдено методом Фурье, как произведение двух функций:

$$y(x, \tau) = U(x)f(\tau), \quad (1.4)$$

где  $U(x)$  – функция, определяющая положение упругого стержня в двухмерном пространстве;

$f(\tau)$  – функция, представляющая изменение положения упругого стержня во времени.

Подставляя (1.4) в (1.3), получим

$$EIU^{IV}(x)f(\tau) - FU''(x)f(\tau) + \xi U(x)\dot{f}(\tau) = 0. \quad (1.5)$$

Разделяя переменные, получим:

$$EI \frac{U^{IV}(x)}{U(x)} - F \frac{U''(x)}{U(x)} = -\xi \frac{\dot{f}(\tau)}{f(\tau)}. \quad (1.6)$$

Если обозначить левую и правую части (1.6) через  $Q$ , будем иметь два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\left. \begin{aligned} EIU^{IV}(x) - FU''(x) + QU(x) &= 0 \\ \xi \dot{f}(\tau) - Qf(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (1.7)$$

В первом уравнении (1.7) обозначим:

$$p = F/4EI, \quad r = Q/4EI. \quad (1.8)$$

Тогда характеристическим уравнением будет:

$$z^4 - 4pz^2 + 4r = 0. \quad (1.9)$$

Корнями (1.9) будут:

$$z = \pm \sqrt{2} \sqrt{p \pm \sqrt{p^2 - r}}. \quad (1.10)$$

В общем случае

$$z = \pm(\alpha \pm i\beta). \quad (1.11)$$

Общее решение первого дифференциального уравнения (1.7), выраженное через гиперболические и тригонометрические функции, будет:

$$U(x) = Ach\alpha x \cos \beta x + Bch\alpha x \sin \beta x + Csh\alpha x \cos \beta x + Dsh\alpha x \sin \beta x. \quad (1.12)$$

Из соображения симметрии, т. е.  $U(x) = U(-x)$ :

$$U(x) = Ach\alpha x \cos \beta x. \quad (1.13)$$

Граничными условиями в соответствии с выбором системы координат для (1.7) будут  $U(\pm l/2) = 0$ .

Тогда  $Ach(\alpha l/2) \cos(\beta l/2) = 0$ ,  $\cos(\beta l/2) = 0$ ,  $\beta = \frac{\pi}{l}$ . Зная  $\beta$ , можно найти  $\alpha$  и  $r$ :

$$z^2 = \alpha^2 - \beta^2 \pm 2i\alpha\beta = 2\left(p + \sqrt{p^2 - r}\right) = 2p \pm 2i\sqrt{r - p^2}. \quad (1.14)$$

Приравнявая действительные и мнимые части комплексных чисел (1.14), найдем:

$$\alpha = \sqrt{\frac{F}{2EI} + \frac{\pi^2}{l^2}}; r = \left( \frac{F}{4EI} + \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2. \quad (1.15)$$

Тогда

$$Q = 4EIr = 4EI \left( \frac{F}{4EI} + \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2. \quad (1.16)$$

Решением второго дифференциального уравнения (1.7) будет:

$$f(\tau) = C \exp \frac{Q\tau}{\xi}, \quad (1.17)$$

где  $C$  – константа интегрирования.

Постоянную интегрирования в (1.17) без нарушения общности можно принять равной единице.

Таким образом, общее решение имеет вид

$$y(x, \tau) = A \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot C \exp \frac{Q\tau}{\xi}; \quad (1.18)$$

$$y(x, \tau) = A_0 \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot \exp \frac{Q\tau}{\xi}, \quad (1.19)$$

где  $A_0 = AC$ .

Используя начальное условие  $y(0,0) = f_0$ , получим  $A_0 = f_0$ .

Тогда

$$y(x, \tau) = f_0 \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x \cdot \exp \frac{Q\tau}{\xi}. \quad (1.20)$$

А с учетом (1.16) и (1.17) можем записать:

$$y(x, \tau) = f_0 \operatorname{ch} x \left( \sqrt{\frac{F}{2EI} + \frac{\pi^2}{l^2}} \right) \cos \frac{\pi x}{l} \exp \left( \frac{4EI}{\xi} \left( \frac{F}{4EI} + \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2 \tau \right). \quad (1.21)$$

Найденное решение интересует в точке  $x = 0$ , где максимальная стрела изгиба рельсов в плане:

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left( \frac{4EI}{\xi} \left( \frac{F}{4EI} + \frac{\pi^2}{l^2} \right)^2 \tau \right). \quad (1.22)$$

При  $l^2 = 8\pi^2 \frac{EI}{F}$ , что соответствует расчетной схеме,

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left( \frac{4EI}{\xi} \left( \frac{3F}{8EI} \right)^2 \tau \right);$$

$$y(0, \tau) = f_0 \exp \left( \frac{9F^2 \tau}{16EI\xi} \right). \quad (1.23)$$

График функции (1.23) имеет вид, представленный на рис. 1.2.

