

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Курсовой проект

Преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство»

Труханов Павел Станиславович

ауд. 311

эл. почта: gaiwer123@mail.ru

Цель изучения дисциплины

Расчеты пути на прочность и устойчивость сводятся к определению напряжений и деформаций в его элементах под нагрузкой.

Результаты расчетов пути могут использоваться в целях:

- оценки напряженно-деформированного состояния данной конструкции пути при заданных условиях эксплуатации;
- определения таких нагрузок и скоростей движения поездов, при которых напряжения и деформации, возникающие в пути, не будут превосходить допустимых, а его устойчивость будет надежно обеспечена;
- проектирования новых конструкций пути.

Работу оформить в соответствии со стандартом организации СТО СГУПС 1.01С.02-2006 «Курсовой и дипломный проекты. Требования к оформлению».

Список используемой литературы приведен на бланке с заданием.

Для формул выполнять сквозную нумерацию (1), (2), (3)... или с указанием раздела (1.1), (1.2), (1.3).... Аналогично для рисунков.

1. Расчет железнодорожного пути на прочность

1.1. Определение параметров конструкции пути для заданных условий

1.1.1 Допущения к расчетной схеме

При расчете железнодорожного пути на прочность рельс рассматривается как балка постоянного сечения бесконечно большой длины, лежащая на сплошном упругом основании (рис. 1).

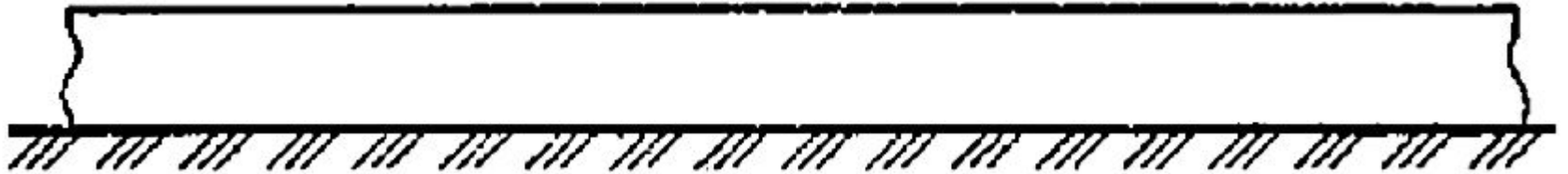


Рисунок 1 – Расчетная схема железнодорожного пути

Основание работает как на сжатие, так и на растяжение. Такая двухсторонняя связь выражается зависимостью

$$q = -U \cdot y$$

где q – интенсивность реакции основания;

U – модуль упругости подрельсового основания;

y – осадка основания.

Все физико-механические характеристики пути принимаются детерминированными (неслучайными, постоянными для заданных условий).

Расчет ведется на вертикальные силы, приложенные к оси симметрии рельса. Действие горизонтальных сил учитываются коэффициентом.

Напряжения и деформации в расчетных сечениях вычисляются как алгебраические суммы этих величин от действия различных нагрузок (принцип независимости действия сил).

1.1.2 Исходные данные для выполнения расчета

Расчет железнодорожного пути на прочность будет производиться для железнодорожного пути с рельсами типа Р65 (приведенный износ не более 6 мм) на железобетонных шпалах в кривой радиусом R м от воздействия локомотива ВЛ-ХХ при следующих исходных данных:

1) статическая нагрузка колеса на рельс $P_{ст} =$ кН (*бланк задания*);

2) отнесенный к колесу вес неподрессоренной части экипажа $q_k =$ Н (*страница 71 таблица П. 1.1*);

3) жесткость рессорного подвешивания $J_p =$ Н/м (*страница 71 таблица П. 1.1*);

4) статический прогиб рессорного подвешивания $f_{ст} =$ м (*страница 71 таблица П. 1.1*);

5) диаметр колеса $d =$ м (*страница 71 таблица П. 1.1*);

6) расстояние между центрами осей колесных пар экипажа $l_1 = \text{м}$, $l_2 = \text{м}$ (страница 71 таблица П. 1.1);

7) скорость движения экипажа $v = \text{м/с}$ (бланк задания, разделить на 3,6 и округлить до десятых);

8) глубина изолированной неровности $e = \text{м}$ (страница 74 таблица П. 1.4 для подшипников качения);

9) коэффициент учитывающий горизонтальные силы в кривом участке $f_{\text{кр}} =$ (страница 73 таблица П. 1.2, для локомотива ВЛ-82^м принять значение как и у ВЛ-80);

10) модуль упругости подрельсового основания **летом** в кривом участке $U = \text{МПа}$ (бланк задания);

11) расстояние между осями шпал в кривом участке $l_{\text{ш}}^{\text{кр}} = 0,5 \text{ м}$ (т.к. эюра в кривом участке 2000 шт./км);

12) момент инерции рельса $I_z = \text{м}^4$ (страница 75 таблица П.2.1);

13) момент сопротивления рельса $W = \text{м}^3$ (страница 75
таблица П. 2.1);

14) коэффициент, учитывающий влияние

- типа рельсов $\beta = 0,87$ (для рельсов типа Р65);
- рода балласта $\gamma = 1$ (для щебня);
- жесткости пути $\varepsilon = 0,322$ (для железобетонных шпал);
- изменения колеблющейся массы пути на железобетонных шпалах $\alpha_1 = 0,931$ (для железобетонных шпал);
- колеблющейся массы пути $\alpha_0 = 0,403$ (для железобетонных шпал);

15) площадь подрельсовой прокладки $\omega = \text{м}^2$ (страница 75
таблица П. 2.1);

16) площадь полушпалы $\Omega_{\alpha} = \text{м}^2$ (страница 75 таблица П.2.1);

17) толщина балластного слоя $h = 0,6 \text{ м}$ (0,4 м щебеночный слой и 0,2 м песчаная подушка);

18) ширина нижней постели шпалы $b = \text{м}$ (страница 75 таблица П. 2.1);

19) поправочный коэффициент $r_1 =$ (страница 75 таблица П. 2.1).

На рисунке 2 представлен поперечный профиль балластной призмы.

Параметры типовых поперечных профилей балластной призмы

Класс пути	Толщина слоя балласта в подрельсовой зоне (в кривых – по внутренней нити) без учета балластной подушки $h_{щ}$, см	Ширина плеча призмы d , см	Толщина балластной подушки $h_{п}$, см	Минимальная ширина обочины земляного полотна a , см
1 и 2	35/40	40/45	20	50
3	35/40	35/40		
4	25/30	25/40		
5	20/20	20/40	15	40

В числителе приведены значения для звеньевоего пути при деревянных шпалах; в знаменателе - для бесстыкового пути на железобетонных шпалах.

Поперечный профиль балластной призмы

Чертеж изображается на листе пояснительной записки (построенный в графическом редакторе) или листе миллиметровой бумаги формата А4 (чертится карандашом), расположенный в альбомной ориентации (горизонтальном положении). Масштаб чертежа 1:50. На чертеже указать размеры. Длина железобетонной шпалы 2,7 м.

