

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 1

Воздействия на путь и его сопротивляемость внешним воздействиям

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

Виды воздействий

Железнодорожный путь и подвижной состав составляют единую, механическую систему, в которой они взаимодействуют, находясь в зависимости друг от друга. Путь подвергается воздействию:

- 1) подвижного состава. При этом воздействие локомотивов определяет прочность пути, а вагонов, как массовых нагрузок, – остаточные деформации;
- 2) природно-климатических факторов, из которых основные – температура и атмосферные осадки;
- 3) собственных (внутренних) напряжений, возникающих в элементах верхнего строения пути, главным образом в рельсах, при их изготовлении, укладке и эксплуатации.

В конструкции пути должна быть обеспечена надлежащая сопротивляемость этим воздействиям.

Методика расчетов верхнего строения пути на прочность и устойчивость позволяет решать ряд задач:

- определение напряжений и деформаций в элементах верхнего строения пути в заданных условиях эксплуатации;
- оценка возможности повышения осевых нагрузок и скоростей движения при заданной конструкции пути;
- определение возможности работоспособности конструкции пути до очередного капитального ремонта;
- анализ причин потери прочности и устойчивости пути;
- проектирование новых конструкций.

Структурная схема расчетов верхнего строения пути на прочность и устойчивость представлена на рис. 1.

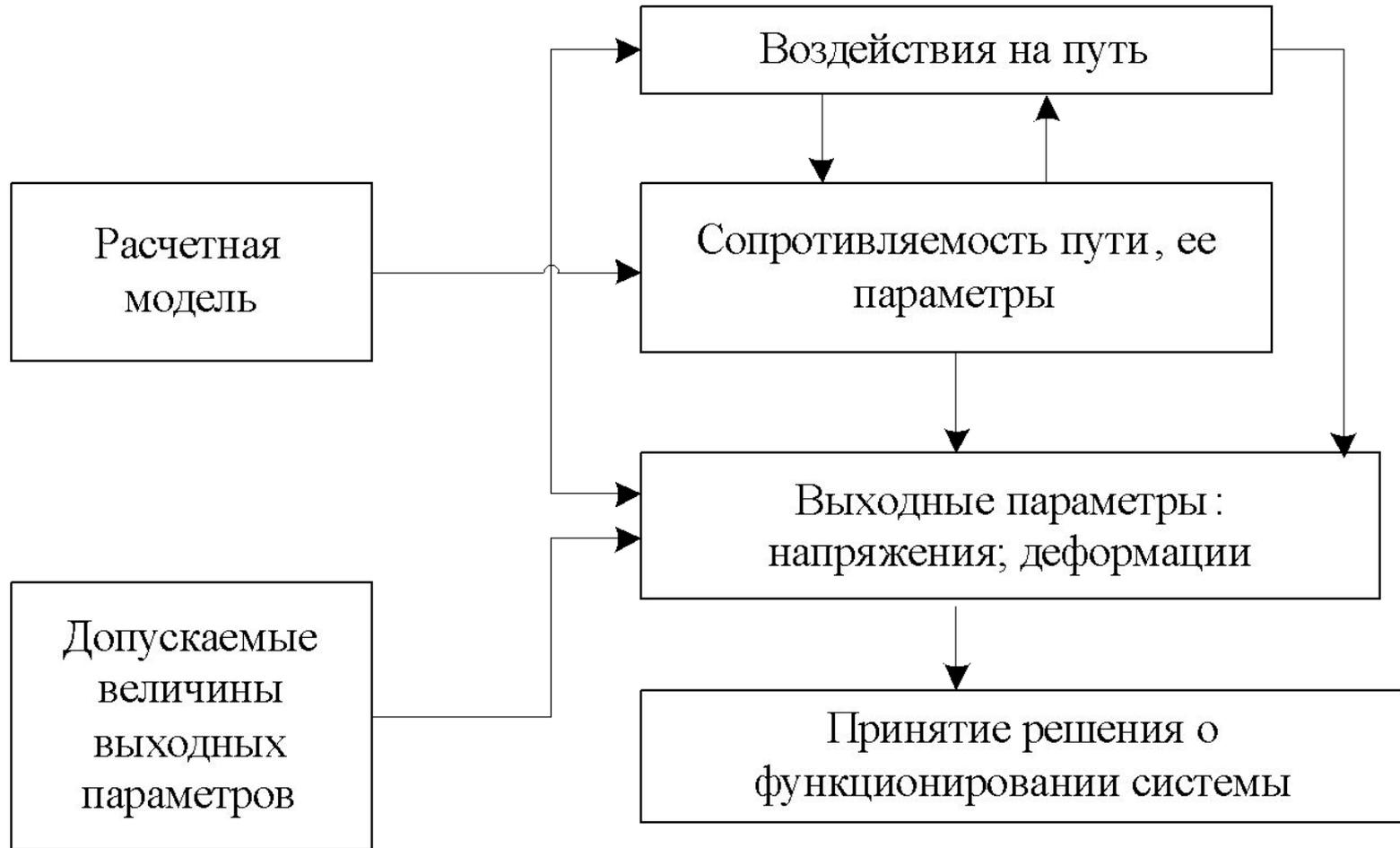


Рис. 1. Структурная схема расчетов на прочность и устойчивость

Динамическая нагрузка от колеса передается на головку рельса по небольшой площадке. Площадь эллипса упругого контакта $1,2...2,2 \text{ см}^2$. При внецентренном приложении нагрузки в кромках подошвы рельса возникают напряжения изгиба и кручения ($100...300 \text{ МПа}$). Напряжения на шпале под металлической подкладкой бывают в пределах $1...3 \text{ МПа}$, на основной площадке земляного полотна – $0,05...0,09 \text{ МПа}$, а при очень высоких осевых нагрузках и больших неровностях пути могут быть и больше (рис. 2).

Конструкция пути обладает распределяющей способностью.

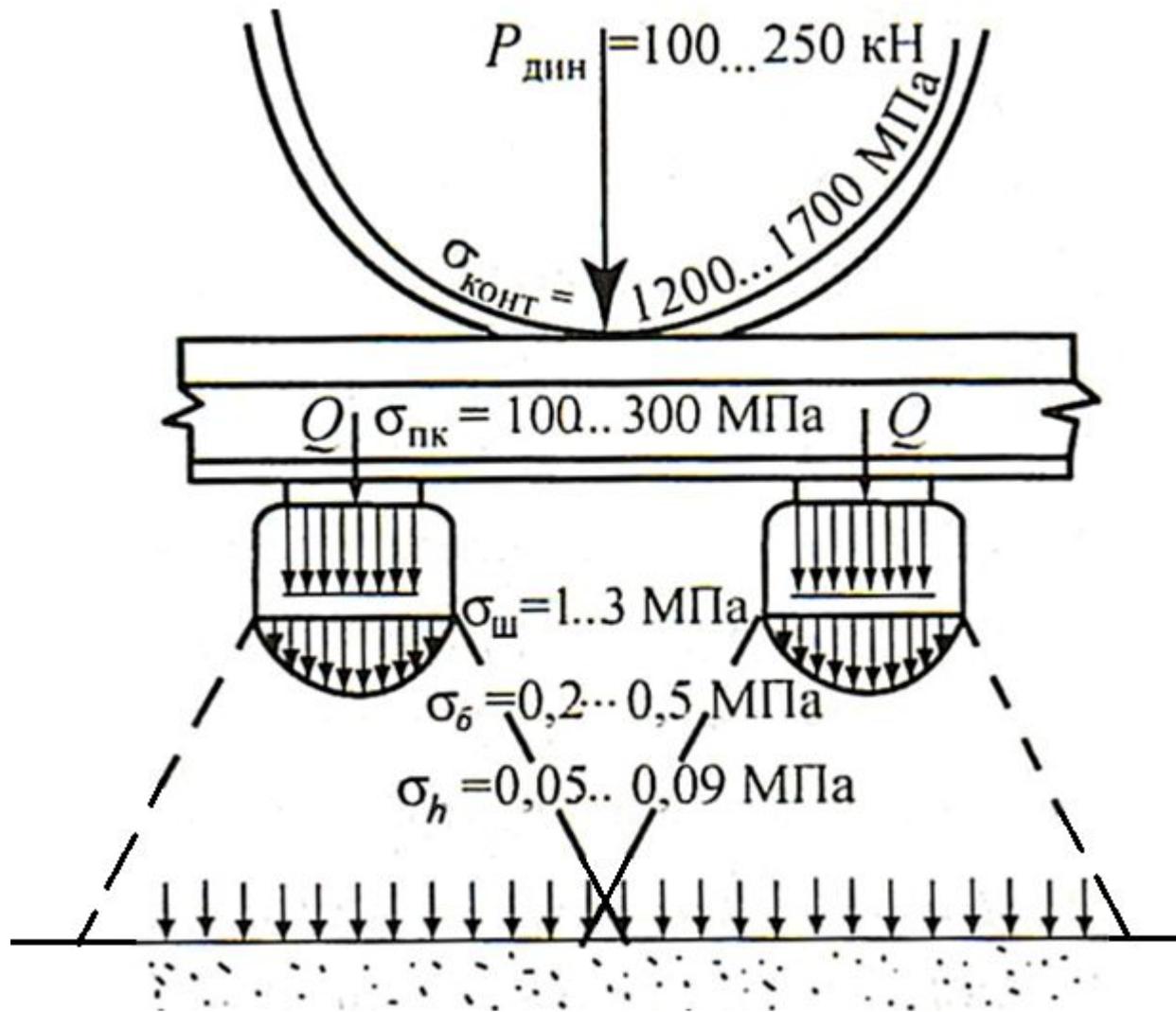


Рис. 2. Схема передачи вертикальной нагрузки от колеса на основание пути: P – вертикальная сила; $\sigma_{\text{пк}}$ – напряжение в кромках подошвы рельса; $\sigma_{\text{ш}}$ – в шпале (в прокладке) под подкладкой; $\sigma_{\text{б}}$ – в балласте под шпалой; $\sigma_{\text{г}}$ – на основной площадке земляного полотна

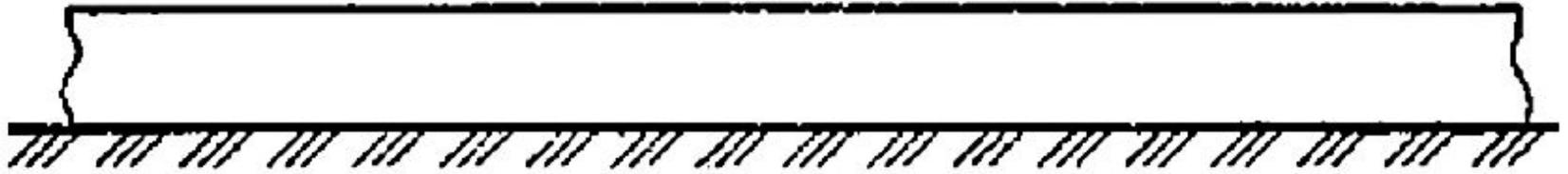
При больших напряжениях на основной площадке земляного полотна принимаются меры по ее усилению (рис. 3)



Рис. 3. Современная конструкция верхнего строения пути

Основы статического расчета пути на прочность

Расчетная схема

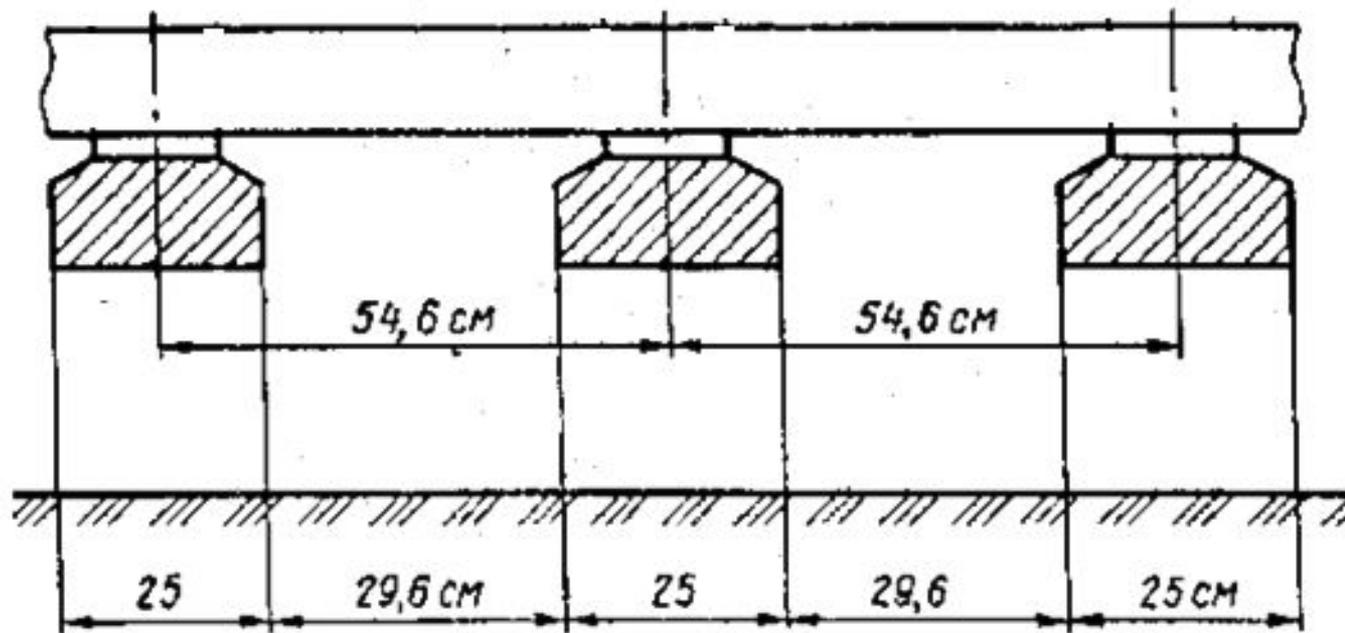


Балка на сплошном упругом основании

Рельс рассматривается как балка бесконечной длины, лежащая на сплошном упругом основании.