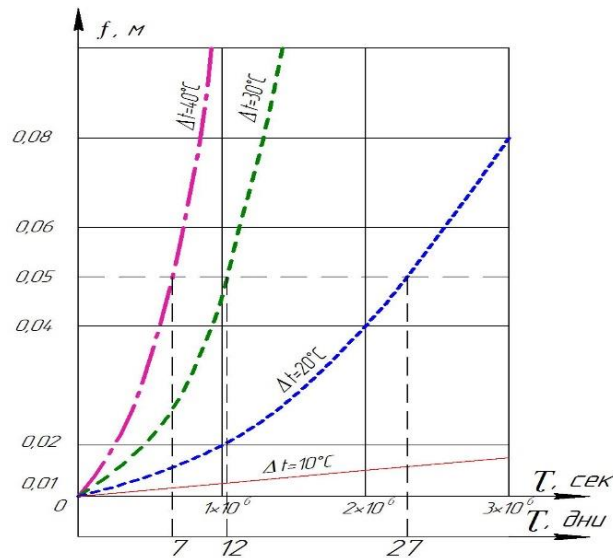


Рис. 1.2. Зависимость роста начальной стрелы во времени при превышении температуры закрепления  $\Delta t = 10, 20, 30$  и  $40^\circ\text{C}$

По результатам расчета, приведенным на рис. 1.2, видно, что при среднесуточном превышении температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути на  $10^\circ\text{C}$ , рост стрел изгиба за время 400 часов (что соответствует двухнедельному периоду – обычному периоду между очередными проходами путеизмерителей) не представляет опасности для движения поездов. При среднесуточном превышении температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути на  $20^\circ\text{C}$  и более рост стрел изгиба за тот же период значительно увеличивается, чего допускать нельзя.

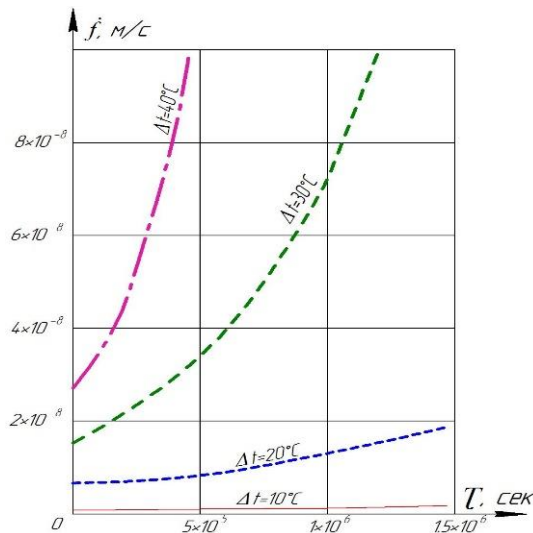


Рис. 1.3. График скорости роста стрелы при различных температурах закрепления рельсовых плетей

Если взять первую производную по времени от (1.23), получим:

$$\dot{f} = \frac{f_0 F^2}{16EI\xi} \exp\left(\frac{F^2 \tau}{16EI\xi}\right). \quad (1.24)$$

Зависимость (1.24) также следует использовать при назначении температуры закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути. Для обеспечения безопасности движения поездов необходимо заблаговременно знать, какая будет скорость роста стрелы изгиба рельсов в плане, чтобы вовремя успеть устранить эту неисправность, не прибегая к ограничению скорости движения поездов или к закрытию движения на перегоне.

Таким образом, минимальная температура закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути должна быть такой, чтобы среднесуточная ( $t_{\text{средн}}$ ) температура рельсов в период самых высоких летних температур, действующих в течение двухнедельного срока, не превышала её более чем на  $\Delta t_y = 10^\circ\text{C}$ . Среднесуточную температура рельсов в период самых высоких летних температур, действующих в течение двухнедельного срока, можно приближенно найти из следующего выражения:

$$t_{\text{средн}} = \frac{(\max t_{\text{средн}} + \min t_{\text{средн}})}{2}, \quad (1.25)$$

где  $\max t_{\text{средн}}$  и  $\min t_{\text{средн}}$  – это максимальная и минимальная среднесуточная температура рельсов, действующая в течение двухнедельного срока, в самое жаркое время года.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА БЕССТЫКОВОГО ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ

### 2.1 Расчет допускаемых понижений температуры рельсовых плетей по условиям прочности рельсов бесстыкового пути

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

$$k_n \sigma_k + \sigma_t \leq [\sigma], \quad (2.1)$$

где  $k_n$  – коэффициент запаса прочности ( $k_n = 1,3$ )

$\sigma_k$  – напряжения в кромках подошвы рельса от изгиба при максимально допустимом вертикальном прогибе, МПа;

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

$[\sigma]$  – минимальный условный предел упругости для рельсовой стали  $[\sigma] = 800$  МПа [2].