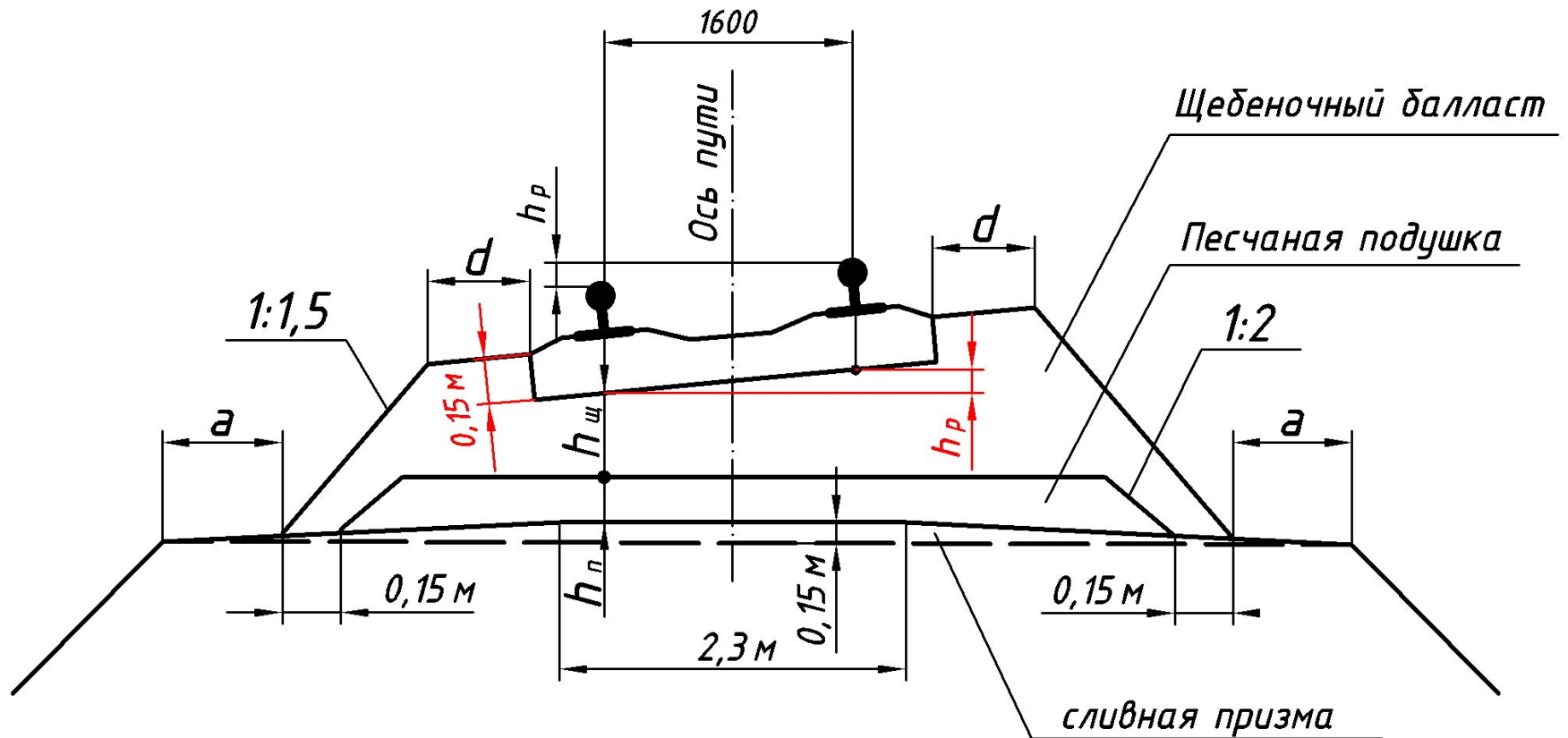


Рисунок 2 – Поперечный профиль балластной призмы

1.2 Определение расчетной нагрузки от колеса на рельс

Колесная нагрузка на путь складывается из статического давления колеса и динамических составляющих

$$P = P_{ст} + P_p + P_{нп} + P_{нк},$$

где P_p , $P_{нп}$, $P_{нк}$ – динамические составляющие от колебания кузова на рессорах, изменения движения необрессоренных масс от неровностей пути и поверхности катания колес, Н.

Динамические составляющие нагрузки имеют вероятностный характер (принимают различные значения во времени в произвольных сочетаниях). Для вероятности события $p=0,994$, обеспечивающей нормальную эксплуатацию пути, максимальная динамическая нагрузка $P_{дин}^{max}$, Н, (расчетное значение) вычисляется через ее среднее значение $P_{ср}$, Н, и среднеквадратическое отклонение S , Н, как

$$P_{дин}^{max} = P_{ср} + 2,5 \cdot S$$

Как показали исследования, динамические составляющие $P_{ни}$ и $P_{нк}$ можно принять равными нулю, так как силы инерции необрессоренных масс от неровностей пути и поверхности катания колес вызывают догрузку и разгрузку колеса с одинаковой вероятностью.

Среднеквадратическое отклонение статической нагрузки колеса, как постоянной величины, принимается равным нулю.

С учетом этого за среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс P_{cp} , Н, принимается

$$P_{cp} = P_{ст} + P_p^{cp},$$

где $P_{ст}$ – статическая нагрузка колеса на рельс, Н;

P_p^{cp} – средняя величина нагрузки, возникающая за счет вертикальных колебаний кузова на рессорах, Н, определяемая по формуле

$$P_p^{cp} = 0,75 \cdot P_p^{max},$$

где P_p^{max} – динамическая максимальная нагрузка колеса на рельс от вертикальных колебаний надрессорной части экипажа, Н. Определим ее по коэффициенту динамических

добавок

$$P_p^{\max} = k_D (P_{ст} - q_k) ,$$

где q_k – вес необрессоренной части экипажа, приходящийся на одно колесо, Н;

k_D – коэффициент динамических добавок от вертикальных колебаний надрессорной части, определяемый по эмпирической зависимости

$$k_D = 0,1 + 0,00072 \cdot \frac{V}{f_{ст}} ,$$

где v – скорость движения, м/с;

$f_{ст}$ – статический прогиб рессорного подвешивания, м.

Среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс S от нескольких факторов определяется из суммы дисперсий, Н

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{нп}^2 + (1 - q_1) \cdot S_{ннк}^2 + q_1 \cdot S_{инк}^2} ,$$

где S_p – среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от вертикальных колебаний надрессорной части экипажа, Н;

$S_{ни}$ – среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от действия сил инерции необрессоренным масс при прохождении колесом изолированной неровности пути, Н;

$S_{ннк}$ – среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от действия сил инерции необрессоренным масс из-за наличия непрерывных неровностей на поверхности катания колес, Н;

$S_{инк}$ – среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от действия сил инерции необрессоренным масс, возникающих из-за наличия изолированных неровностей на поверхности катания колес, Н;

q_1 – доля колес, имеющих изолированные неровности, от общего числа однотипных колес, остальные из которых имеют непрерывные неровности (принять равной 0,05).

Среднеквадратическое отклонение нагрузки S_p , возникающей за счет колебания кузова на рессорах, определяется как

$$S_p = 0,08 \cdot P_p^{\max}.$$

Среднеквадратическое отклонение $S_{нп}$ определяется по формуле

$$S_{нп} = 0,707 \cdot P_{нп}^{\max},$$

где $P_{нп}^{\max}$ – максимальное значение силы инерции, Н

$$P_{нп}^{\max} = 2,877 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot \gamma \cdot P_{ср} \cdot l_{ш} \cdot V \sqrt{\frac{U \cdot q_{к}}{k}},$$

где α_1 – коэффициент, учитывающий изменение колеблющейся массы пути на железобетонных шпалах по сравнению с путем на деревянных шпалах (для железобетонных шпал $\alpha_1 = 0,931$);

β – коэффициент, учитывающий влияние типа рельса на возникновение динамической неровности по отношению к рельсу типа Р50

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{I_{P50}}{I_P}},$$

где I_p – момент инерции рельса рассматриваемого типа при износе 0 мм (для рельсов типа Р65 $\beta = 0,87$);

ε – коэффициент, учитывающий влияние жесткости пути (материал и конструкция шпалы) на образование динамической неровности пути по сравнению с деревянными шпалами;

γ – коэффициент, учитывающий влияние рода балласта на образование динамической неровности пути;

$l_{ш}$ – расстояние между осями шпал, м;

U – модуль упругости подрельсового основания, МПа;

q_k – неподрессоренная масса, отнесенная к одному колесу, Н;

k – коэффициент относительной жесткости пути рельсового основания и рельса, м^{-1} , определяемый по формуле

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI_z}}$$

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

I_z – момент инерции поперечного сечения балки (рельса), относительно центральной оси, м^4 .

Среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки на рельс $S_{\text{ннк}}$ от сил инерции необрессоренной массы, возникающих из-за наличия непрерывных неровностей на поверхности катания колес, Н, определяется как

$$S_{\text{ннк}} = 0,225 \cdot P_{\text{ннк}}^{\text{max}},$$

где $P_{\text{ннк}}^{\text{max}}$ – максимальное значение силы инерции, Н

$$P_{\text{ннк}}^{\text{max}} = \frac{130,222 \cdot 10^{-3} \cdot k_1 \alpha_0 UV^2 \sqrt{q_{\kappa}}}{d^2 \sqrt{kU - 326 \cdot k^2 q_{\kappa} \cdot 10^{-6}}},$$

где k_1 – коэффициент, характеризующий неравномерности образования проката поверхности катания колес, принимаемый для электровозов, тепловозов, мотор-вагонного подвижного состава и вагонов равным 0,23;

α_0 – коэффициент, учитывающий влияние колеблющейся массы пути;

d – диаметр колеса, м.

Среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс $S_{инк}$ от сил инерции необресоренной массы $P_{инк}$, возникающих из-за наличия на поверхности катания плавных изолированных неровностей, определяется по формуле, Н

$$S_{инк} = 0,25 \cdot P_{инк}^{max},$$

где $P_{инк}^{max}$ – максимальное значение силы инерции, Н

$$P_{инк}^{max} = 0,2 \cdot 10^7 \cdot \alpha_0 \cdot y_{max} \cdot \frac{U}{k},$$

где y_{max} – наибольший дополнительный прогиб рельса при вынужденных колебаниях катящегося по ровному рельсу колеса с изолированной неровностью на поверхности катания, м.

При скорости $v \geq 20$ км/ч для подавляющего числа расчетных случаев

$$y_{max} = 1,47 \cdot e,$$

где e – расчетная глубина плавной изолированной неровности на поверхности катания колеса, м.

Порядок вычисления

$$1) \quad k_{\text{Д}} = 0,1 + 0,00072 \cdot \frac{V}{f_{\text{см}}} ;$$

$$2) \quad P_p^{\text{max}} = k_{\text{Д}} (P_{\text{см}} - q_{\text{к}}) ;$$

$$3) \quad P_p^{\text{сп}} = 0,75 \cdot P_p^{\text{max}} ;$$

$$4) \quad P_{\text{сп}} = P_{\text{см}} + P_p^{\text{сп}} ;$$

$$5) \quad S_p = 0,08 \cdot P_p^{\text{max}} ;$$

$$6) \quad k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI_z}} ;$$

$$7) \quad P_{\text{нп}}^{\text{max}} = 2,877 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot \gamma \cdot P_{\text{сп}} \cdot l_{\text{ш}} \cdot V \sqrt{\frac{U \cdot q_{\text{к}}}{k}} ;$$

$$8) \quad S_{\text{нп}} = 0,707 \cdot P_{\text{нп}}^{\text{max}} ;$$

$$9) P_{\text{ннк}}^{\text{max}} = \frac{130,222 \cdot 10^{-3} \cdot k_1 \alpha_0 UV^2 \sqrt{q_{\kappa}}}{d^2 \sqrt{kU - 326 \cdot k^2 q_{\kappa} \cdot 10^{-6}}};$$

$$10) S_{\text{ннк}} = 0,225 \cdot P_{\text{ннк}}^{\text{max}};$$

$$11) y_{\text{max}} = 1,47 \cdot e;$$

$$12) P_{\text{инк}}^{\text{max}} = 0,2 \cdot 10^7 \cdot \alpha_0 \cdot y_{\text{max}} \cdot \frac{U}{k};$$

$$13) S_{\text{инк}} = 0,25 \cdot P_{\text{инк}}^{\text{max}};$$

$$14) S = \sqrt{S_p^2 + S_{\text{нп}}^2 + (1 - q_1) \cdot S_{\text{ннк}}^2 + q_1 \cdot S_{\text{инк}}^2};$$

$$15) P_{\text{дин}}^{\text{max}} = P_{\text{ср}} + 2,5 \cdot S.$$

1.3 Эквивалентные нагрузки

1.3.1 Общие положения

При движении поезда на путь воздействует система сосредоточенных сил – давление от колес тележек. Самым невыгодным (опасным) положением такой подвижной нагрузки для расчетного сечения является расположение одного из колес на вершине линии влияния. Учитывая то, что линии влияния изгибающих моментов и прогибов принятой модели пути быстро затухают, достаточно рассмотреть систему сил, состоящую из давлений трех последовательно расположенных колес. Нагрузку, определяемую как сумму воздействия усилий от каждого из включенных в расчетную схему колес в данном сечении, называют эквивалентной нагрузкой.

При определении эквивалентных нагрузок считается, что одно из колес тележки локомотива или вагона передает на рельс расчетную нагрузку, а другие – среднюю (т. е. вероятный максимум динамической нагрузки расчетного колеса не совпадает с максимумом нагрузок соседних колес).

1.3.2 Эквивалентная нагрузка при определении изгибающего момента

Максимальная эквивалентная нагрузка для расчетов напряжений в рельсах от изгиба определяется по формуле

$$P_{\text{экв}}^I = P_{\text{дин}}^{\text{max}} + \sum \mu(kx_i) P_i^{\text{ср}},$$

где $\mu(kx_i)$ – ординаты линии влияния изгибающих моментов рельса в сечениях пути, расположенных под колесными нагрузками от осей тележки, смежных с расчетной осью

$$\mu(kx_i) = e^{-kx_i} (\cos(kx_i) - \sin(kx_i)).$$

(e – число Эйлера, $e \approx 2,71828$)

Для системы, состоящей из трех нагрузок, наиболее опасным расположением (установкой) колес относительно расчетного сечения является схема, показанная на рисунке 1.

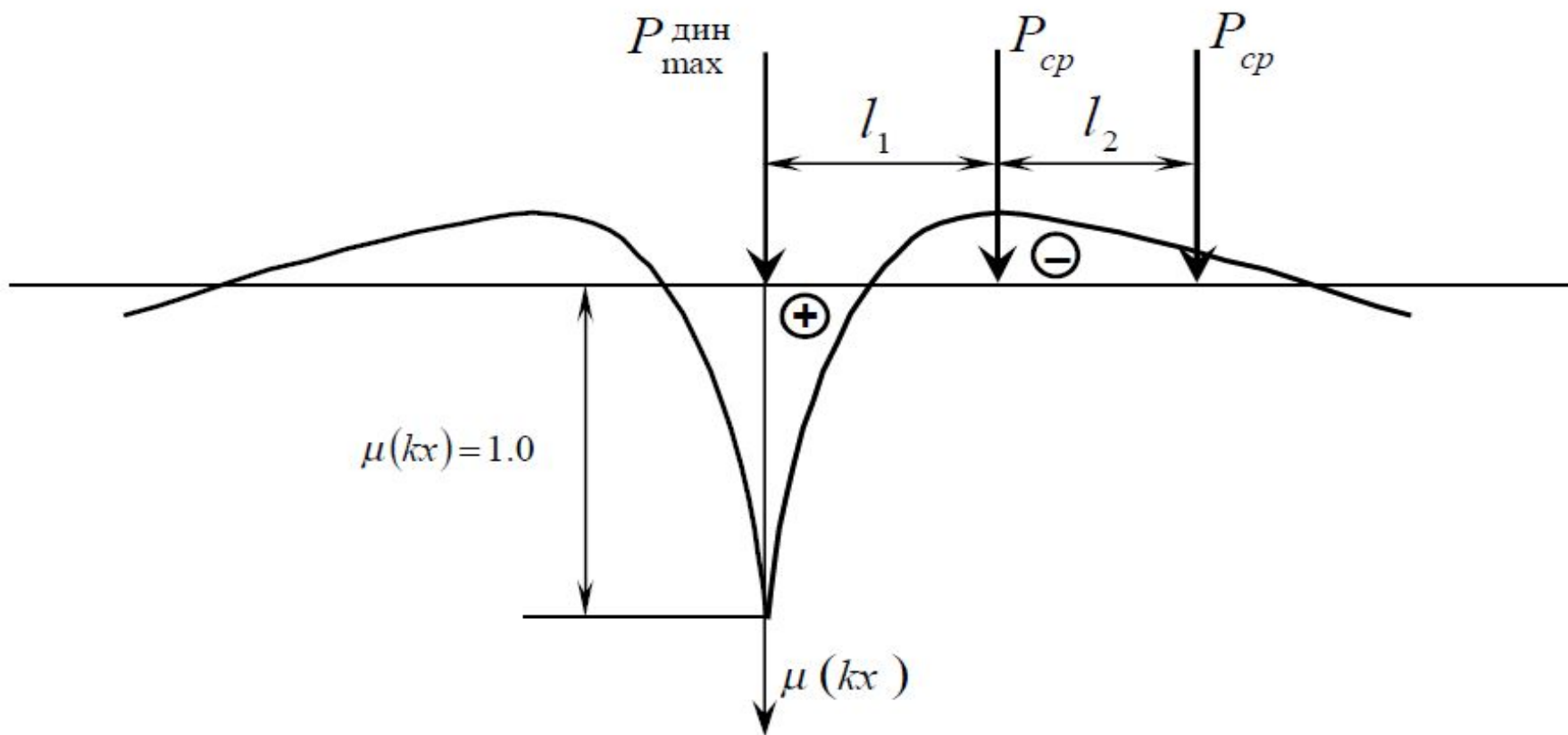


Рисунок 1 – Схема определения эквивалентной нагрузки при расчете изгибающего момента