Фактически путь имеет упруго-прерывистое основание.

Реальная конструкция



Замена такой фактической схемы на сплошное упругое основание определяет разницу в величинах напряжений в рельсах в 2-4%.

Можно рассматривать рельс как балку постоянного сечения на упругих поперечных опорах. Разницы в величинах напряжений по сравнению с первой схемой 5-7%.

Расчетная схема



Первая схема имеет достаточно простое аналитическое решение, удобна, дает простые расчетные формулы, достаточно точна, поэтому в настоящее время пользуются ею.

Под действием силы P рельс как балка на сплошном упругом основании изогнется следующим образом (рис. 4).

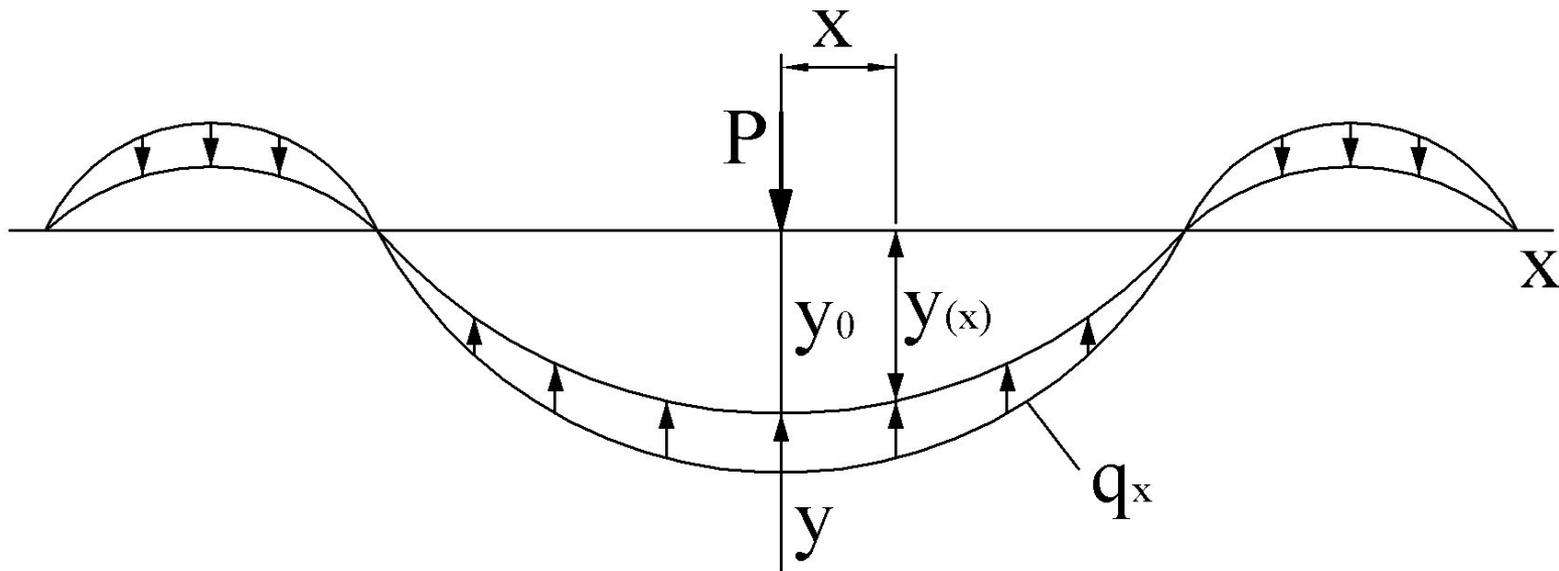


Рис. 4. Изогнутая ось рельса под нагрузкой P и упругий отпор основания q_x

Связь между упругим прогибом y_x в каждом сечении и погонным упругим отпором q_x в том же сечении выражается зависимостью:

$$q_x = -Uy_x$$

Знак минус означает, что отпор направлен в сторону, противоположную направлению внешней силы (и прогибу).

Связь между прогибом y и отпором q – линейная двухсторонняя; U – коэффициент пропорциональности, так называемый модуль упругости подрельсового основания.

Модуль упругости представляет собой погонный упругий отпор основания, отнесенный к единице прогиба. Этот параметр является в расчетах пути важнейшим. Определяется он экспериментально.

На пути с деревянными шпалами летом U находится в границах 20-40 МПа.

На пути с железобетонными шпалами $U=100-150$ МПа.

Зимой в районах с промерзанием грунта U увеличивается в 1,5-2 раза, а при железобетонных шпалах – в 1,3 - 1,5 раза.

В кривых радиусом 1200 м и менее модуль упругости увеличивается в 1,1 раза из-за увеличения эпюры.

Вывод расчетных уравнений

По теореме Шведлера-Жуковского в интервале между сосредоточенными силами

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = q$$

с учетом собственного веса балки p

$$EJy^{IV} = q + p$$

Обычно величиной p пренебрегают.

В этих формулах

EJ – физико-геометрический фактор жесткости балки;

E – модуль упругости рельсовой стали;

J – момент инерции рельса относительно горизонтальной оси.

Примем $p = 0$; $q = -Uy$,

тогда $EJy^{IV} + Uy = 0$

Разделим уравнение на EJ получим:

$$y^{IV} + \frac{U}{EJ}y = 0$$

Получено дифференциальное уравнение четвертого порядка без правой части с постоянными коэффициентами.

Введем обозначение:

$$\frac{U}{EJ} = 4k^4$$

тогда

$$y^{IV} + 4k^4 y = 0$$

Введенный для решения уравнения параметр

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

является одной из важнейших характеристик расчета пути на прочность.

Ему дано название коэффициента относительной жесткости рельсового основания и рельса. Название соответствует структуре формулы для k .

Он находится обычно в границах 0,9-1,8 м⁻¹.

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 2

Вывод и анализ расчетных уравнений

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

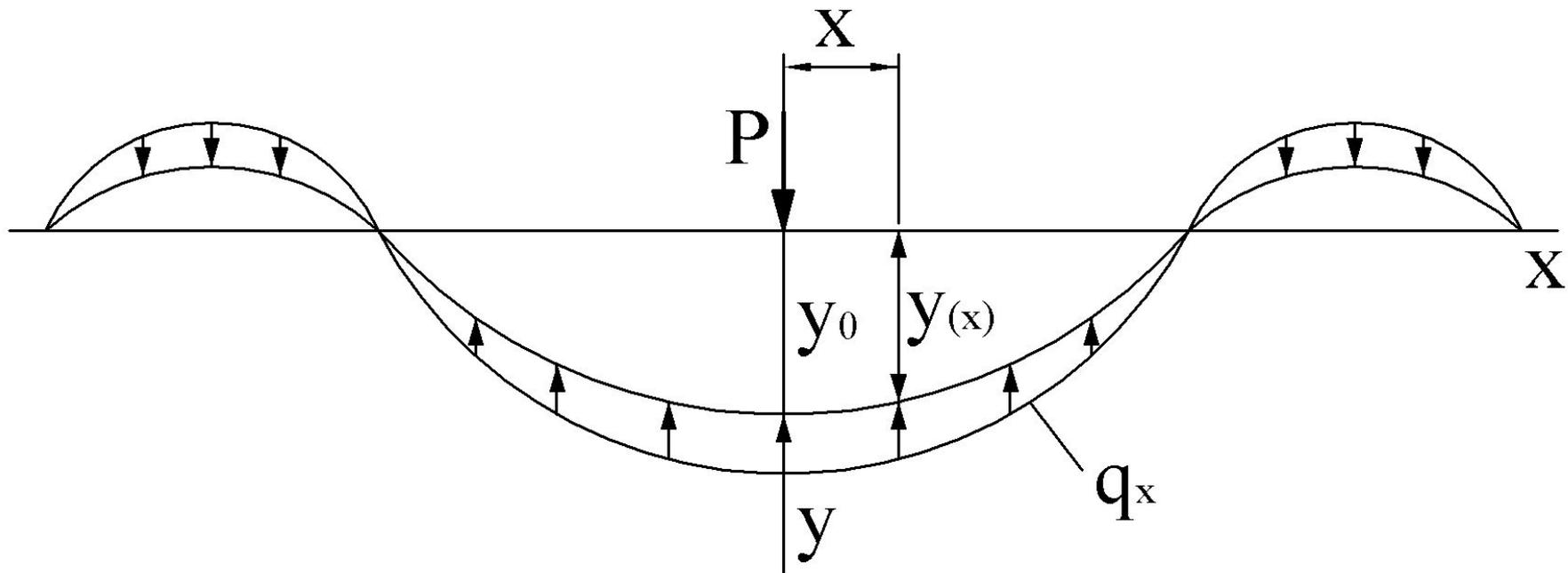


Рис. 1. Изогнутая ось рельса под нагрузкой P и упругий отпор основания q_x

Получено дифференциальное уравнение четвертого порядка без правой части с постоянными коэффициентами

$$y^{IV} + 4k^4y = 0.$$

Характеристическим уравнением для дифференциального уравнения является

$$r^4 + 4k^4 = 0,$$

корни его

$$r_{1,2} = k(1 \pm i) \text{ и } r_{3,4} = -k(1 \pm i).$$

Общий интервал линейного дифференциального уравнения четвертого порядка с постоянными коэффициентами

$$y = C_1 e^{kx} \cos kx + C_2 e^{kx} \sin kx + C_3 e^{-kx} \cos kx + C_4 e^{-kx} \sin kx$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 определяются из граничных условий

- 1) при $x \rightarrow \infty$ должно $y \rightarrow 0$, что может быть только при $C_1 = C_2 = 0$;
2) при $x=0$; $\frac{dy}{dx} = 0$ из условия симметрии:

касательная к оси балки в начале координат горизонтальна;

- 3) поперечная сила – равнодействующая всех сил, действующих справа и слева от сечения, из условия равновесия при $x=0$ равна половине реакции основания всей балки, т.е.

$$EJy''' = -\frac{P}{2}$$

Из этих двух условий находятся постоянные интегрирования C_3 и C_4 .

После чего определим

$$y = \frac{Pk}{2U} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx)$$

Изгибающий момент $M = - EJy''$

тогда

$$M = \frac{P}{4k} e^{-kx} (\cos kx - \sin kx)$$

Давление на опору при распределенном отпоре основания q

$$Q = - ql = Uy',$$

где l – расстояние между осями опор.