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

$$\sigma_t = \alpha E \Delta t \approx 2,5 \Delta t, \quad (2.2)$$



где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения рельсовой стали ( $\alpha = 0,0000118$  1/град);

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

$\Delta t$  – 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 температурой при ее закреплении:

$$\Delta t_p = \frac{[\sigma] - k_n \sigma_k}{\alpha E}. \quad (2.3)$$

Здесь  $\sigma_k$  – это кромочные напряжения в подошве рельсов, которые в Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [3] предлагалось вычислять по следующей формуле:

$$\sigma_k = \frac{fP_{\text{экв}}^I}{4kW}, \quad (2.4)$$

где  $f$  – коэффициент учитывающий боковой изгиб и кручение рельса;

$$P_{\text{экв}}^I = P_{\text{max}} + 2,5S + \Sigma P_i \mu_i, \quad (2.5)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальная динамическая сила, передаваемая от колеса на рельс;

$S$  – среднее квадратическое отклонение композиции динамических добавок от различных факторов (от колебания рессор, влияния неровностей на рельсе, влияния изолированных и непрерывных неровностей на колесе);

2,5 – это нормирующий множитель, приводящий значение  $P_{\text{max}}$  к величине, превышение которой составляет вероятность 0,6 %;

$\Sigma P_i \mu_i$  – член, учитывающий влияние соседних колес на колесо, находящееся в расчетном сечении.

Результаты расчетов по (2.4) при любых самых неблагоприятных исходных данных (скоростях движения, осевых нагрузках, механических характеристиках элементов подвижного состава и верхнего строения пути) показывают, что кромочные напряжения не превышают 200 МПа.

Температурные напряжения также не могут превышать 200 МПа.

В предпосылках и допущениях к расчету по [3] предполагалось, что рельсошпальная решетка лежит на абсолютно ровном основании, что далеко от реальности. Если учесть допустимые неровности рельсов в плане и профиле и вычислить возникающие в пределах этих неровностей кромочные напряжения, то оказывается, что даже при самых крутых неровностях, допускаемых при минимальных скоростях движения [4], кромочные напряжения составляют значения не более 200 МПа. Таким образом, можно сделать вывод о том, что расчет рельсов на прочность по допускаемым напряжениям не имеет практического смысла, поскольку даже при сложении всех названных выше напряжений (чего делать нельзя, поскольку их одновременное возникновение практически невероятно) не превышает минимальный предел упругости рельсовой стали. Вследствие этого такой расчет должен быть изъят из употребления.

## 2.2 Расчет допустимых понижений температуры рельсовых плетей по условиям прочности стыковых болтов и по величине раскрытия зазора при изломе рельсов бесстыкового пути

Закрепление плетей при высоких температурах может привести к образованию большого зазора при сквозном изломе плети в холодное время года или к разрыву болтов в стыках в пределах уравнительных пролетов.

Реологической моделью бесстыкового железнодорожного пути, которую следует положить в основу расчета напряженно-деформированного его состояния, является упругий стержень (рельс), находящийся в вязкой среде (балласте, сотрясаемом проходящими поездами). Графически данная модель представлена в следующем виде (рис. 2.1).

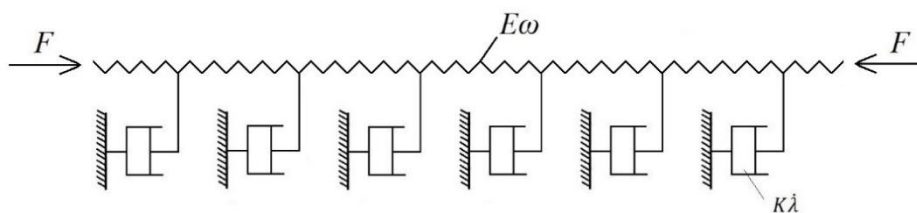


Рис. 2.1. Реологическая модель бесстыкового пути

В данной модели шпала является абсолютно твердым телом, передвигаемым в вязкой среде под действием силы, передаваемой на неё от рельса, по закону вязкости Ньютона:

$$r = K \cdot \dot{\lambda}, \quad (2.6)$$

где  $K$  – коэффициент вязкости балласта при смещении шпалы вдоль оси пути;  $\dot{\lambda}$  – скорость перемещения шпалы вдоль оси пути.

Таким образом, в расчетах бесстыкового пути с учетом воздействия поездов, следует принимать сопротивление балласта сдвигу шпал зависящим не от массы шпалы, а от её формы и скорости перемещения, характеризуемых коэффициентом вязкости щебеночного балласта.