1.1.2 Исходные данные для выполнения расчета

Расчет железнодорожного пути на прочность будет производиться для железнодорожного пути с рельсами типа Р65 (приведенный износ не более 6 мм) на железобетонных шпалах в кривой радиусом R м от воздействия локомотива ВЛ-ХХ при следующих исходных данных:

1) статическая нагрузка колеса на рельс $P_{ст} = \text{кН}$ (*бланк задания*);

2) отнесенный к колесу вес неподрессоренной части экипажа $q_k = \text{Н}$ (*страница 71 таблица П. 1.1*);

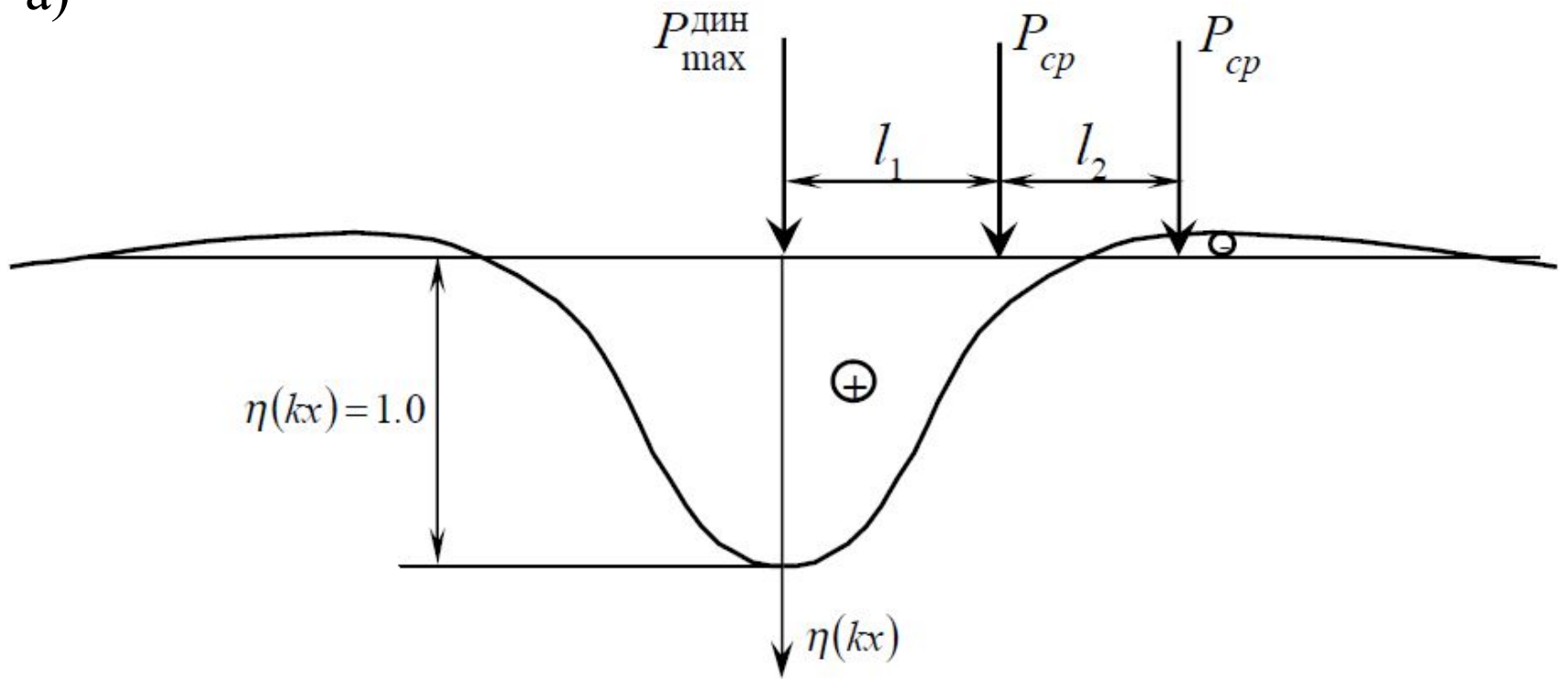
3) жесткость рессорного подвешивания $J_p = \text{Н/м}$ (*страница 71 таблица П. 1.1*);

4) статический прогиб рессорного подвешивания $f_{ст} = \text{м}$ (*страница 71 таблица П. 1.1*);

5) диаметр колеса $d = \text{м}$ (*страница 71 таблица П. 1.1*);

- 6) расстояние между центрами осей колесных пар экипажа $l_1 = \text{м}$, $l_2 = \text{м}$ (*страница 71 таблица П. 1.1*);
- 7) скорость движения экипажа $v = \text{м/с}$ (*бланк задания*);
- 8) глубина изолированной неровности $e = \text{м}$ (*страница 74 таблица П. 1.4 для подшипников качения*);
- 9) коэффициент учитывающий горизонтальные силы в кривом участке $f_{\text{кр}} =$ (*страница 73 таблица П. 1.2, для локомотива ВЛ-82 принять значение как и у ВЛ-80*);
- 10) модуль упругости подрельсового основания летом в кривом участке $U = \text{МПа}$ (*бланк задания*);
- 11) расстояние между осями шпал в кривом участке $l_{\text{ш}}^{\text{кр}} = \text{м}$;
- 12) момент инерции рельса $I_z = \text{м}^4$ (*страница 75 таблица П.2.1*);

a)



б)

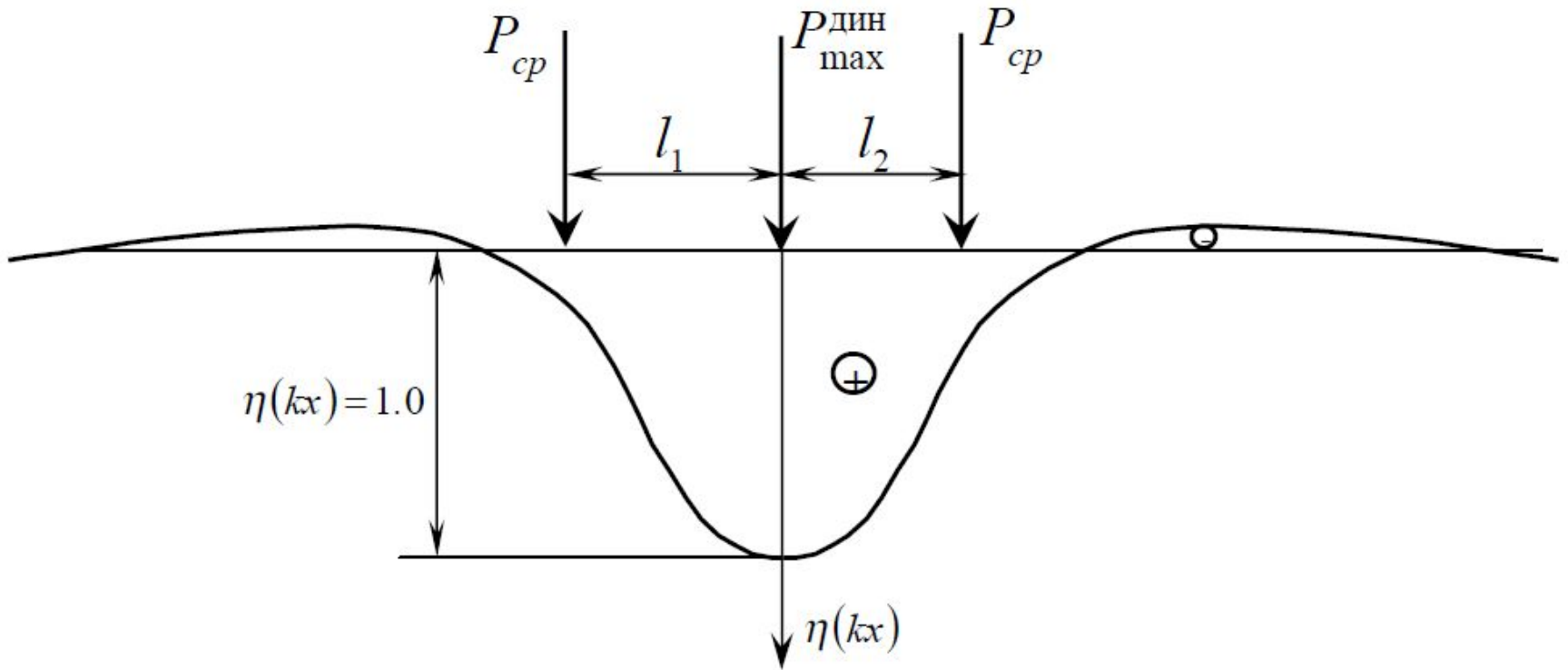


Рисунок 2 – Схема определения эквивалентной нагрузки при расчете прогиба

Для второй схемы нагружения (рисунок 2б) координаты средних нагрузок равны $x_1 = l_1 = \dots$ м, $x_2 = l_2 = \dots$ м. Ординаты линии влияния прогибов рельса в сечениях пути при таком расположении нагрузок будут составлять