тогда

$$Q = \frac{Pkl}{2} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx)$$

На основании указанного получим:

$$y = \frac{k}{2U} P \eta(kx);$$

$$Q = \frac{kl}{2} P \eta(kx);$$

$$M = \frac{1}{4k} P \mu(kx),$$

где Функции $\eta(kx) = e^{-kx} (\cos kx + \sin kx)$ }
 $\mu(kx) = e^{-kx} (\cos kx - \sin kx)$ }
 линейный влияния

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ}} (m^{-1})$$

При $x=0$ $\eta=1$ упругий прогиб рельса под одиночной силой P :

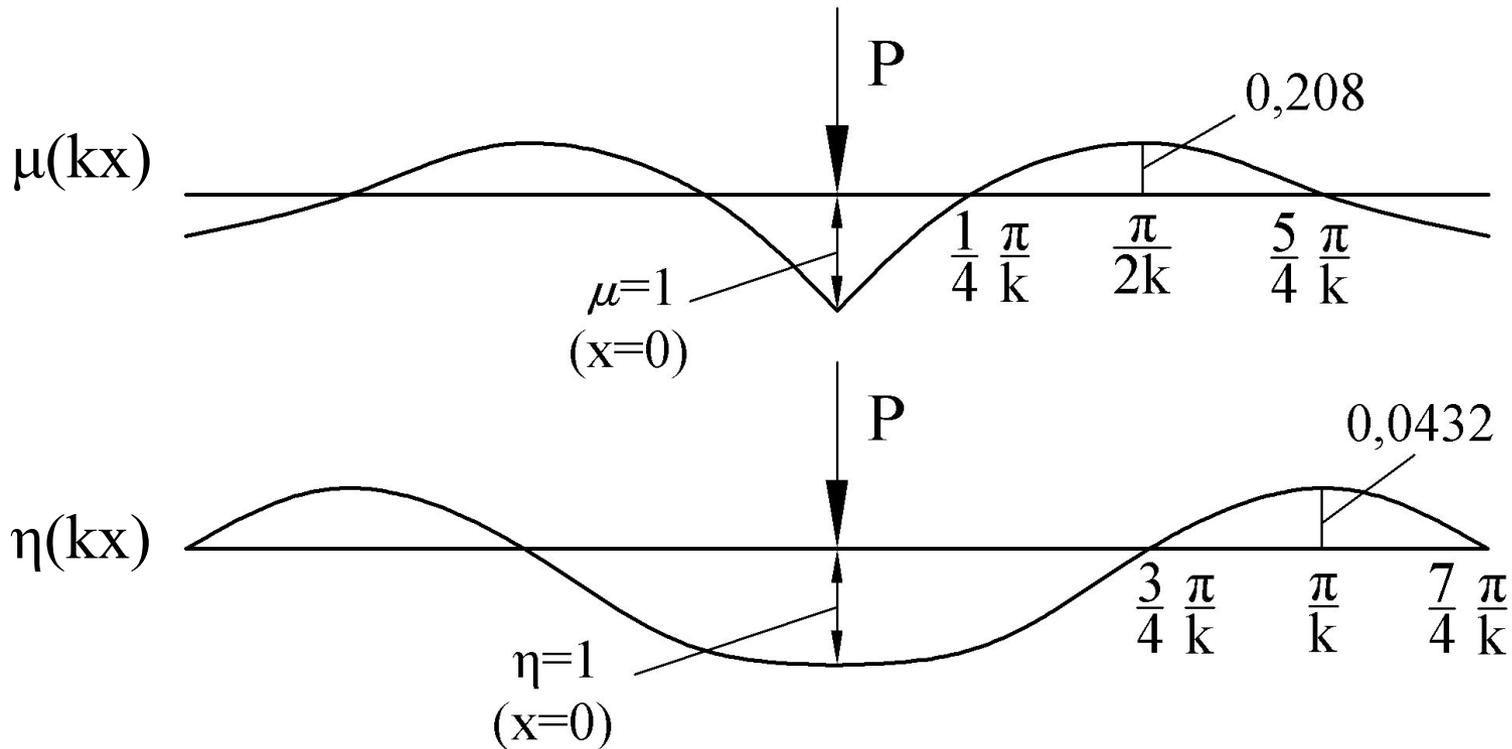
$$y = y_0 = \frac{k}{2U} P$$

Жесткость пути: $J_{\Pi} = \frac{P}{y_0} = \frac{2U}{k}$

Анализ расчетных зависимостей

В соответствии с формулами значения u и Q пропорциональны $\eta(kx)$ и M пропорционален $\mu(kx)$. Рассмотрим эпюры $\eta(kx)$ и $\mu(kx)$. При $P=1$ эпюры $\eta(kx)$ и $\mu(kx)$ являются линиями влияния.

Эпюры функций от одиночного груза



Нулевые значения этих величин определяются из условия $\eta(kx) = 0$ и $\mu(kx) = 0$, а относительные экстремумы – из условия $\eta'(kx) = 0$ и $\mu'(kx) = 0$.

В начале координат при $x=0 \rightarrow \eta = \mu = 1$.

Первые максимумы:

$$\eta(kx)_{\min} = -e^{-\pi} \approx -0,0432 \text{ при } x = \pi/k$$

$$\mu(kx)_{\max} = -e^{-\pi/2} \approx -0,208 \text{ при } x = \pi/2k$$

Вторые максимумы совсем незначительные

$$\eta(kx)_{\max} = 0,00187 \text{ и } \mu(kx)_{\min} = 0,00898.$$

Воздействие на путь системы нагрузок

По законам линейной механики, если на путь действует несколько независимых сил, то воздействие от них суммируется.

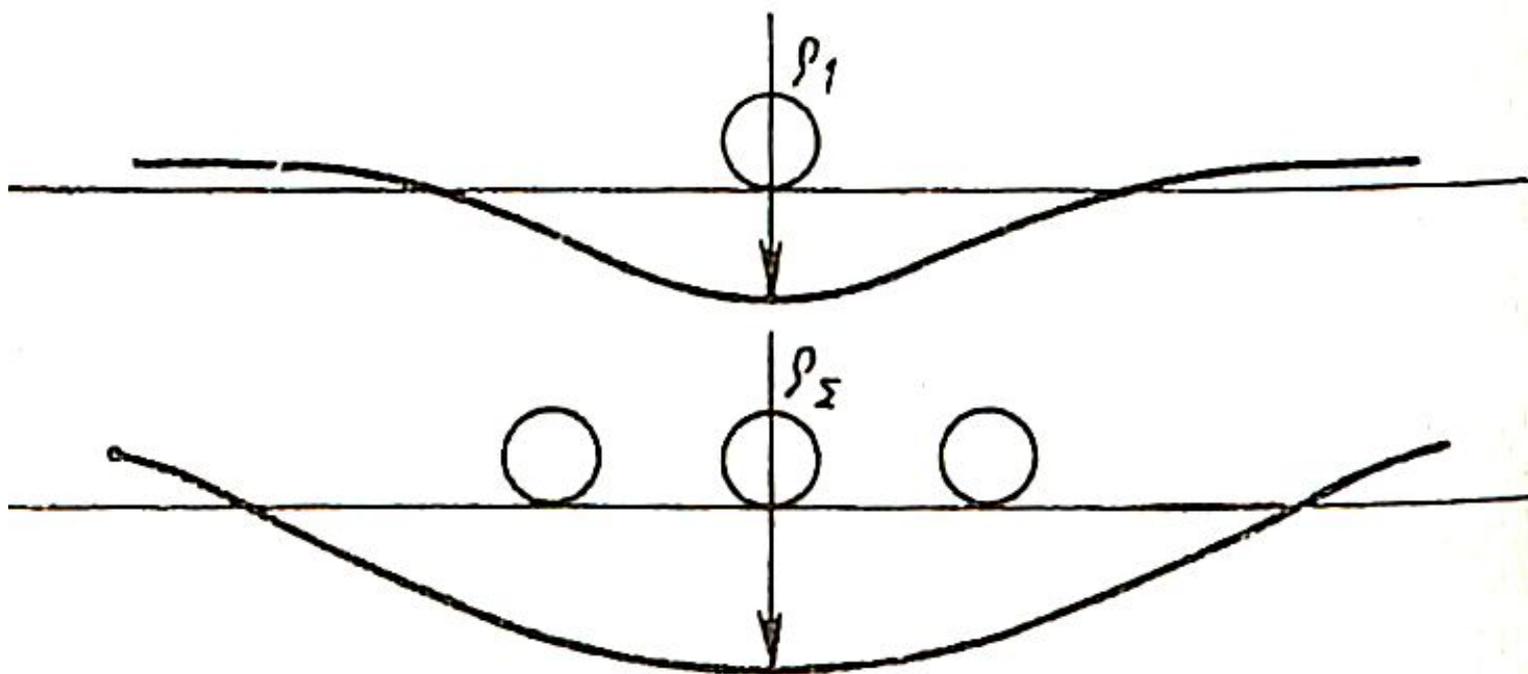
Эпюры y , Q , M от силы $P = 1$ являются одновременно линиями влияния. Поэтому от системы грузов

$$y = \frac{k}{2U} \sum P_i \eta(kx)$$

$$Q = \frac{kl}{2} \sum_{i=1}^n P_i \eta(kx)$$

$$M = \frac{1}{4k} \sum_{i=1}^n P_i \mu(kx)$$

Силы $\Sigma P_i \eta(kx)$ и $\Sigma P_i \mu(kx)$ называют эквивалентными грузами. Влияние колес, отстоящих более чем на 3,5-4,5 м от рассматриваемого сечения столь незначительно, что им обычно пренебрегают.



Для того, чтобы определить, под каким колесом будет экстремум той или иной величины, начало координат принимают поочередно под каждым колесом, т.е. допускается возможность каждому колесу оказаться расчетным.

При близко расположенных друг от друга колесах соседние с расчетным нередко попадают в зону отрицательных значений μ , уменьшая суммарный изгибающий момент. В то же время значения u и Q могут находиться еще в пределах положительных значений $\eta(x)$, так как расстояние до нулевой точки линии влияния $\eta(x)$ в три раза больше, чем $\mu(x)$.

Физически это объясняется тем, что близко расположенные соседние колеса увеличивают прогиб под расчетным колесом, вместе с тем делают более пологой линию прогиба около расчетного колеса, уменьшая кривизну, а следовательно и момент, который равен:

$$M = -EJy'' = -\frac{EI}{\rho}.$$

Воздействия на путь подвижного состава

Общие сведения.

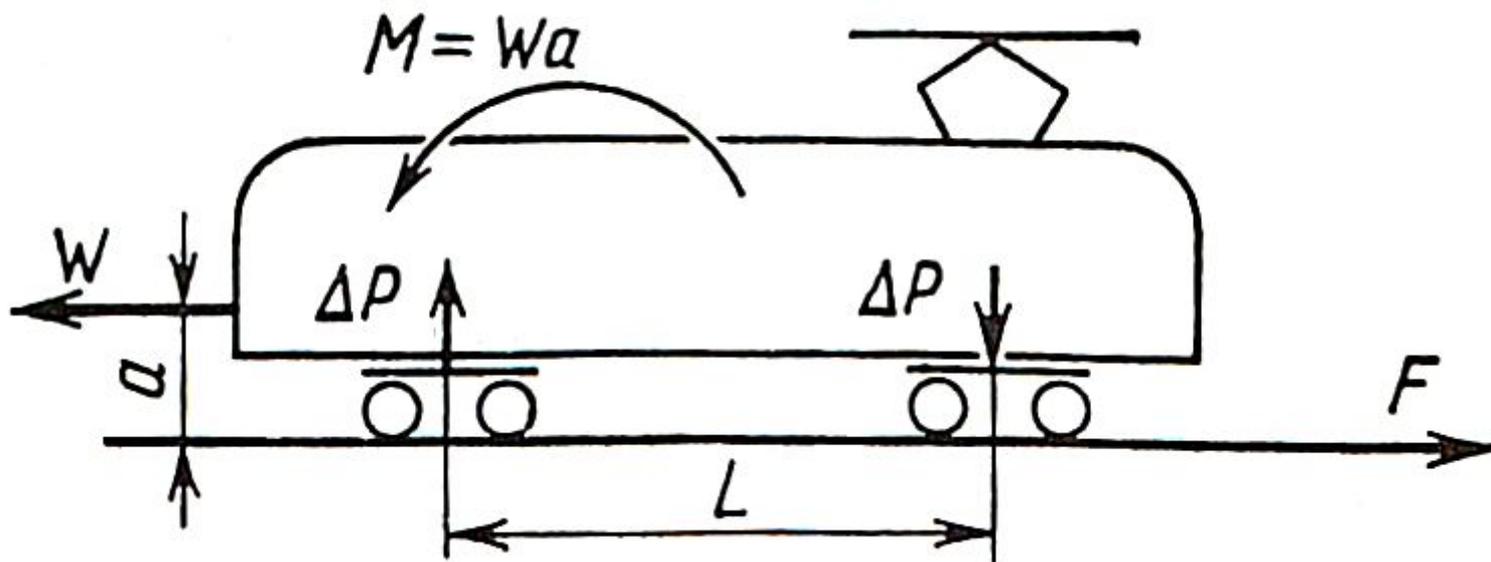
Как известно, любая единица подвижного состава имеет необрессоренную часть (колесные пары и буксовые узлы), комплекты пружин (рессор) и опирающийся на них кузов – надрессорное строение (обрессоренная масса). Современные локомотивы и вагоны – тележечного типа.