Дифференциальное уравнение изменений продольных перемещений, соответствующее найденной модели (см. рис. 1.3):

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} = N^2 \frac{\partial \lambda}{\partial \tau}, \quad (2.7)$$

где  $N = \sqrt{\frac{K}{E\omega}}$  – продольный коэффициент относительной вязкости бесстыкового пути с размерностью  $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$ .

После дифференцирования  $r = K \cdot \dot{\lambda}$  и  $r = dF/dx$  по  $\tau$ , а  $F = E\omega d\lambda/dx$  по  $x$  и при подстановках получим дифференциальное уравнение изменения продольных сил:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = N^2 \frac{\partial F}{\partial \tau}. \quad (2.8)$$

Решим поставленную задачу с использованием метода разделения переменных и суперпозиции частных решений – методом Фурье.

Будем искать частное решение уравнения (2.8) в виде произведения двух функций:

$$F(x, \tau) = T(\tau) X(x). \quad (2.9)$$

где  $T(\tau)$  – функция, зависящая только от времени  $\tau$ ;

$X(x)$  – функция, зависящая только от координаты  $x$ .

Подставляя данные уравнения (2.8) в выражение (2.9), получим:

$$N^2 T'(\tau) X(x) = T(\tau) X''(x), \quad (2.10)$$

разделяя переменные:

$$N^2 \frac{T'(\tau)}{T(\tau)} = \frac{X''(x)}{X(x)}. \quad (2.11)$$

Поскольку ни правая, ни левая части уравнения (2.11) не могут зависеть ни от  $x$ , ни от  $\tau$ , обе они должны быть постоянными. Обозначим эту постоянную через  $-C^2$ . Значение постоянной принято отрицательным.

Тогда имеем два обыкновенных дифференциальных уравнения

$$N^2 T'(\tau) + C^2 T(\tau) = 0, \quad (2.12)$$

$$X''(x) + C^2 X(x) = 0. \quad (2.13)$$

Общие их решения имеют следующий вид:

$$T(\tau) = \exp\left(-\frac{C^2 \tau}{N^2}\right), \quad (2.14)$$

$$X(x) = A \cos xC + B \sin xC. \quad (2.15)$$

При определении законов изменения продольных сил и перемещений в бесстыковом пути на его концевых участках необходимо рассматривать полу-бесконечную рельсовую плеть ( $0 < x < \infty$ ).

В случае постоянной температурной силы в рельсовой плети граничное и начальное условия для решения уравнения (2.8) могут быть представлены в следующем виде:

$$F|_{x=0} = 0, \quad F|_{\tau=0} = F_0. \quad (2.16)$$

Решение можно получить, применяя закон изменения продольных сил (2.8) для бесконечной рельсовой плети. При удовлетворении нового граничного условия решение получим в следующем виде:

$$F(x, \tau) = \frac{NF_0}{2\sqrt{\pi\tau}} \int_0^\infty \left\{ \exp\left[-\frac{N^2(x-\xi)^2}{4\tau}\right] - \exp\left[-\frac{N^2(x+\xi)^2}{4\tau}\right] \right\} d\xi. \quad (2.17)$$

Разбивая интеграл на два слагаемых, вводя новые переменные интегрирования, получим:

$$F(x, \tau) = F_0 \operatorname{erf}\left(\frac{Nx}{2\sqrt{\tau}}\right). \quad (2.18)$$

На рис. 2.2 показан характер изменения температурной продольной силы на конечном участке бесстыкового пути в случае постоянного и длительного отступления температуры рельсов от температуры их закрепления.

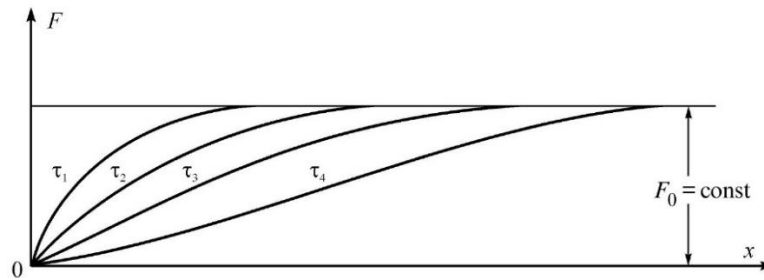


Рис. 2.2. Закон изменения  $F(x, \tau)$  на конце рельсовой плети при  $F_0 = \text{const}$

Площадь эпюры продольной силы на конце рельсовой плети (2.18) отличается от площади в ее середине величиной  $\lambda E\omega/2$ , пропорциональной перемещению конца  $\lambda$ , т. е.

$$\lambda E\omega = F_0 \left( x - \int_0^x \operatorname{erf} \left( \frac{Nx}{2\sqrt{\tau}} \right) dx \right). \quad (2.19)$$

Поскольку

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{2!5} - \frac{z^7}{3!7} + \dots \right), \quad (2.20)$$

то с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2z}{\sqrt{\pi}}. \quad (2.21)$$