$$\eta(kx_1) = \dots \text{ м};$$

$$\eta(kx_2) = \dots \text{ м}.$$

Тогда максимальная эквивалентная нагрузка для определения прогиба рельса

$$P_{\text{экв}}^{\text{II}} = \dots \text{ Н}.$$

1.4 Определение изгибающего момента, прогиба и давления рельса на шпалу

Изгибающий момент в рельсе от воздействия эквивалентной нагрузки определяется по формуле, Н·м

$$M = \frac{P_{\text{экв}}^I}{4 \cdot k} .$$

$$M = \dots$$

Максимальный прогиб рельса, м

$$y = \frac{k}{2 \cdot U} P_{\text{экв}}^{II} .$$

$$y = \dots$$

Приближенное давление рельса на шпалу определяется как

$$Q_0 = \frac{k \times l_{\text{ш}}}{2} P_{\text{экв}}^{II} .$$

$$Q_0 = \dots$$

1.5 Определение напряжений в элементах верхнего строения пути

1.5.1 Осевые напряжения в подошве рельса

Максимальные осевые напряжения в подошве рельса от изгиба и вертикальной нагрузки определяются по формуле

$$\sigma_{no} = \frac{M}{W}$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения рельса относительно нейтральной оси для удаленного волокна подошвы, м³.

$$\sigma_{no} = \dots$$

1.5.2 Кромочные напряжения в подошве рельса

Вертикальная нагрузка от колеса на рельс имеет смещение (эксцентриситет) относительно оси симметрии сечения рельса. Со стороны гребня колеса на головку рельса действует горизонтальная сила (рисунок 1). Вследствие этого в наиболее удаленных точках от центральных осей поперечного сечения рельса (наружная кромка подошвы и внутренняя кромка головки рельса) возникает сложное напряженное состояние от совместного действия двух изгибающих моментов и крутящего момента.

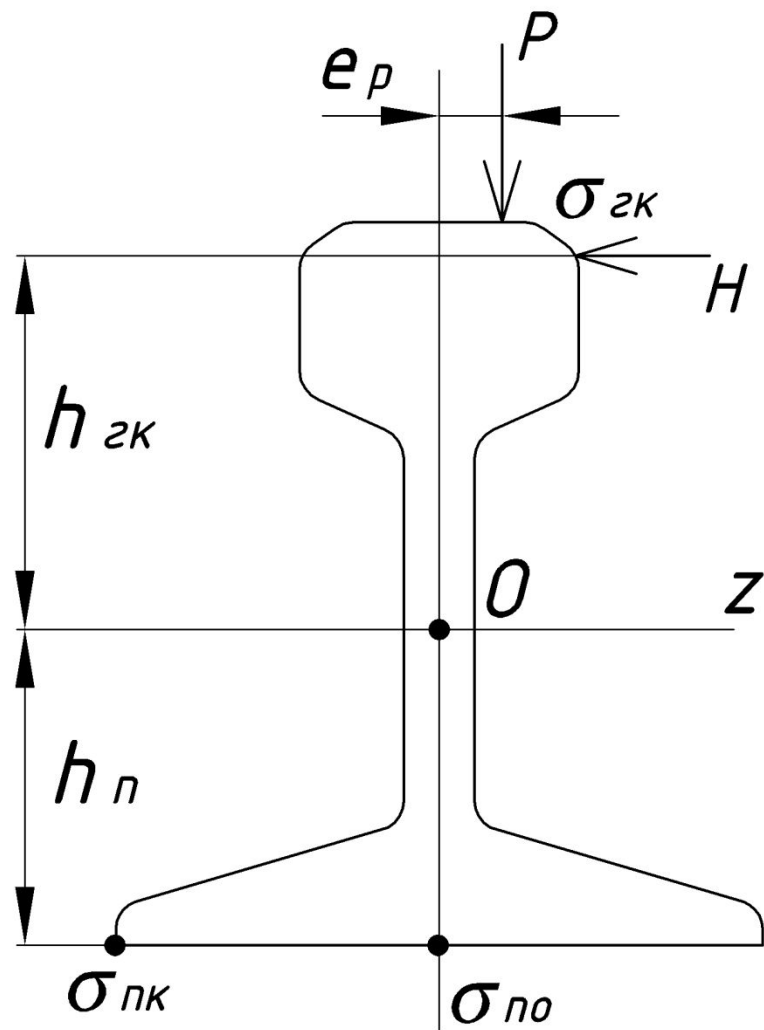


Рисунок 1 – Схема приложения сил на рельс

Нормальные напряжения в кромке подошвы рельса вычисляются по формуле, Па

$$\sigma_{нк} = f \cdot \sigma_{но}$$

где f – коэффициент перехода к кромочным напряжениям, зависящий от типа экипажа, радиуса кривой (*п.1.1.2 под номером 9*)

$$\sigma_{нк} = \dots$$

1.5.3 Напряжения в шпалах и в балластном слое под шпалой

Напряжения смятия в деревянных шпалах под подкладками и в прокладках при железобетонных шпалах определяются по формуле

$$\sigma_{ш} = \frac{Q_0}{\omega}$$

где ω – площадь подкладки или подрельсовой прокладки, м².

$$\sigma_{ш} = \dots$$

Напряжения в балластном слое под шпалой в подрельсовом сечении

$$\sigma_{\delta} = \frac{Q_0}{\Omega_{\alpha}},$$

где Ω_{α} – эффективная опорная площадь полушпалы с учетом изгиба, м².

$$\sigma_{\delta} = \dots$$

1.6 Напряжения на основной площадке земляного полотна

Схема колесной нагрузки принимается как и во второй установке при определении эквивалентной нагрузки для расчета прогиба рельса $P_{\text{ЭКВ}}^{\text{II}}$ (рисунок 2).