Статическое воздействие на путь стоящего экипажа определяется его массой и числом осей. При движении воздействие экипажа на путь становится значительно сложнее.

$$P_{\text{ст}} = \frac{Q}{n},$$

где Q – вес экипажа, n – число осей или колес.

Уже в момент трогания локомотива весовая нагрузка перераспределяется между его тележками, так как момент сил сопротивления, действующих на уровне автосцепки, разгружает переднюю и перегружает заднюю тележку (до 20 – 30 кН).



Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 3

Теоретические основы определения вертикальных динамических сил

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

При движении экипажа на путь действуют, кроме сил тяжести, также силы инерции, появляющиеся при совместных колебаниях подвижного состава и пути в вертикальной плоскости.

Наряду с этим путь и колеса подвижного состава имеют ряд несовершенств, каждое из которых вызывает добавочные силы инерции.

Несовершенства пути и подвижного состава.

Неровности на пути:

1) явные или геометрические. Их можно разделить на два вида: неровности продольного пути, устанавливаемые нивелировкой по головке рельсов; микронеровности на поверхности катания головок рельсов, обусловленные волнообразным износом рельсов. Измеряются специальными приборами, имеющими прямолинейную базу, например, линейками;

2) неявные (потайные) или силовые, образующиеся из-за неплотного прилегания элементов верхнего строения пути друг к другу и выборки люфтов под нагрузкой (их можно обнаружить при медленном прокатывании колес по пути, т.е. без ускорений).

Ординаты неровности на пути ($\eta_{\text{п}}$) представляют собой сумму ординат геометрических и силовых неровностей.

При наличии этих неровностей при взаимодействии колеса и рельса возникает вертикальная сила инерции $P_{\text{нп}}$.

Несовершенства колес:

1) несовпадение центра тяжести колеса с центром вращения, которое вызывает дисбаланс;

2) неравномерности проката (износа) колеса по среднему кругу катания («ползун» – до 2 мм).

3) овальность колес (допускается 1 мм).

Все это вызывает дополнительные силы инерции, обусловленные несовершенствами колес (неровностями η_k на колесах). Вертикальная составляющая этих сил $P_{нк}$ является знакопеременной.

Таким образом, путь и колеса обладают различными несовершенствами в виде неровностей явных (геометрических) или неявных (силовых). Кроме того, все неровности можно разделить на два характерных вида:

- изолированные (их влияние на величину сил инерции заканчивается до следующей неровности);
- непрерывные (непосредственно примыкают друг к другу).

Колебания кузова и необрессоренных масс мало влияют друг на друга. Поэтому эти колебания можно рассматривать отдельно, описывать их самостоятельными дифференциальными уравнениями, а затем общий эффект определять с использованием принципа суперпозиции.

Колебания необрессоренных масс подвижного состава на пути. Пусть колесо при движении не отрывается от рельса. Рассмотрим вначале физико-механическую схему процесса их взаимодействия.

Физическая модель

Расчетная (колебательная)

модель

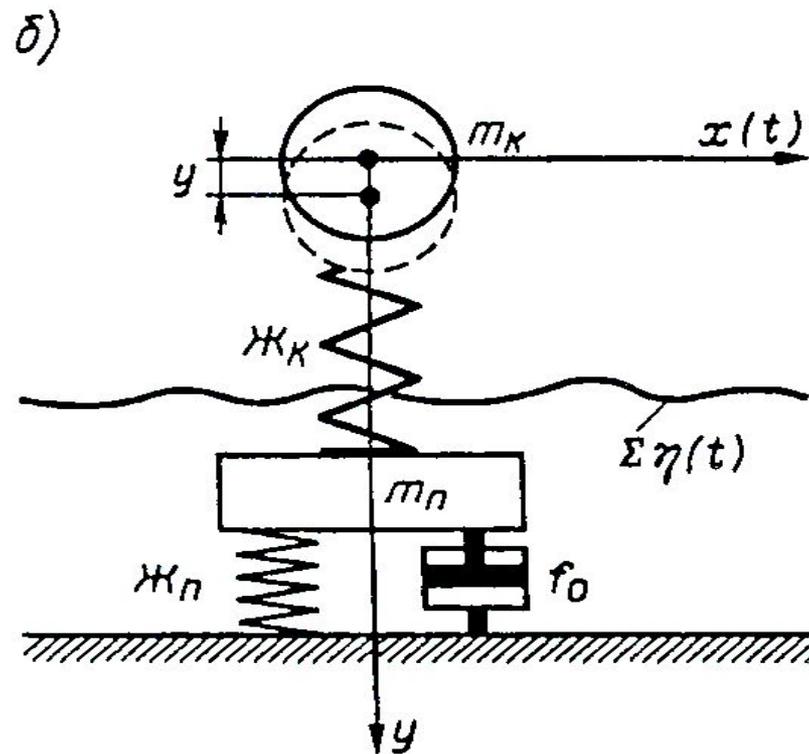
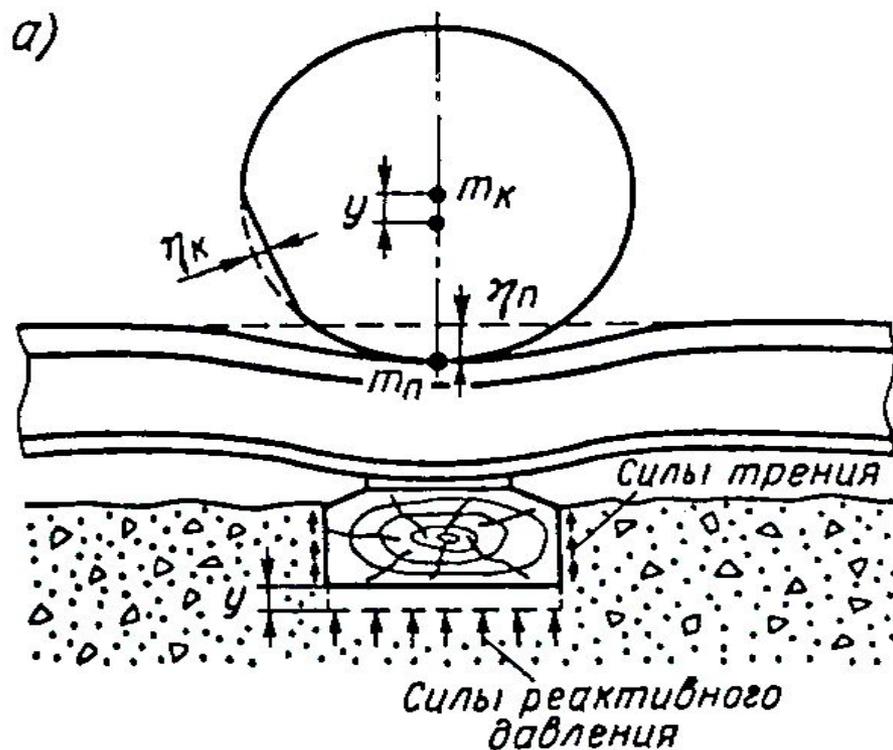


Рис. 1

Колебания необрессоренной массы на пути можно описать расчетной моделью, изображенной на рис.1, где:

$$m_k - \text{необрессоренная масса колеса: } m_k = \frac{q_k}{g};$$

m_{Π} – условная масса колеблющегося пути, сосредоточенная в точке контакта колеса с рельсом (2 - 4 м);

J_k – жесткость колеса;

J_{Π} – жесткость пути, приведенная к контакту колеса и рельса;

Так как $J_k \gg J_{\Pi}$, примем $J_k + J_{\Pi}$

f_0 – параметр вязкого трения, кН·с/м;

$\sum \eta(\Phi)$ функция суммарной неровности пути и колеса

$$\sum \eta(t) = \eta_k(t) + \eta_{\Pi}(t)$$

В соответствии с **принципом Д'Аламбера** внешняя сила, действующая на материальную точку, уравновешивается суммой сил (инерционной и реактивной):

$$P_{\text{инерц.}} = P_{\text{реакт.}} + P_{\text{действ.}} \quad (1)$$

В общем случае любая сила инерции равна произведению массы на ускорение, действующее на эту массу, т.е.

$$P_{\text{инерц.}} = m \ddot{y}$$

где y – вертикальное перемещение массы (для рассматриваемой схемы);

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} \text{ - скорость перемещения;}$$

$$\ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2} \text{ - ускорение перемещения.}$$

Кроме сил инерции, действуют следующие реактивные силы:

сила упругого отпора, прямо пропорциональная просадке пути y – динамическому прогибу:

$$P_{1\text{-реакт}} = J_{\Pi} y$$

Сила вязкого трения, которая прямо пропорциональна скорости вертикального перемещения (\dot{y}), т.е.

$$P_{2\text{-реакт}} = f_0 \dot{y}$$

На основании рассмотренного можно составить дифференциальное уравнение колебаний необрессоренной массы на пути:

$$(m_k + m_{\Pi}) \ddot{y} + f_0 \dot{y} + J_{\Pi} y = m_k \sum \ddot{u}(t) \quad (2)$$

сила инерции
сила неупруг. сопрот.
реактивный отпор

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение (2) решается следующим образом:

1. Все члены делятся на $(m_k + m_n)$ и вводятся новые обозначения:

$$\frac{f_0}{m_k + m_n} = 2\xi$$

где ξ - коэффициент вязкого трения (сопротивления), s^{-1} ;

$$\frac{J_n}{m_k + m_n} = \psi^2$$

где ψ - циклическая (круговая) **частота собственных свободных колебаний** колеса и пути в точке контакта, s^{-1} .

Собственные колебания возникают в системе, если ее вывести из равновесия и дать возможность колебаться дальше без вмешательства извне.

Коэффициент отношения масс

$$\frac{m_k}{m_k + m_n} = a_0$$

Таким образом, уравнение (2) теперь получить следующий вид:

$$y'' + 2\xi y' + \psi^2 y = a_0 \sum \eta(t) \quad (3)$$

При рассмотрении $\sum \eta(t)$ как непрерывной неровности ее вид может быть принят по уравнению

$$\eta(t) = a \sin(\omega t) \quad (4)$$

где a – амплитуда неровности;

$\omega = \frac{2\pi V}{l}$ - круговая частота вынужденных колебаний;

V – скорость движения;

l – длина неровности.

Тогда

$$w(t) = -a\omega^2 \sin(\omega t + \varphi)$$

Частное решение уравнения (3) при неровности, описываемой уравнением (4) имеет вид:

$$y = a \cdot \alpha_0 \cdot n \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

где n – коэффициент динамичности, который показывает, во сколько раз общий динамический прогиб рельса больше, чем статический;

φ – фаза запаздывания (максимального перемещения по отношению к максимальной амплитуде неровности).

Максимальный прогиб рельса

$$y_{\max} = a\alpha_0 n \quad (6)$$

Коэффициент динамичности

$$n = \frac{1}{\sqrt{(1 - \alpha_\omega^2)^2 + 4\alpha_\xi^2 \alpha_\omega^2}} \quad (7)$$

где $\alpha_\omega = \omega/\psi_0$; $\alpha_\xi = \xi/\psi_0$.