Тогда зазор на конце двух рельсовых плетей, включая случай её излома, может быть определен по следующей формуле:

$$\lambda_3 = 2\lambda = \frac{2F_0 x}{E\omega} \left( 1 - \frac{Nx}{\sqrt{\pi\tau}} \right). \quad (2.22)$$

Из формул (2.18) и (2.21) следует, что

$$x = \frac{\sqrt{\pi\tau}}{N}. \quad (2.23)$$

Учитывая выражение (2.23), из (2.22) получим:

$$\lambda_3 = \frac{F_0 \sqrt{\pi\tau}}{NE\omega}. \quad (2.24)$$

Если  $F_0$  – длительно сохраняющаяся продольная температурная сила постоянной величины или с среднесуточная за две недели, то

$$\lambda_3 = \frac{\alpha \sqrt{\pi\tau\Delta t}}{N} \quad (2.25)$$

или

$$\lambda_3 = \frac{\alpha \sqrt{\pi E\omega\tau\Delta t}}{\sqrt{K}}. \quad (2.26)$$

### 3 РАСЧЕТ ИНТЕРВАЛОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЛЕТЕЙ

Границы расчетного интервала закрепления, т. е. самую низкую ( $\min t_3$ ) и самую высокую ( $\max t_3$ ) температуры закрепления, следует определять по формулам:

$$\max t_3 = t_{\max \text{ срсут}} - \Delta t_y, \quad (3.1)$$

$$\min t_3 = t_{\min \text{ срсут}} + \Delta t_p. \quad (3.2)$$

В приложении к настоящему учебно-методическому пособию даны исходные данные по вариантам к выполнению расчетно-графической работы (РГР). В вариантах указаны разные значения  $t_{\max \text{ срсут}}$  и  $t_{\min \text{ срсут}}$ .

#### 3.1 Эпюра температурных продольных сил

Продольная температурная сила в середине плети и в статике, и с учетом воздействия поездов определяется по формуле:

$$F_t = \alpha E \omega \Delta t, \quad (3.3)$$

где  $\Delta t$  – отступление от температуры закрепления, °С;  
 $\omega$  – площадь поперечного сечения двух рельсов, м<sup>2</sup>.

Для растягивающей силы возможные максимальные  $\Delta t_{\text{раст}}$  можно определить по зависимости:

$$\Delta t_{\text{раст}} = \Delta t_3 - t_{\min \min}, \quad (3.4)$$

Для сжимающей силы  $\Delta t_{\text{сж}}$  по формуле:

$$\Delta t_{\text{сж}} = \Delta t_3 - t_{\max \max}. \quad (3.5)$$

Для наглядного изображения действия продольных температурных сил в плети строится эпюра растягивающих и сжимающих сил. Для её построения в статике можно рассчитать длину концевого участка  $l$ :

$$l = \frac{F_t - R_n}{r}, \quad (3.6)$$

где  $R_n$  – сопротивление стыка, кН;  
 $r$  – погонное сопротивление перемещению рельсошпальной решетки, кН/м.

В таком случае эпюра продольных температурных сил будет выглядеть так, как показано на рис. 3.1. В отличие от статического изображения, с учетом воздействия поездов, вид эпюры будет отличаться тем, что  $R_n = 0$ , а на концевых участках эпюра продольных сил будет не прямолинейной, а криволинейной. В вариантах для выполнения РГР даны различные значения  $R_n$  и  $r$  для лета и зимы.

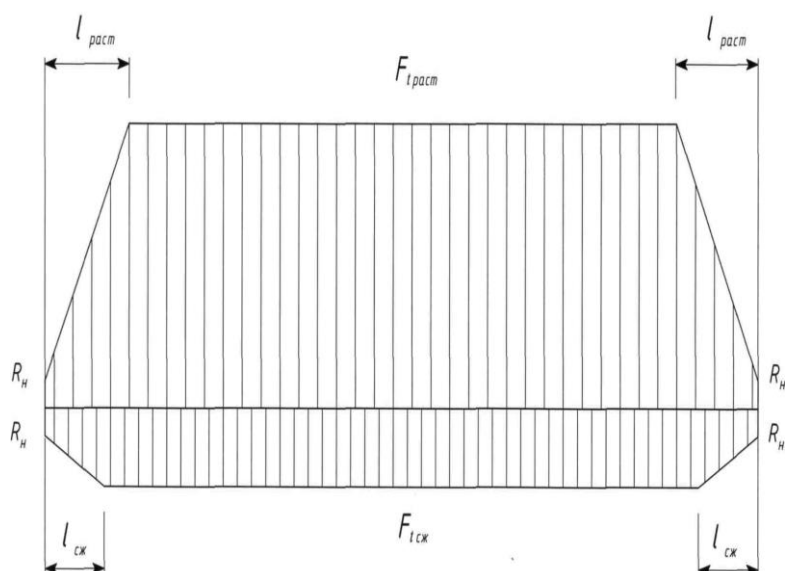


Рис. 3.1. Эпюры продольных температурных сил

#### 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 табл. 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1

Допускаемые изменения температуры рельсовых плетей при текущем содержании бесстыкового пути