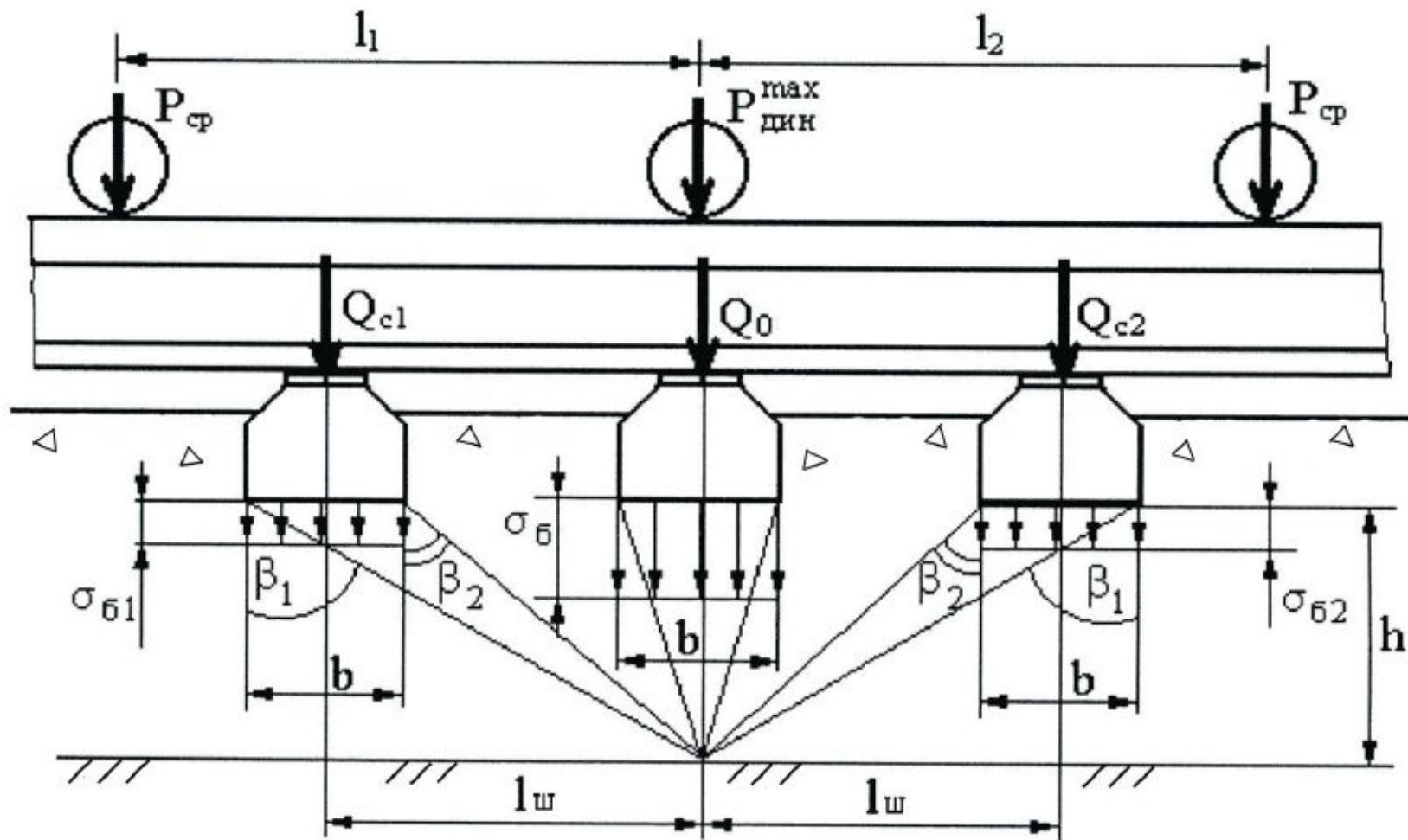


Рисунок 2 – Схема расчета напряжений на основной площадке земляного полотна

Напряжения на основной площадке земляного полотна σ_h на глубине h определяются под расчетной шпалой с учетом давлений, передаваемых двумя соседними шпалами, Па

$$\sigma_h = \sigma_{h0} + \sigma_{h1} + \sigma_{h2} ,$$

где σ_{h0} – напряжения от действия расчетной шпалы на глубине h от ее подошвы;

σ_{h1} , σ_{h2} – напряжения от действия соседних шпал на глубине h от ее подошвы.

Нормальные вертикальные напряжения на глубине h от расчетных давлений под подошвами шпал σ_{σ} , $\sigma_{\sigma 1}$, $\sigma_{\sigma 2}$ определяются на основе решения плоской задачи теории упругости при рассмотрении шпального основания как однородной изотропной среды по формулам

$$\sigma_{h0} = r_1 [0,635m_1C_1 + 1,275(2 - m_1)C_2] \sigma_{\delta}; \quad (1)$$

$$\sigma_{h1} = \frac{r_1}{\pi} A_h \sigma_{\delta 1}; \quad (2)$$

$$\sigma_{h2} = \frac{r_1}{\pi} A_h \sigma_{\delta 2}, \quad (3)$$

где σ_{δ} , $\sigma_{\delta 1}$, $\sigma_{\delta 2}$ – напряжения в балласте под расчетной и соседними шпалами, определяемые как

$$\sigma_{\delta} = \frac{Q_0}{\Omega_{\alpha}}; \quad (4)$$

$$\sigma_{\delta 1} = \frac{Q_{c1}}{\Omega_{\alpha}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{\delta 2} = \frac{Q_{c2}}{\Omega_{\alpha}}. \quad (6)$$

В формулах (4) – (6) Q_{c1} и Q_{c2} – давления на соседние шпалы, определяются по формулам

$$Q_{c1} = \frac{kl_{ш}}{2} \left[P_{дин}^{max} \eta(kl_{ш}) + P^{cp} \eta(k(l_1 - l_{ш})) + P^{cp} \eta(k(l_2 + l_{ш})) \right] ;$$

$$Q_{c2} = \frac{kl_{ш}}{2} \left[P_{дин}^{max} \eta(kl_{ш}) + P^{cp} \eta(k(l_1 + l_{ш})) + P^{cp} \eta(k(l_2 - l_{ш})) \right] .$$

В формулах (1) – (3) r_1 – параметр, учитывающий влияние материала шпал на напряжения, m_1 – коэффициент, учитывающий неравномерность напряжений по ширине шпалы и определяемый как

$$m_1 = \frac{0,89}{0,435 + \sigma_6},$$

но не менее 1;

C_1 , C_2 , A_h – константы, зависящие от геометрии шпального основания (ширины подошвы шпалы b , м, толщины балласта h , м, расстояния между осями шпал $l_{ш}$, м), определяемые по формулам

$$C_1 = \frac{b}{2h} - \frac{b^3}{24h^3};$$

$$C_2 = \frac{bh}{b^2 + 4h^2};$$

$$A_h = \beta_1 + 0,5 \sin 2\beta_1 - \beta_2 - 0,5 \sin 2\beta_2,$$

где $\beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{l_{uu} + 0,5b}{h}$ и $\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{l_{uu} - 0,5b}{h}$.

Порядок расчета

- 1) $\eta(kl_{uw}), \eta(k(l_1 - l_{uw})), \eta(k(l_2 + l_{uw})), \eta(k(l_1 + l_{uw})), \eta(k(l_2 - l_{uw}))$
по формуле $\eta(kx_i)$ в п. 1.3.3;
- 2) Q_{c1}, Q_{c2} ;
- 3) $\sigma_{\delta}, \sigma_{\delta 1}, \sigma_{\delta 2}$;
- 4) $\beta_1, \beta_2, A_h, C_1, C_2, m_1$;
- 5) $\sigma_{h0}, \sigma_{h1}, \sigma_{h2}$;
- 6) σ_h .

1.7 Допускаемые напряжения

Расчет рельсов и других элементов пути на прочность ведется по допускаемым напряжениям, которые ограничивают максимальные расчетные напряжения от поездной нагрузки

$$\sigma_{расч}^{max} \leq [\sigma] .$$

В соответствии с характером работы каждого из элементов пути регламентируются следующие виды допускаемых напряжений (оценочные критерии прочности пути), обеспечивающих прочность и надежность железнодорожного пути:

$[\sigma_k]$ – допускаемые напряжения растяжения в кромке подошвы рельса, обусловленные изгибом последнего и кручением от вертикального и горизонтального воздействия подвижного состава;

$[\sigma_{ш}]$ – допускаемые напряжения на смятие в деревянных шпалах под прокладками и в прокладках для железобетонных шпал;

$[\sigma_{\sigma}]$ – допускаемые напряжения сжатия в балласте под шпалой в подрельсовой зоне;

$[\sigma_h]$ – допускаемые напряжения сжатия на основной площадке земляного полотна.

Превышение расчетных напряжений над допускаемыми указывает на необходимость усиления пути, причем превышение до 30 % не является основанием для ограничения скорости движения поездов.

Численные значения допускаемых напряжений в элементах верхнего строения пути (ВСП) зависят от вида подвижного состава и грузонапряженности пути (представлены в таблице П. 2.2 /2/).

В рамках курсового проекта будем принимать значения допускаемых напряжений для грузонапряженности более 50 млн т·км брутто/км в год. Однако в кривых радиусом 1000 м и менее рекомендуется принимать значение $[\sigma_k] = 240$ МПа независимо от грузонапряженности. Также при железобетонных шпалах $[\sigma_{ш}]$ следует принимать 7,5 МПа для локомотивов и 6,7 МПа для вагонов.

В таблице 1 представлено сравнение допускаемых и расчетных напряжений в элементах ВСП.