Коэффициент динамичности

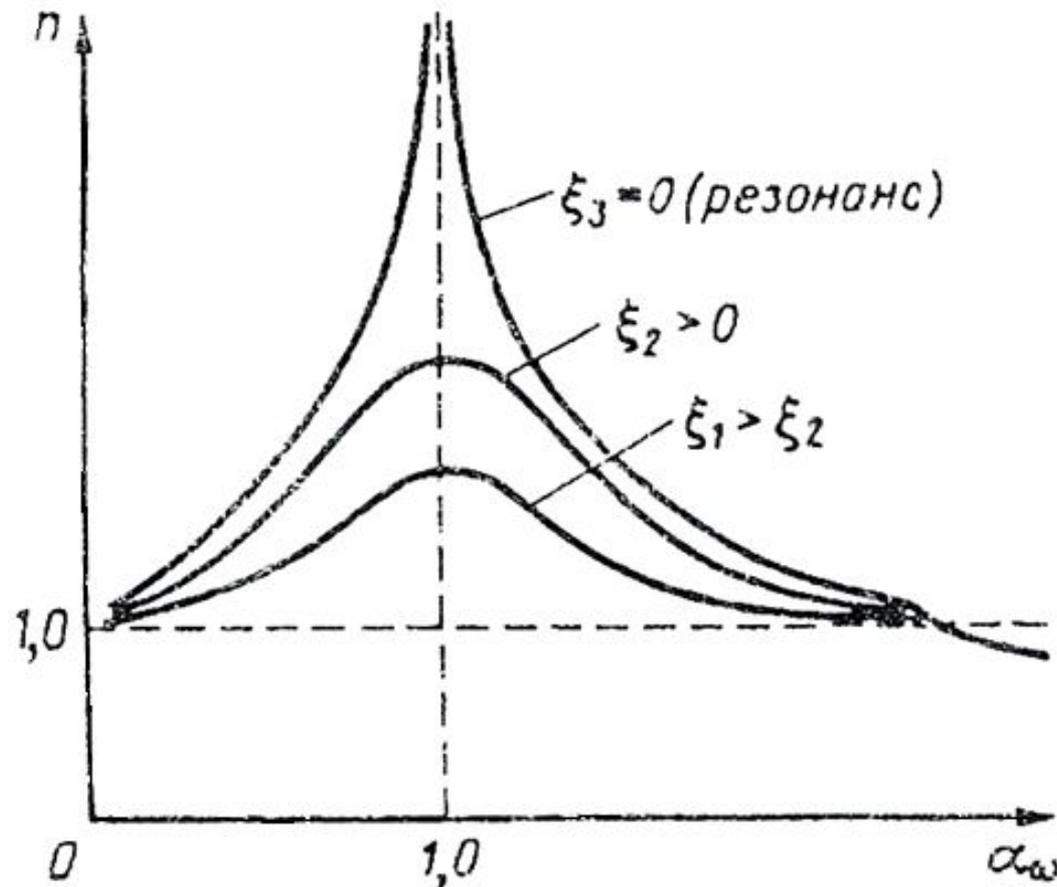


Рис. 2.

Теоретически при $\xi = 0$ и $f_0 = 0$, т.е. при отсутствии вязкого трения, $\alpha_\xi = 0$ и при $\alpha_\omega = 1,0$ в соответствии с формулой (7) $n = \infty$, т.е. может иметь место явление резонанса.

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 4

Воздействие на путь необрессоренных масс

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

Аналогично вышеизложенному решается вопрос об определении $P_{инк}$ – вертикальной силы инерции от изолированной неровности на колесе.

$$P_{инк} = Ж_{п} y_{max};$$

$$Ж_{п} = 2U/k;$$

$$y_{max} = a\alpha_0 n;$$

$$n = 1,47.$$

$$P_{инк} = 1,47 a \alpha_0 \frac{2U}{k};$$

$$P_{инк} = 2,94 a \alpha_0 \frac{U}{k}. \quad (8)$$

При рассмотрении **изолированной неровности** на пути обычно принимают, что она очерчена по косинусоиде (наиболее неблагоприятная форма неровности), т.е.

$$\eta(x) = \frac{a}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l}\right) \quad (9)$$

где a – наибольшая ордината (амплитуда) неровности длиной l .

Средний уклон этой неровности $i=2a/l$.

Тогда при $x=vt$

$$(10) \quad \eta(t) = \frac{a}{2} (1 - \cos \omega t)$$

$$\text{где } \omega = \frac{2\pi V}{l}$$

V – скорость движения;

l – длина неровности

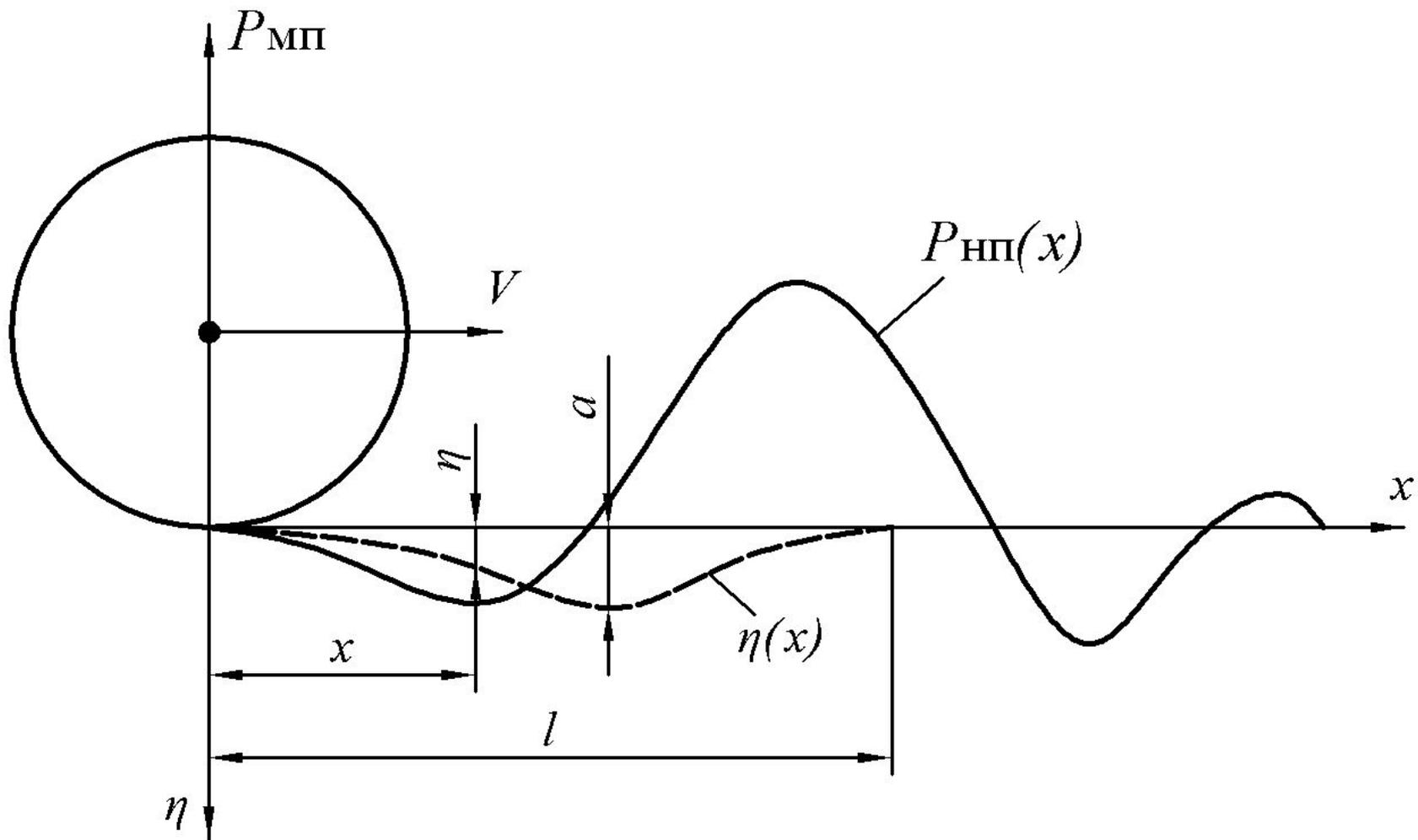


Рис. 3. Изолированная неровность на пути η (штриховая линия) и вертикальная сила инерции $P_{ин}$ (сплошная линия)

Решая уравнение (3), можно получить величину дополнительного прогиба рельса y , вызванного неровностью $\eta(t)$, а затем и величину $P_{\text{нп}}$. При неучете неупругих сопротивлений $P_{\text{нп}} = J_{\text{п}} y$

$$P_{\text{нп}} \stackrel{(11)}{=} J_{\text{п}} \frac{\pi^2 \alpha_0 i}{2 \psi} v$$

Если учесть, что $J_{\text{п}} = \frac{2U}{k}$; $\psi = \sqrt{\frac{J_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{к}}}}$ получим

$$P_{\text{нп}} \stackrel{(12)}{=} \pi^2 \alpha_0 i v \sqrt{\frac{U q_{\text{к}}}{2kg}}$$

где $q_{\text{к}}$ – вес колеса

Воздействия неподрессоренных масс при колебательных процессах составляют основную часть динамической добавки к статическому давлению осей локомотива на путь. Отсюда ясно, что ограничение и уменьшение веса неподрессоренных частей – весьма важный фактор улучшения взаимодействия пути и подвижного состава при высоких скоростях движения (рис. 3).

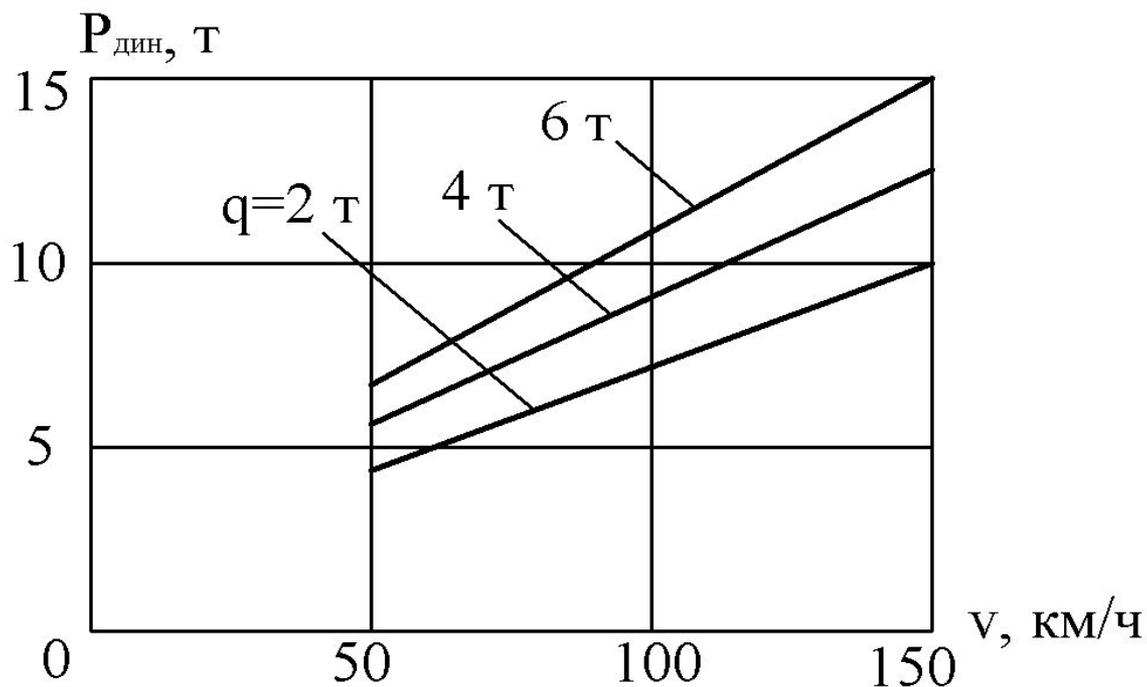


Рис. 3. Дополнительное давление на путь от неподрессоренных масс при проходе через неровности в зависимости от скорости

Величина неподрессоренных масс в значительной степени определяется системой подвешивания тяговых двигателей, которая может быть опорно-осевой или опорно-рамной.

При опорно-осевом подвешивании тяговый двигатель 1 одной стороной опирается через моторно-осевые подшипники непосредственно на ось, второй – через упругую подвеску – на раму тележки 2 (рис. 4). При такой системе примерно половина веса тягового двигателя (3 – 5 т) оказывается неподрессоренной. К весу колесной пары (около 2 т) добавляется весьма значительная величина. Кроме того, большие ускорения действуют на тяговые двигатели. В результате двигатели требуют частых ремонтов.