Путевые работы	Предельные значения сдвижки, см	Заданное допускаемое 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 25 м	0	10	20	15

1	2	3	4	5
Одиночная смена шпал с вывеской шпальной решетки до 2 см при условии, что между одновременно заменяемыми шпалами расположено не менее 20 прикрепленных шпал	2	10	20	15

Таблица 4.2

**Допускаемые изменения температуры рельсовых плетей  
при работе путевых машин**

Машины	$\Delta t^{\text{зад}}$	Допускаемое отклонение $\Delta t$ в сторону			
		Повышения		Понижения	
		$R \geq 800 \text{ м}$	$R < 800 \text{ м}$	$R \geq 800 \text{ м}$	$R < 800 \text{ м}$
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

## 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ПРИ ИЗЛОМЕ РЕЛЬСОВОЙ ПЛЕТИ В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ

Зазор, который возникает при изломе в середине рельсовой плети в статике определяют по формуле:

$$\Delta \lambda = 2\lambda, \quad (5.1)$$

где  $\lambda$  – величина температурного перемещения на конце рельсовой плети в месте излома:

$$\lambda = \frac{F_t^2}{2E \cdot \omega \cdot r}, \quad (5.2)$$

$$F_{t_i} = \alpha E \omega (\max t_3 - t_i), \quad (5.3)$$

где  $t_i$  – температура плети (по варианту), °С.

Зазор  $\lambda$ , мм, образовавшийся при изломе плети, пропорционален квадрату фактического понижения температуры  $\Delta t_p$  по сравнению с температурой закрепления и определяется по следующим формулам в зависимости от типа рельсов:

$$\lambda_{P65} = 0,24 \frac{\Delta t_p^2}{r}; \quad \lambda_{P50} = 0,19 \frac{\Delta t_p^2}{r}, \quad (5.4)$$

В этом случае зазоры при изломе определяются формулами:

$$\lambda_{P65} = 0,010 \cdot \Delta t_p^2; \quad \lambda_{P50} = 0,008 \cdot \Delta t_p^2, \quad (5.5)$$

При учете воздействия поездов зазор должен считаться по иной формуле:

$$\lambda_3 = \frac{\alpha (\pi E \omega \tau)^{1/2} \Delta t}{K^{1/2}}, \quad (5.6)$$

где  $\tau$  – время;

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

## **6 РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ И ДЕФОРМАЦИЙ В РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЯХ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ВО ВРЕМЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ**

### **6.1 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  $\lambda$  имеет вид, показанный на рис. 1.3.

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

$$r = a \lambda^b. \quad (6.1)$$

С достаточной степенью точности для щебеночного балласта можно принять  $a = 15$  кН/м<sup>2</sup>, а  $b = 1/3$ .

$$r = 15 \sqrt[3]{\lambda}. \quad (6.2)$$

При учете вертикальной нагрузки от колес подвижного состава коэффициент  $\alpha$  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  $0 \leq \lambda \leq \lambda_{\text{max}}$ .

$$r = r_{\text{cp}} = \frac{\int_0^{\lambda_{\text{max}}} \alpha \lambda^b d\lambda}{\lambda_{\text{max}}}, \quad (6.3)$$

где  $\lambda_{\text{max}}$  – реальное максимальное перемещение шпалы вдоль оси пути для решаемой задачи.

Зависимость  $r = \text{const}$  соответствует упрощенному представлению процесса деформирования, характерного для идеального жесткопластического элемента (рис. 6.1).

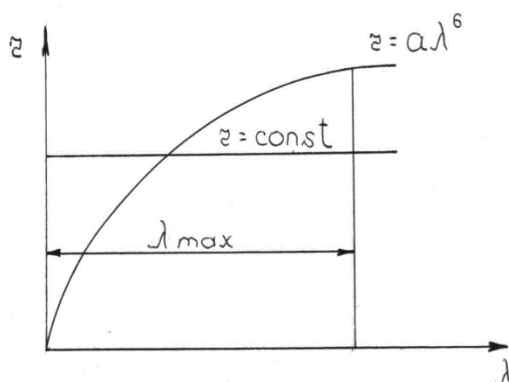


Рис. 6.1. Аппроксимация  $r(\lambda)$

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

## 6.2 Изменение сил при работе машин тяжелого типа

Машины тяжелого типа ЩОМ, ЭЛБ, ВПО и некоторые другие работают с поднятой рельсошпальной решеткой. При подъеме рельсошпальной решетки рельсы изгибают в вертикальной плоскости по кривой, которой соответствуют уравнение (6.4) и рис. 6.2.

$$y = \frac{h}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right), \quad (6.4)$$

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.