Таблица 1 – Напряжения в элементах верхнего строения пути

Вид подвижного состава	Вид напряжений	Численные значения напряжений, МПа	
		допускаемых	расчетных
ЛОКОМОТИВ ВЛ-**	в кромке подошвы рельса [σ_k]	240	
	в подрельсовой прокладке [$\sigma_{ш}$]	7,5	
	в балласте под шпалой в подрельсовой зоне [$\sigma_б$]	0,4	
	на основной площадке земляного полотна [σ_h]	0,1	

1.8 Расчет пути на прочность на ПЭВМ

Алгоритм расчета пути на прочность , изложенный в разделах 1.1 – 1.7 реализован в инструментальной среде MathCAD, позволяющей выполнять многовариантные вычисления для различных конструкций пути и типов подвижного состава.

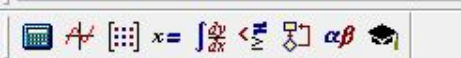
Для удобства ввода информации в расчетный модуль заполним таблицу 1, содержащую исходные данные по выполнению расчета от воздействия на путь локомотива и вагона (согласно варианту задания).

Таблица 1 – Исходные данные для расчета пути на прочность в программной среде MathCAD

Характеристики	Обозначение	Размерность	Значение	
			ЛОКОМОТИВ ВЛ-**	четырёх- осный вагон на тележках ЦНИИ-ХЗ
1	2	3	4	5
1. Статическая нагрузка от колеса на рельс	$P_{ст}$	Н		
2. ... (согласно п. 1.1.2)				

В таблице 1:

- скорость движения экипажа разбить на 4 интервала ($v/4$, $2*(v/4)$, $3*(v/4)$, v);
- модуль упругости записать для 4 вариантов условий – лето прямая, лето кривая, зима прямая, зима кривая;
- коэффициент, учитывающий горизонтальные силы, и расстояние между осями шпал взять для прямого и кривого участка.



Расчет железнодорожного пути на прочность в среде MathCAD

Макет расчета к учебному пособию Карпушенко Н.И., Котова И.А., Осипов В.Г.
 "Расчет железнодорожного пути на прочность, устойчивость и надежность",
 Новосибирск 2010г.

1. Исходные ORIGIN := 1

данные:

Рельсы типа Р65, шпалы железобетонные, крепление КВ-65,
 кривая радиусом 600м, нагрузка - локомотив ВЛ 80.

$P_{ст} := 105000$ - статическая нагрузка на ось,
 Н

$q_k := 9950$ - нагрузка от неподрессоренной массы,
 отнесенная к одному колесу, Н

$J_p := 2.00 \cdot 10^6$ - приведенная к колесу жесткость
 рессорного подвешивания, Н/м

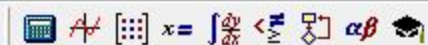
$f_{ст} := 0.046 = 0.046$ - статический прогиб
 рессор, м

$d := 0.95$ - диаметр колеса, м

$L1 := 1.85$ - расстояния между осями колесных

пар, м
 $L2 := \text{if}(L2 < 0.1, 100, L2)$





$n_v := 4$ - количество расчетных значений скорости $i := 1..n_v$

$v_{km_i} :=$

20
40
60
80

- скорость движения, км/ч

$e_0 := 0.00067$ - расчетная глубина изолированной неровности на колесе при буксовых подшипниках качения локомотивов, м (вагонов - 0.001)

$f_1 := 1.18$ - коэффициент для направляющих осей локомотива, для прямых

$f_2 := 1.33$ - коэффициент для направляющих осей локомотива, для кривой

$j := 1..4$

$f_3 := f_1$

$f_4 := f_2$

$U_j :=$ - модуль упругости рельсового основания, МПа

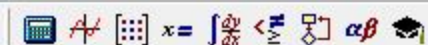
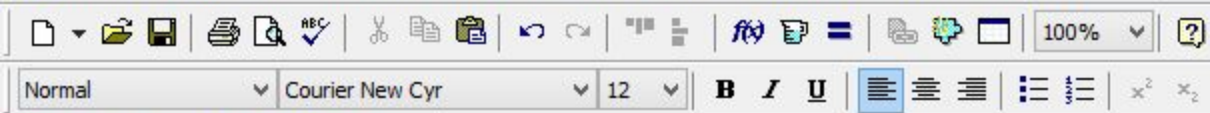
120 - лето прямая

130 - лето кривая

156 - зима прямая

169 - зима кривая

$$v_i := \frac{v_{km_i}}{3.6}$$



$l_1 := 0.55$ - расстояние между осями шпал в прямой

$l_3 := l_1$

$l_2 := 0.5$ - расстояние между осями шпал в кривой

$l_4 := l_2$

$I := 3208 \cdot 10^{-8}$ - момент инерции поперечного сечения рельса при износе 6 мм (табл. П.2.1), m^4

$W_{п} := 417 \cdot 10^{-6}$ - момент сопротивления рельса Р65 износ 6 мм, m^3

$\beta := 0.87$ - коэффициент, учитывающий тип рельса

$\gamma := 1.0$ - коэффициент, учитывающий род балласта - щебень (щебень, асбест - 1, песок - 1.5)

$\varepsilon := 0.322$ - коэффициент, учитывающий материал ж/б шпал по сравнению с деревянными

$\alpha_1 := 0.931$ - коэффициент, учитывающий изменение колеблющейся массы пути на железобетонных шпалах по сравнению с деревянными

$\alpha_0 := 0.403$ - коэффициент, учитывающий влияние колеблющейся массы пути на ж/б шпалах (деревянные - 0.433)

$a := 0.015$ - эмпирические коэффициенты максимального прогиба рессор для данного типа подвижного состава

$b_1 := 0$

$a := 0.015$ – эмпирические коэффициенты максимального прогиба рессор для данного типа подвижного состава
 $b1 := 0$

$кдэ := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ – эмпирические коэффициенты вертикальной динамики для данного типа подвижного состава

$\omega := 0.021$ – опорная площадь подрельсовых прокладок при промежуточном скреплении типа КВ-65,

$\Omega\alpha := 0.2975$ – эффективная площадь железобетонной полушпалы с учетом изгиба, $м^2$

$h := 0.60$ – толщина балластного слоя под ж/б шпалой, м

$b := 0.27$ – ширина подошвы шпалы, м

$r1 := 0.7$ – параметр, учитывающий влияние материала шпал на напряжения (дерево – 0.8, железобетон – 0.7)

Normal Courier New Cyr
 Мой сайт Go

Проверка орфографии...
 Анимация
 Защита рабочего листа...
Вычислить
 Оптимизировать
 Отладка
 Отключить вычисление
 Источник ошибки
 Лицензия
 Параметры рабочего листа...
 Свойства...

100%
 Вычислить сейчас F9
Вычислить рабочий лист Ctrl+F9
 Автоматическое вычисление

$$\begin{aligned}
 a &:= 0.015 - \text{эмпирический коэффициент прогиба} \\
 b1 &:= 0 - \text{составляющая} \\
 \text{где } &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\omega := 0.021$$

- опорная площадь подрельсовых прокладок при промежуточном скреплении типа КВ-65,

$$\Omega\alpha := 0.2975$$

- эффективная площадь железобетонной полushпалы с учетом изгиба, м^2

$$h := 0.60$$

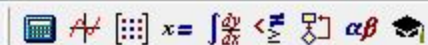
- толщина балластного слоя под ж/б шпалой, м

$$b := 0.27$$

- ширина подошвы шпалы, м

$$r1 := 0.7$$

- параметр, учитывающий влияние материала шпал на напряжения (дерево - 0.8, железобетон - 0.7)



**Результаты
расчетов :**

$$P_{cp} = \begin{pmatrix} 118328 \\ 124527 \\ 130725 \\ 136924 \end{pmatrix} \quad , \quad H \quad S = \begin{pmatrix} 4300 & 4454 & 5062 & 5265 \\ 5593 & 5600 & 6380 & 6423 \\ 7399 & 7241 & 8281 & 8137 \\ 9571 & 9247 & 10609 & 10275 \end{pmatrix} \quad , \quad H$$

$$P_{расч} = \begin{pmatrix} 129078 & 129462 & 130984 & 131490 \\ 138510 & 138528 & 140476 & 140584 \\ 149224 & 148828 & 151428 & 151067 \\ 160853 & 160041 & 163447 & 162611 \end{pmatrix} \quad , \quad H$$

$$P_{1экв} = \begin{pmatrix} 118309 & 119467 & 122716 & 123956 \\ 127177 & 128010 & 131775 & 132655 \\ 137327 & 137787 & 142293 & 142744 \\ 148391 & 148476 & 153880 & 153893 \end{pmatrix} \quad , \quad H$$

$$\begin{pmatrix} 125374 & 125405 & 126322 & 126646 \\ 134612 & 134259 & 135570 & 135486 \end{pmatrix}$$