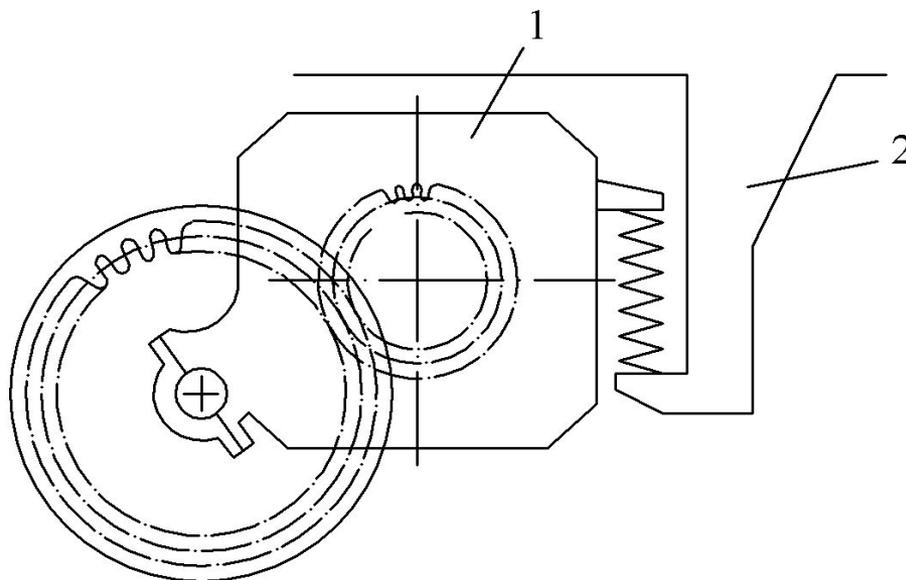


Рис. 4. Опорно-осевое подвешивание тягового двигателя: 1 – двигатель; 2 - рама 51

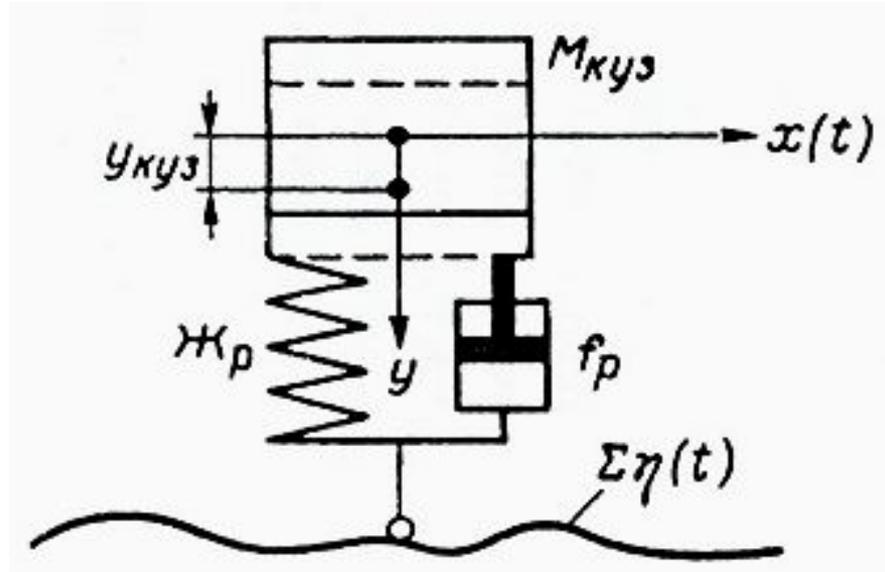
Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 5

Колебания обрессоренных масс подвижного состава

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

Расчетная модель, представленная на рисунке



имеет следующие обозначения:

$M_{\text{куз}}$ – масса кузова – представляется в виде единой сосредоточенной массы, приведенной к колесу;

J_p – жесткость рессорного подвешивания, приведенная к колесу;

f_p – коэффициент вязкого трения рессор;

$\Sigma \eta(t)$ – суммарная неровность пути и колеса.

Сила инерции колеблющегося кузова

$$P_{инерц} = M_{куз} \ddot{y}_{куз}$$

Сила неупругого сопротивления

$$P_{1-реакт} = f_p \dot{y}_{куз}$$

Сила сжатия рессорного комплекта

$$P_{2-реакт} = \mathcal{K}_p y_{куз}$$

В этом случае дифференциальное уравнение колебаний кузова на рессорах будет иметь вид:

$$M_{куз} \ddot{y}_{куз} + f_p \dot{y}_{куз} + \mathcal{K}_p y_{куз} = \mathcal{K}_p \sum \eta(t)$$

Поделим все члены на $M_{\text{куз}}$ и, введя обозначения, получим:

$$\frac{f_p}{M_{\text{куз}}} = 2\xi \frac{\mathcal{K}_p}{M_{\text{куз}}} = \psi^2$$

$$(3) \quad \ddot{y} + 2\xi \dot{y} + \psi^2 y = \psi^2 \sum \eta(t)$$

$$\psi = \sqrt{\frac{\mathcal{K}_p}{M_{\text{куз}}}} \quad \text{- частота собственных колебаний кузова.}$$

$$\omega = \frac{2\pi\nu t}{l} \quad \text{- частота вынужденных колебаний кузова.}$$

- В условиях резонанса

$$\varphi = \omega; \sqrt{\frac{J_p}{M_{\text{куз}}}} = \frac{2\pi vt}{l}.$$

Критическая длина неровности

$$l_{\text{кр}} = 2\pi vt \sqrt{\frac{M_{\text{куз}}}{J_p}}.$$

Критическая длина неровности тем больше, чем выше скорость движения поезда, масса кузова вагона и меньше жесткость рессорных комплектов.

В связи с этим при повышении скоростей встает задача снижения жесткости рессор и оптимизации демпфирования колебаний в условиях резонанса.

В отличие от колебаний необрессоренных масс, колебания кузова не имеют синусоидального характера, они более сложны и неопределенны. Поэтому на основании обширного эмпирического материала принято определять максимальную силу инерции, возникающую от колебаний кузова на рессорах, как

$$P_{p-\max} = J_p y_{\max-p}, \quad (4)$$

где $y_{\max-p}$ – максимальное сжатие рессор при движении экипажа по всей совокупности неровностей:

$$y_{\max-p} = a_p + b_p V^2 \quad (5)$$

Уравнение (5) – эмпирическое. Коэффициенты a_p и b_p найдены для каждой единиц подвижного состава экспериментально.

Для новых локомотивов, в том числе с повышенными осевыми нагрузками, $P_{p\text{-max}}$ определяется через коэффициент вертикальной динамики обрессоренных масс k_D^0 .

$$P_{p\text{-max}} = k_D^0 (P_{\text{ст}} - q_k) \quad (6)$$

где $P_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка на колесо;

q_k – вес необрессоренных масс, приходящийся на одно колесо.

Величина k_D^0 зависит от типа экипажа и скорости движения и определяется экспериментально (обычно $k_D^0 \approx 0,2+0,4$).

Уравнения (3) являются теоретической основой для вывода практических расчетных формул для учета влияния сил инерции, возникающих при движении экипажа по пути.

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 6

Вероятностный характер сил, действующих на путь

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

На путь действуют многообразные, переменные по величине силовые факторы (поездные и климатические), сопротивляемость которым также является переменной. Рассмотрим вероятность появления случайной вертикальной силы, действующей на рельс при проходе подвижного состава.

Пусть число осей, прошедших через данное сечение рельса, равно N , а все наблюдаемые значения сил разместились в диапазоне от P_{\min} до P_{\max} (см. рис.). весь этот диапазон на равные интервалы (разряды) величиной ΔP , называемые шагом интервала (или величиной разряда).

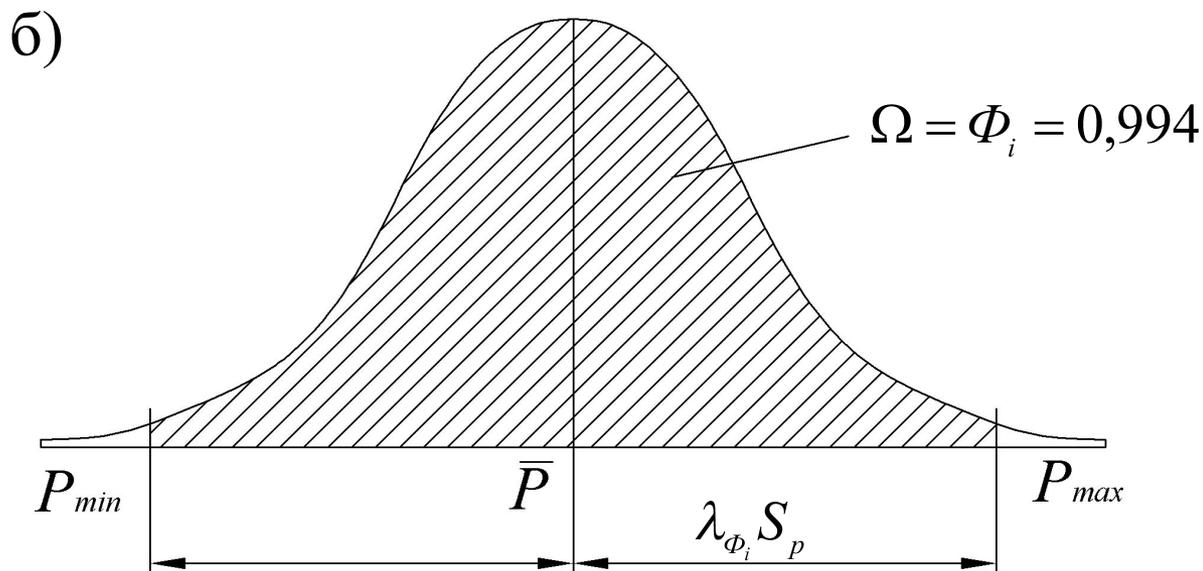
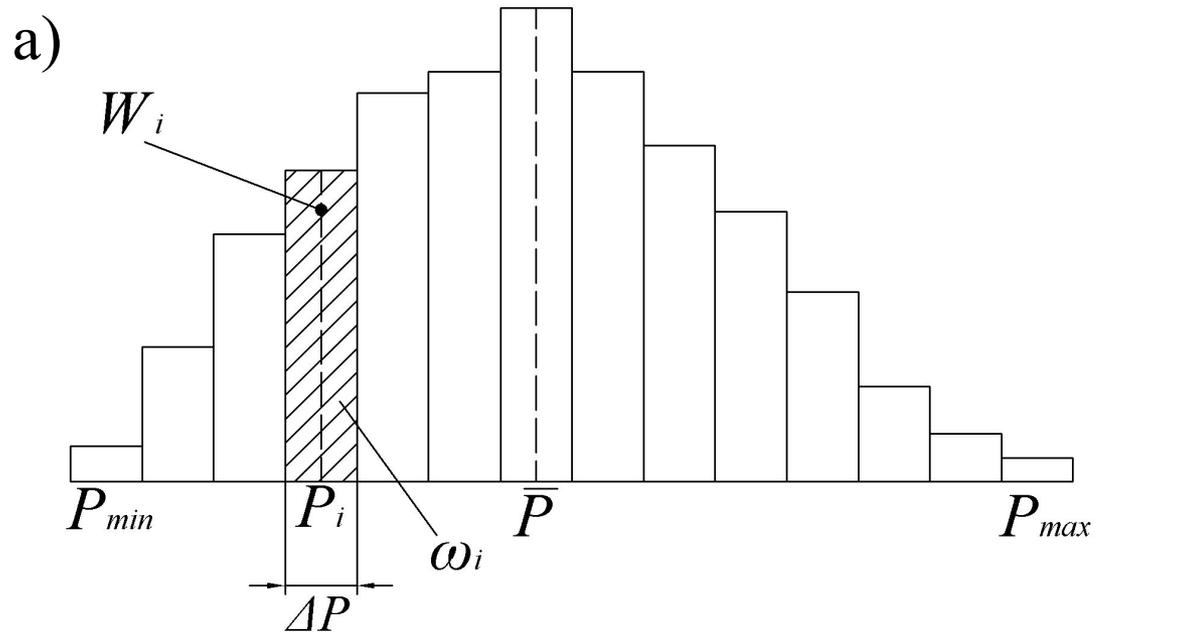


Рис. Распределения плотности вероятностей случайной величины – вертикальной силы P , действующей на рельс:
 а – гистограмма плотности частот (вероятностей);
 б – дифференциальная кривая распределения

Количество воздействий N_i (т.е. число осей), оказавшихся в пределах i -го интервала, называют частотой. Отношение частоты N_i к общему числу воздействий $N = \sum N_i$ называют частотостью; она при достаточно большом N характеризует вероятность появления сил P_i в i -м интервале, т.е.

$$\Phi_i = \frac{N_i}{N}$$

Вероятность, отнесенная к единице шага интервала, называется плотностью вероятностей

$$W_i = \frac{N_i}{N\Delta P}$$

На рис. а, показан пример графика W_i силы P_i по интервалам, называемого гистограммой. Площадь каждого прямоугольника гистограммы равна вероятности Φ_i :

$$\omega_i = \Phi_i = W_i\Delta P = \frac{N_i}{N\Delta P}\Delta P = \frac{N_i}{N}$$

Площадь всей гистограммы равна единице:

$$\Omega = \sum \omega_i = \sum W_i \Delta P = \sum \frac{N_i}{N \Delta P} \Delta P = \sum \frac{N_i}{N} = 1$$

При непрерывном изменении плотности вероятностей имеет место кривая распределения (см. рис. б).

$$\Omega = \Phi_i = \int_{-\infty}^{P_{\Phi_i}} f(P) dP = \Phi \{ P < P_{\Phi_i} \}$$

Вертикальная сила, передающаяся от колеса на рельс, является случайной величиной. Она состоит из

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

Эта вертикальная сила подчиняется распределению Гаусса, как и любая случайная величина, состоящая из более чем трех случайных величин, каким бы законам распределения не подчинялась каждая из величин в отдельности.