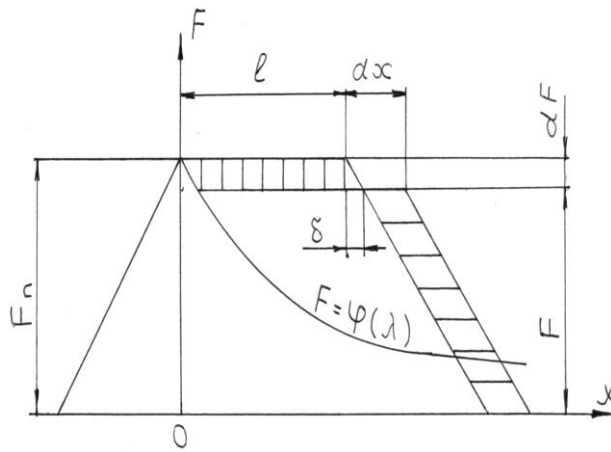


Рис. 6.2. Изменение  $F(x)$  при движении ЩОМ

Если пользоваться (6.4) и значением  $r = \text{const}$ , то величина дополнительной растягивающей силы может быть найдена по следующей формуле:

$$F_n = \frac{rl}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\pi^2 E \omega h^2}{rl^3}} - 1 \right). \quad (6.5)$$

Учет зависимости  $r(\lambda) = 15 \sqrt[3]{\lambda}$  и учет влияния пригрузки рельсошпальной решетки тележками машины за концами изогнутой оси рельсов дают уточнение (6.5) примерно на 15 %. Однако первый фактор влияет на снижение величины продольной силы, а второй почти в такой же степени – на ее повышение.

После подъёмки 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  $dF$  (см. рис. 6.2)

По закону сохранения энергии при деформациях две по-разному заштрихованные на рис. 6.2 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:

$$-ldF = F(dx - d), \quad (6.6)$$

где  $\delta = -dF / r$ .

Частным решением (6.5) для начального условия  $F = F_n$  при  $x = 0$  будет

$$x = l \ln \frac{F_n}{F} - \frac{F_n - F}{r}. \quad (6.7)$$

По (6.7) 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 щебнеочистительной 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 (6.6) или (6.7).

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  $\lambda_0$ , которое в этом случае будет равно разнице длины кривой изогнутой оси и стягивающей ее хорды:

$$\lambda_0 = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} \left( \sqrt{1 + (y')^2} - 1 \right) \cdot dx. \quad (6.8)$$

Если взять в расчет

$$\lambda_0 \approx \frac{\pi^2 h^2}{4h}, \quad (6.9)$$

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

$$F_{q \max} = 3,03 \sqrt{E \omega} \lambda_0^{2/3}. \quad (6.10)$$

На рис. 6.3 представлен график зависимости  $F_{q \max}(\lambda_c)$  для рельсов Р50 и Р65.

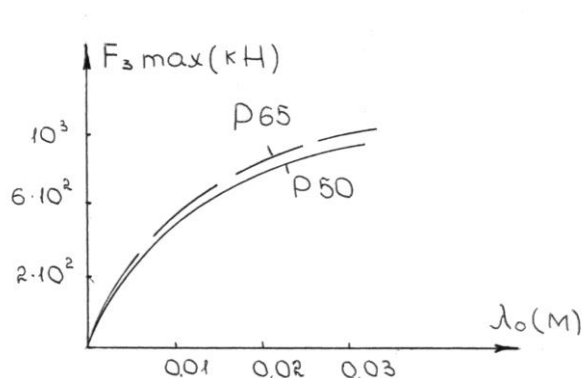


Рис. 6.3. График зависимости  $F_{q \max}(\lambda_c)$  для рельсов Р50 и Р65

## 7 ПРОДОЛЬНАЯ СИЛА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ВЫПРЯМЛЕНИЯ, ПРИЛОЖЕННАЯ НА КОНЦЕ ИЗОГНУТОГО УЧАСТКА

Необходимость знания выпрямляющей изогнутую часть рельсов продольной силы, приложенной в соответствии со схемой (рис. 7.1), 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.

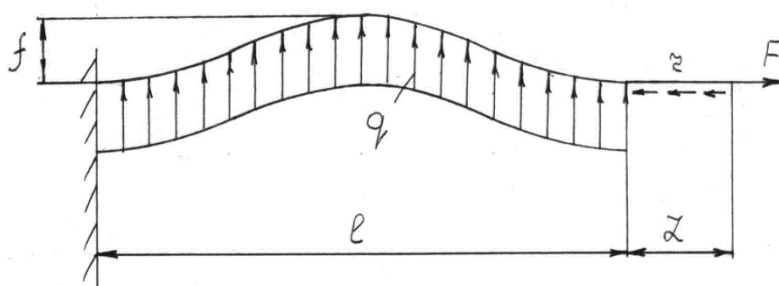


Рис. 7.1. Расчетная схема для определения  $F$

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

$$\sum_i^n A_i = 0 \quad (7.1)$$

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

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

$$A_1 = \frac{ql}{2} df, \quad (7.2)$$

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

$$A_2 = Fd\lambda, \quad (7.3)$$

работу внутренних сил изгиба:

$$A_3 = \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} df \quad (7.4)$$

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

$$A_4 = rLd\lambda, \quad (7.5)$$

то с учетом (7.5)

$$d\lambda = \frac{\pi^2 f}{2l} df \quad (7.6)$$

получим расчетную формулу

$$F = \frac{ql^2}{\pi f} - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} + rL. \quad (7.7)$$