Normal Courier New Cyr 12 **B** *I* U x^2 x_2

$x = \int \frac{1}{x} dx$ $\alpha\beta$

Мой сайт Go

$$\sigma_{\text{ПО}} = \begin{pmatrix} 48.8 & 48.3 & 47.4 & 47 \\ 52.5 & 51.8 & 50.9 & 50.3 \\ 56.7 & 55.7 & 55 & 54.1 \\ 61.2 & 60.1 & 59.5 & 58.3 \end{pmatrix}, \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{ПК}} = \begin{pmatrix} 57.6 & 64.3 & 56 & 62.5 \\ 61.9 & 68.9 & 60.1 & 66.8 \\ 66.9 & 74.1 & 64.9 & 71.9 \\ 72.3 & 79.9 & 70.2 & 77.5 \end{pmatrix}, \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{Ш}} = \begin{pmatrix} 2.39 & 2.21 & 2.57 & 2.39 \\ 2.56 & 2.37 & 2.75 & 2.55 \\ 2.76 & 2.55 & 2.97 & 2.75 \\ 2.98 & 2.74 & 3.21 & 2.96 \end{pmatrix}, \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{б}} = \begin{pmatrix} 0.168 & 0.156 & 0.181 & 0.168 \\ 0.181 & 0.167 & 0.194 & 0.18 \\ 0.195 & 0.18 & 0.21 & 0.194 \\ 0.21 & 0.193 & 0.227 & 0.209 \end{pmatrix}, \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{h}} = \begin{pmatrix} 0.0469 & 0.0464 & 0.0494 & 0.049 \\ 0.0503 & 0.0496 & 0.053 & 0.0524 \\ 0.0542 & 0.0533 & 0.0572 & 0.0563 \\ 0.0584 & 0.0574 & 0.0617 & 0.0607 \end{pmatrix}, \text{ МПа}$$

Результаты автоматизированного расчета представлены в таблицах 2 и 3. На рисунках 1 – 5 представлены графики зависимости напряжений в элементах ВСП от скорости движения подвижного состава.

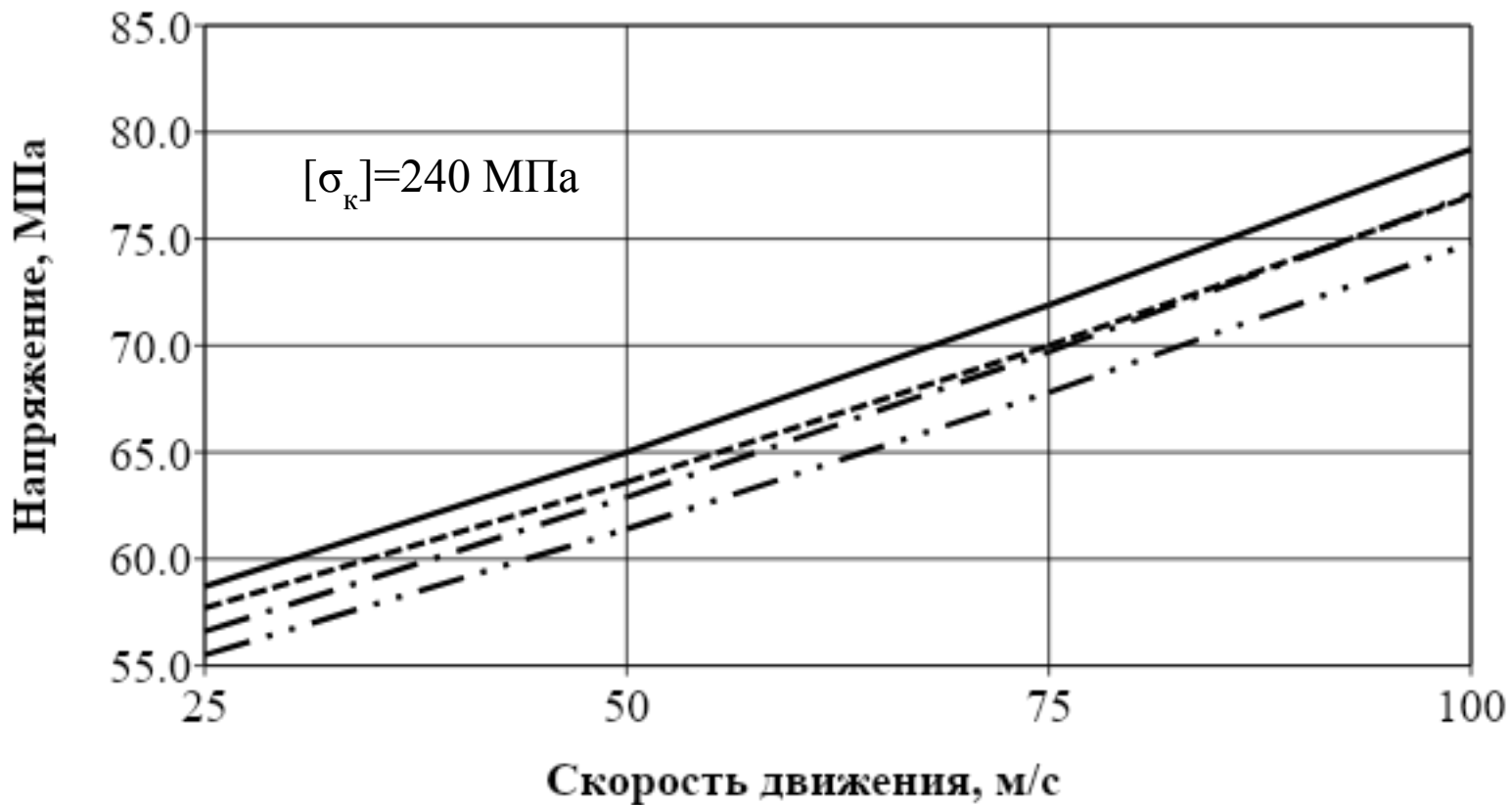
Таблица 2 – Результаты расчета нагрузки

Скорость движения, v , м/с	Расчетная нагрузка от колеса на рельс, $P_{расч}$, Н	Среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс, $P_{ср}$, Н	Изгибающий момент, M , Нм	Давление рельса на шпалу, Q_0 , Н	Максимальный прогиб рельса, y , м
Электровоз ВЛ-**					
прямая, лето					
$v/4$					
$2*(v/4)$					
$3*(v/4)$					
v					
кривая, лето					
...					
прямая, зима					
...					
кривая, зима					
...					
Четырехосный грузовой вагон					
прямая, лето					
...					
кривая, лето					
...					
прямая, зима					
...					
кривая, зима					
...					

Таблица 3 – Результаты расчета напряжений

Скорость движения, v , м/с	Напряжения, МПа				
	в подошве рельса по оси, $\sigma_{по}$	в кромке подошвы рельса, $\sigma_{нк}$	в подрельсовой прокладке, $\sigma_{ш}$	в балластном слое, $\sigma_{б}$	на основной площадке земляного полотна, σ_h
Электровоз ВЛ-**					
прямая, лето					
$v/4$					
$2*(v/4)$					
$3*(v/4)$					
v					
кривая, лето					
...					
прямая, зима					
...					
кривая, зима					
...					
Четырехосный грузовой вагон					
прямая, лето					
...					
кривая, лето					
...					
прямая, зима					
...					
кривая, зима					
...					

На рисунках 1 – 5 представлены графики зависимости напряжений в элементах верхнего строения пути от скорости движения (в соответствии с таблицей 3 составить 5 графиков).



— — прямая летом; - - - — кривая летом; - · - — прямая зимой; - · · - — кривая зимой

Рисунок 1 – Зависимость осевых напряжений в подошве рельса от скорости движения электровоза ВЛ-**

Из анализа рисунков 1 – 5 видно, что напряжения во всех элементах верхнего строения пути и на основной площадке земляного полотна не превышают допусковые. Следовательно, рассматриваемая конструкция пути удовлетворяет условию прочности, и ее можно использовать в заданных условиях эксплуатации без усиления и без снижения скоростей движения поездов.