Распределение Гаусса (см. рис. б) удовлетворяет четырем положениям:

1) чем больше количество N , тем больше N_i в каждом i -ом интервале;

2) чем шире интервал ΔP , тем большее количество случаев падает на него;

3) чем больше отклонение конкретной величины от ее среднего значения \bar{P} , тем реже оно встречается;

4) отклонения в обе стороны от среднего равновероятны.

Сила P является случайной в пределах ее возможных колебаний:

$$P = \sum P_i.$$

Сила P определяется с заданным уровнем вероятности ее непревышения. В расчетах пути принято определять P с вероятностью $\Phi \approx 0,994$, т.е. из 1000 случаев воздействий колес на данное сечение рельса в 994 случаях фактическое значение P не превзойдет ее расчетное значение P_{Φ} .

Возможное превышение значения P_{Φ} в шести случаях из 1000 может повлечь за собой превышение расчетных напряжений в элементах верхнего строения пути, т.е. превышение допускаемых напряжений в рельсах – предела текучести. При этом могут появляться пластические деформации в кромках поперечного сечения рельса. Однако это может вызвать лишь наклеп, но не хрупкое разрушение, так как при всех условиях не допускается превышение предела прочности рельсовой стали, т.е. гарантируется безопасность движения поездов.

Расчетное значение P_Φ выражается через среднее значение этой величины P (см. рис. б):

$$P_\Phi = \bar{P} + \lambda_\Phi S_{P_1}.$$

где \bar{P} – среднее значение P ; S_{P_1} – среднеквадратическое отклонение силы от ее среднего значения; характеризует разброс данных относительно этого среднего значения:

$$S_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{P})^2}{N - 1}}$$

λ_Φ – нормирующий множитель, приводящий силу P к уровню вероятности Φ ее непревышения.

При $\lambda_\Phi = 0$ $\Phi = 0,500$ – вероятность появления значения силы P_Φ , не превышающей \bar{P} . При нормальном законе распределения случайной величины имеют место следующие величины λ_Φ в зависимости от Φ :

λ_Φ	1	2	2,5	3
Φ	0,841	0,977	0,994	0,999

Из теории вероятностей известно:

$\bar{P} = \sum \bar{P}_i$ Среднее значение случайной величины равно сумме средних значений ее составляющих;

$D_p = S_p^2 = \sum S_{p_i}^2$ Дисперсия случайной величины равна сумме дисперсий составляющих независимых случайных величин.

Независимой случайной величиной называется такая, появление любого значения которой не зависит от того, какие значения приняли другие случайные величины, с которыми она находится в композиции. Таким образом, в рассматриваемом случае максимально вероятное значение вертикальной силы (расчетное), передаваемой от колеса на рельс,

$$P_\phi = \sum \bar{P}_i + \lambda_\phi \sqrt{\sum S_{p-i}^2}$$

Это основное уравнение для расчета силовых воздействий на путь с заданным уровнем вероятности.

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 7

Расчет пути на прочность, принятый в инженерной практике

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

Основные предпосылки и допущения:

1. Рельс считается балкой бесконечной длины неизменного сечения, лежащей на сплошном упругом (равноупругом) основании;
2. Вертикальные силы считаются приложенными в плоскости симметрии рельса, т.е. не учитывается подуклонка рельсов и влияние колес;
3. Вертикальные силы от расчетного колеса принимаются как максимально вероятные $P_{\text{расч}}$, определяемые с уровнем вероятности их неперевышения $\Phi=0,994$ и $\lambda_{\Phi}=2,5$. Одновременно давления от соседних колес тележки принимаются по средним значениям \bar{P}_i ;
4. Реакции основания считаются двусторонними, линейно зависящими от осадки основания ($q = - Uy$);
5. Характеристики пути (U , k и др.) считаются детерминированными (неслучайными, постоянными для заданных условий) величинами;
6. Влияние климатических факторов учитывается лишь при температурах воздействия на рельсы и изменениях жесткости пути (U , k) при промерзании балласта и земляного полотна;

7. Продольные температурные силы непосредственно расчетной схемой не учитываются;

8. Влияние поперечных сил и эксцентриситета приложения вертикальных сил учитывается специальным коэффициентом f ;

9. Расчет ведется по допускаемым напряжениям;

10. За расчетное сечение пути принимается такое, в котором расположена изолированная неровность.

Несмотря на большое число допущений расчет дает достаточно удовлетворительные результаты. Это объясняется тем, что входящие в формулы параметры, взяты из экспериментов.

Определение расчетной нагрузки от колеса на рельс

Для расчетного колеса $P_{расч} = \bar{P}_{расч} + \lambda_{\phi} S_{Расч}$

Здесь $P_{расч}$ и $S_{Расч}$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение расчетной нагрузки.

Принимаются следующие слагаемые вероятностной силы P

$$P = P_{ст} + P_p + P_{нп} + P_{инк} + P_{ннк}$$

Здесь $P_{ст}$ – статическая нагрузка колеса на рельс,

$P_{нп}$, $P_{инк}$, $P_{ннк}$ – динамические добавки от неровности пути, изолированной неровности и непрерывной неровности на колесе

Средние значения сил $\bar{P}_{нп}$, $\bar{P}_{инк}$, $\bar{P}_{ннк}$ принимаются равными нулю исходя из того, что при колебательном процессе за один цикл их среднее значение равно нулю.

Поэтому среднее значение расчетной нагрузки

$$\bar{P}_{расч} = \bar{P}_{ст} + \bar{P}_p$$

где \bar{P}_p - среднее значение нагрузки, возникающей за счет колебания кузова на рессорах

Среднее квадратическое отклонение расчетной нагрузки

$$S_{P_{расч}} = \sqrt{S_p^2 + S_{нп}^2 + q_1 S_{инк}^2 + (1 - q_1) S_{ннк}^2}$$

q_1 - доля колес, имеющих изолированные неровности.

Детерминированная статическая нагрузка

$$\bar{P}_{ст} = P_{ст}; S_{P_{ст}} = 0; P_{ст} = \frac{Q}{n}$$

где Q - вес экипажа, n - число колес

Сила инерции при колебании кузова на рессорах

В связи с тем, что расчетное колесо проходит расчетное сечение пути со сжатыми рессорами, то $P_p \neq 0$. На основании обработки экспериментальных данных получено:

$$\bar{P}_p = 0,75P_{P_{\max}} ;$$

$$S_{P_p} = 0,08P_{P_{\max}} ;$$

$$P_{P_{\max}} = J_p y_{P_{\max}} \text{ или } P_{P_{\max}} = k_d (P_{ct} - q_k),$$

где J_p и $y_{P_{\max}}$ – жесткость и максимальный прогиб рессор.

Силы инерции от неровности пути

В соответствии с теоретическими предпосылками

$$\overline{P}_{nn} = 0; S_{P_{nn}} = 0,707 P_{nn}^{\max}$$

где P_{nn}^{\max} - максимальное значение силы инерции, возникающей при прохождении неровности пути

Окончательно

$$S_{P_{nn}} = 2,88 \cdot 10^{-5} \alpha_1 \beta \gamma \varepsilon l_{ш} \sqrt{\frac{U q_k}{k} \overline{P}_{расч} V}$$

q_k – неподрессоренный вес колеса $q_k = m_k g$;

α_1 - коэффициент, учитывающий соотношение колеблющихся масс пути на железобетонных и деревянных шпалах;

$\alpha_1 = 1$ для деревянных шпал;

$\alpha_1 = 0,931$ для железобетонных шпал;

β - учитывает тип рельса $\beta = \sqrt[4]{\frac{J_0}{J}}$;

J_0 и J – центральные моменты инерции поперечного сечения рельса соответственно Р50 и рассчитываемого. Для рельсов Р75 $\beta=0,82$, для Р65 $\beta=0,87$ и Р50 $\beta=1,0$;

ε - учитывает влияние материала шпал на образование неровности на пути. При деревянных шпалах $\varepsilon =1,0$; при железобетонных шпалах $\varepsilon =0,322$;

γ - учитывает род балласта на образование неровностей. Он принимается равным 1,0 при балласте из щебня, сортированного гравия и асбестового балласта; 1,1 – из карьерного гравия и ракушки и $\gamma =1,5$ из песка.

$l_{\text{ш}}$ – расстояние между осями шпал;

$l_{\text{ш}} =55$ см при эюре 1840 шт-км и $l_{\text{ш}} =50$ см при эюре 2000 шт-км.

Динамическая добавка от колеса с непрерывной неровностью

$$\overline{P}_{\text{ннк}} = 0; S_{\text{ннк}} = 0,225 P_{\text{ннк}}^{\text{max}}$$

$$P_{\text{ннк}}^{\text{max}} = \frac{0,13 k_1 \alpha_0 U \sqrt{q_k} V^2}{d^2 \sqrt{kU - 326 k^2 q_k} \cdot 10^{-6}}$$

$$\alpha_0 = \frac{m_k}{m_k + m_n}$$

$k_1 = 0,23$ – учитывает тип колес;

$\alpha_0 = 0,433$ для деревянных шпал и $\alpha_0 = 0,403$ для железобетонных шпал;

d – диаметр расчетного колеса.

Динамическая добавка при качении колеса с изолированной неровностью

$$\overline{P}_{инк} = 0; S_{инк} = 0,25 P_{инк}^{max}$$

$$P_{инк} = 0,294 \cdot 10^7 e_0 \alpha_0 \frac{U}{k}$$

e_0 – глубина неровности на колесе принимается равной 2/3 максимально допустимой и составляет 0,00047 м для локомотивов с подшипниками качения и 0,00067 м для вагонов.

Напряженно-деформированное состояние элементов пути

Рассмотрим воздействие на путь многоосной тележки. Для определения наибольшего изгибающего момента, давления на опору или прогиба каждое из группы колес поочередно принимается за расчетное, остальные колеса в это время считаются соседними. В соответствии с допущением нагрузка от расчетного колеса считается максимально вероятной $P_{расч}$, от соседних – средней $P_{сос} = \bar{P}$. Величины M , Q и y определяются по формулам:

$$y = \frac{k}{2U} (P_{расч} + \sum \bar{P}_i \eta(kx_i));$$

$$Q = \frac{kl}{2} (P_{расч} + \sum \bar{P}_i \eta(kx_i));$$

$$M = \frac{1}{4k} (P_{расч} + \sum \bar{P}_i \mu(kx_i)).$$

Эквивалентная нагрузка

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

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

$$P_{\text{экв}}^I = P_{\text{расч}} + \sum \mu(kx_i) \bar{P}_i,$$

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

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

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

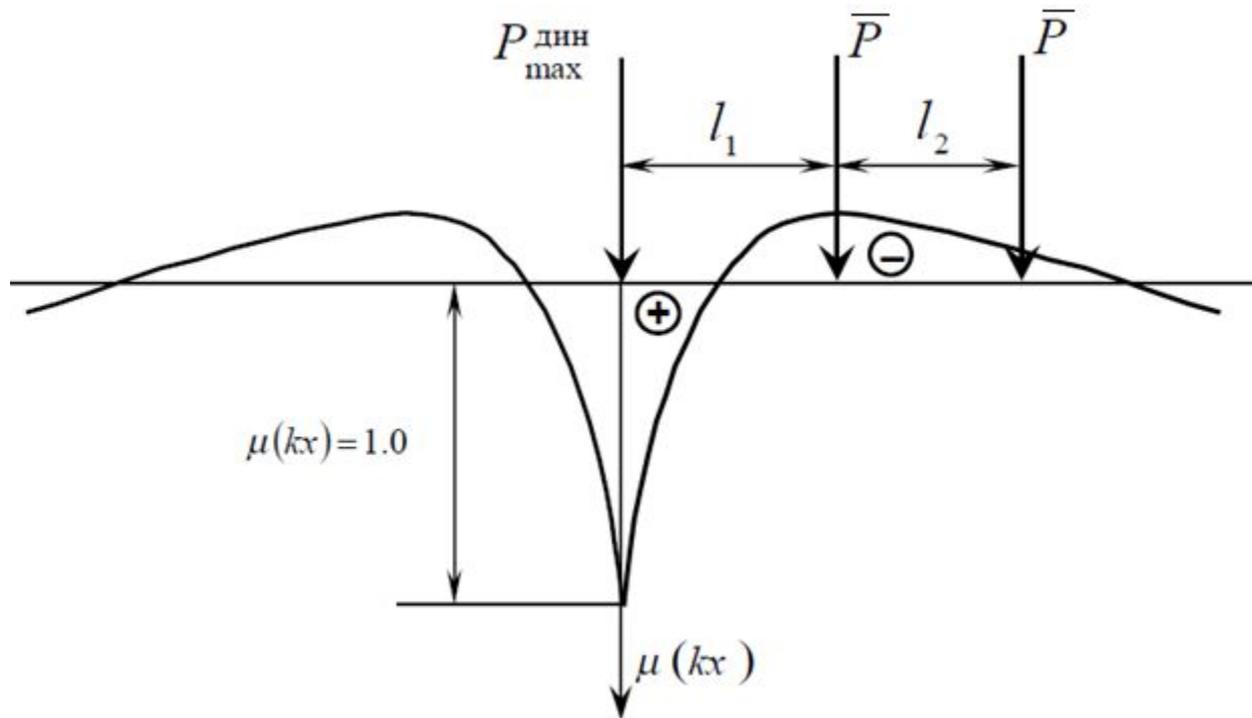


Рис. Схема определения эквивалентной нагрузки при расчете изгибающего момента

Эквивалентная нагрузка для определения прогиба рельса и давления на шпалу рассчитывается аналогичным образом. Максимальная эквивалентная нагрузка определяется по формуле, Н

$$P_{\text{ЭКВ}}^{\text{II}} = P_{\text{расч}} + \sum \eta(kx_i) \bar{P}_i,$$

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

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

При определении $P_{\text{ЭКВ}}^{\text{II}}$ существует две неблагоприятные установки колесной нагрузки.