График зависимости (7.7) представлен на рис. 7.2.

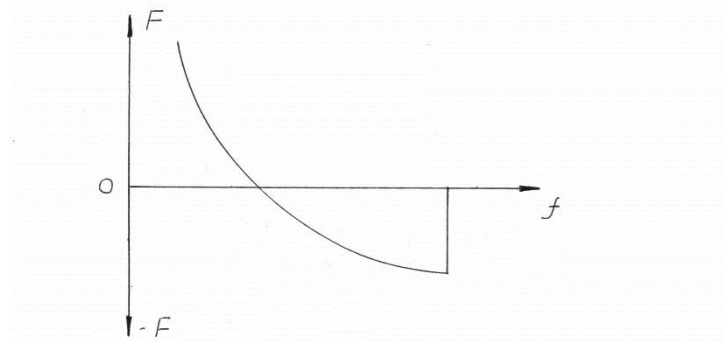


Рис. 7.2. График зависимости  $F(f)$

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 **Новакович, В. И.** Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями : учебное пособие / В. И. Новакович. – Москва : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 168 с.
- 2 **Шур, Е. А.** Повреждения рельсов / Е. А. Шур. – Москва : Интекст, 2012. – 192 с.
- 3 Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утв. Распоряжением ОАО «РЖД» 14.12.2016. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 185 с.
- 4 Инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2020. – 87 с.

## Исходные данные для выполнения расчетно-графической работы

№ варианта	$t_{\text{максимум}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{минимум}}, ^\circ\text{C}$	Коэффициент вязкости $\xi \cdot 10^8$ , кН·м/с <sup>2</sup>	Погонное сопротивление $r$ , кН/м		Сопротивление стыка $R_{\text{ст}}$ , кН	Температура зимой, $t_1, ^\circ\text{C}$	Промежуток времени $\tau$ , ч	Начальная стрела $f_0$ , мм	Стрела $f$ , см
				Летом $r_{\text{л}}$	Зимой $r_{\text{з}}$					
1	55	25	0,32	6	12	120	-20	281	8	80
2	59	28	0,31	5	10	85	-25	290	5	60
3	58	30	0,29	8	22	50	-29	260	10	90
4	62	23	0,41	9	24	115	-33	275	15	70
5	63	25	0,28	7	14	95	-24	180	23	110
6	60	31	0,27	10	25	70	-28	192	7	50
7	56	27	0,40	6	15	25	-31	188	11	100
8	58	22	0,35	8	24	100	-22	277	16	65
9	61	25	0,39	7	18	45	-26	265	6	85
10	55	31	0,33	9	25	18	-32	196	24	115
11	57	23	0,36	5	16	80	-23	184	14	95
12	59	24	0,42	6	20	30	-27	172	17	105
13	63	25	0,38	10	23	40	-34	264	20	55
14	58	29	0,34	7	21	135	-21	195	13	88
15	61	26	0,44	5	13	60	-30	176	18	75
16	56	29	0,37	9	22	35	-35	185	21	108
17	62	34	0,30	6	19	110	-40	198	12	94
18	55	36	0,45	7	22	55	-38	267	19	67
19	58	21	0,50	8	24	130	-42	300	22	83
20	60	28	0,43	10	21	20	-36	262	9	77
21	63	23	0,48	5	11	75	-44	279	28	102
22	59	25	0,51	7	23	105	-37	282	26	57
23	61	25	0,46	9	24	65	-39	199	29	112
24	57	20	0,49	6	17	90	-41	261	30	72
25	62	28	0,47	10	20	140	-43	271	27	81

*Учебное издание*

**Новакович** Василий Иванович  
**Карпачевский** Вячеслав Вадимович  
**Корниенко** Елена Владимировна  
**Шубитидзе** Виктория Викторовна

**БЕССТЫКОВОЙ ПУТЬ СО СВЕРХДЛИННЫМИ  
РЕЛЬСОВЫМИ ПЛЕТЯМИ**

Печатается в авторской редакции  
Технический редактор Т. И. Исаева

Подписано в печать 09.07.21. Формат 60×84/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.  
Тираж экз. Изд. № 5049. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

---

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