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 8

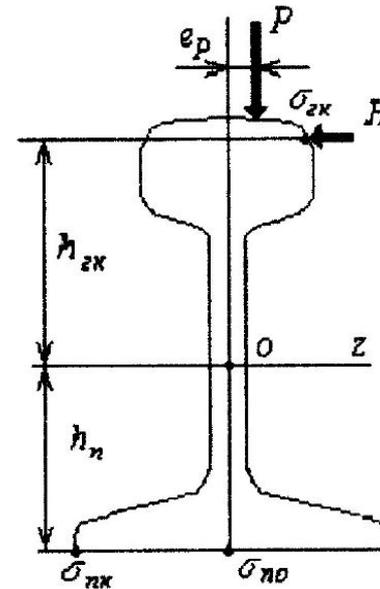
Определение напряжений в элементах верхнего строения пути

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

Нормальные изгибные напряжения в рельсах находятся по общеизвестной формуле:

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

$$M = \frac{P'_{\text{эк}}}{4k}$$



где M – изгибающий момент;

W_{Π} – момент сопротивления относительно наиболее удаленного волокна.

$$P'_{\text{экв}} = P_{\text{расч}} + \sum \bar{P}_i \mu(kx)$$

Осевые напряжения в подошве рельса

$$\sigma_{по} = \frac{M}{W_{п}}$$

Напряжения в кромках подошвы и головки рельса определяются по формулам:

$$\sigma_{нк} = f \sigma_{по},$$

$$\sigma_{гк} = m \sigma_{по}.$$

здесь f – коэффициент, переводящий осевые напряжения в подошве в кромочные напряжения. Он учитывает влияние горизонтальных поперечных сил H и внецентренное приложение вертикальных сил P .

m – переход от осевых напряжений в подошве к кромочным в головке.

Значения коэффициентов f и m зависят от радиуса кривой, типа верхнего строения пути и типа экипажа. Чем меньше радиус кривой, там больше значения f и m .

Напряжения смятия в шпалах определяются по формуле

$$\sigma_{ш} = \frac{Q}{\omega}$$

$$Q = \frac{P_{эк}^{II} kl}{2}$$

где ω - площадь передачи давления на шпалу через подкладку или прокладку (при бесподкладочном скреплении типа ЖБР).

$$P_{экв}^{II} = P_{расч} + \sum \bar{P}_{сос} \eta(kx)$$

Напряжения в балласте под шпалой

Среднее давление на балласт в подрельсовом сечении определяется по формуле:

$$\bar{\sigma}_b = \frac{Q}{0,5\alpha ab} = \frac{Q}{\Omega_\alpha}$$

здесь $0,5ab$ – площадь полушпалы (a и b – длина и ширина шпалы);

$$\alpha - \text{коэффициент изгиба шпалы} \quad \alpha = \frac{y_{\text{ср}}}{y_p};$$

где $y_{\text{ср}}$ и y_p – средняя осадка и осадка шпалы в подрельсовом сечении;

Ω_α – эффективная площадь полушпалы с учетом изгиба.

Тип шпал	Значения α	
	лето	зима
Деревянные	0,75-0,85	0,50-0,55
Железобетонные	0,85-0,90	0,80-0,85

Напряжения в балластном слое на глубине и на основной площадке земляного полотна

Определяют в подрельсовом сечении под расчетной шпалой на глубине h с учетом давлений, передаваемых на балластный слой от соседних шпал.

Напряжения определяются в точке M под расчетной шпалой как сумма воздействия от трех шпал и всех колес тележки.

В точке M , находящейся на расстоянии h от подошвы шпалы, напряжения

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

где σ_{h0} – напряжение от воздействия расчетной шпалы;

σ_{h1} и σ_{h2} – напряжения от соседних шпал.

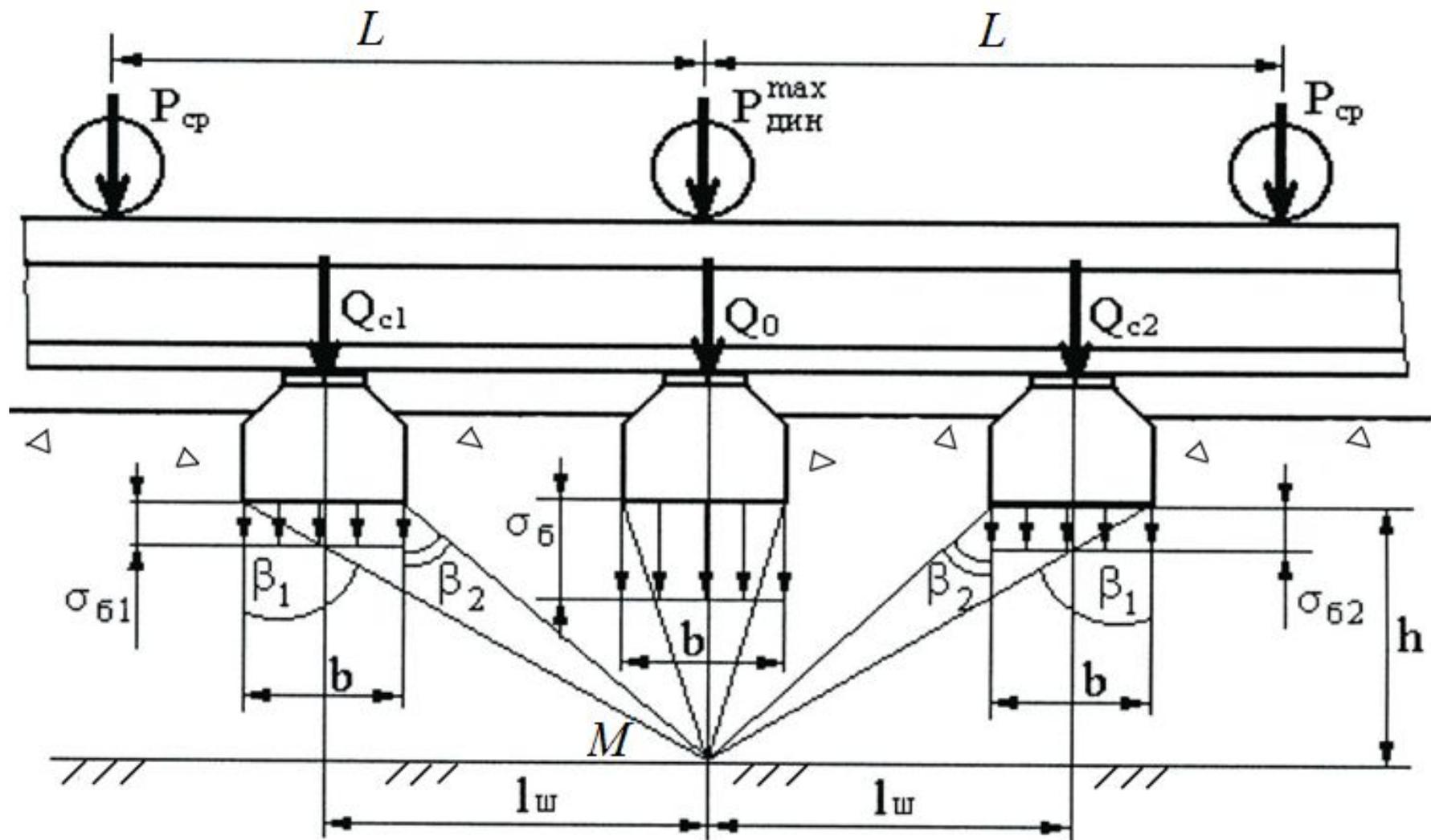


Схема расчёта напряжений по основной площадке
земляного полотна

Предварительно определяют давление $Q_{расч}$ – на расчетную шпалу и Q_{C1} и Q_{C2} – на соседние шпалы.

Для этой цели расчетное колесо ставят над расчетной средней шпалой.

$$Q_{расч} = \frac{kl}{2} (P_{расч} + 2\bar{P}\eta(kL))$$

$$Q_{C1} = \frac{kl}{2} (P_{расч}\eta(kl_{ш}) + \bar{P}\eta(k(L - l_{ш})) + \bar{P}\eta(k(L + l_{ш})))$$

$$Q_{C2} = \frac{kl}{2} (P_{расч}\eta(kl_{ш}) + \bar{P}\eta(k(L + l_{ш})) + \bar{P}\eta(k(L - l_{ш})))$$

По ним находят напряжения в балласте под шпалами:

$$\sigma_{\delta} = \frac{Q_{расч}}{0,5\alpha ab};$$

$$\sigma_{\delta 1} = \frac{Q_{C1}}{0,5\alpha ab};$$

$$\sigma_{\delta 2} = \frac{Q_{C2}}{0,5\alpha ab}.$$

Напряжения от этих давлений в любой точке М находят исходя из формул теории упругости.

Для расчета напряжений используются решения плоских задач теории линейно-деформированных тел об определении напряжений в полупространстве от прямоугольной и треугольной нагрузок:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_h &= -r_1 [0,635m_1 C_1 + (2 - m)1,275 C_2] \sigma_6; \\ \sigma_{h1} &= \frac{r_1}{\pi} A_h \sigma_{61}; \quad \sigma_{h2} = \frac{r_1}{\pi} A_h \sigma_{62}, \end{aligned} \right\}$$

где знак «-» показывает, что напряжения – сжимающие; $r_1 = 0,8$ (деревянные шпалы); $r_1 = 0,7$ (железобетонные шпалы);

$$C_1 = \frac{b}{2h} - \frac{b^3}{24h^3}; \quad C_2 = \frac{bh}{b^2 + 4h^2},$$

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

где β_1 и β_2 – углы лучей от края эпюры давления под шпалой к точке M (в радианах); C_1 , C_2 , A_h – табулированы для упрощения расчетов.

Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути

Лекция 9

Анализ полученных результатов расчета

Лектор: д-р техн. наук, профессор
Карпущенко Николай Иванович

Допускаемые напряжения

Расчет рельсов и упругих элементов ведется по допускаемым напряжениям, т.е. должно быть

$$\sigma_{\text{пк}} \leq [\sigma_{\text{к}}]$$

где $[\sigma_{\text{к}}]$ - допускаемые напряжения растяжения в кромке подошвы рельса, обусловленные его изгибом и кручением;

$[\sigma_{\text{ш}}]$ - допускаемые напряжения на смятие в деревянных шпалах (прокладка на железобетонных) под подкладками;

$[\sigma_{\text{б}}]$ - допускаемые напряжения сжатия в балласте под шпалой в подрельсовой зоне;

$[\sigma_{\text{з}}]$ - допускаемые напряжения сжатия на основной площадке земляного полотна в подрельсовой зоне.

В «Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности» указанные четыре критерия прочности пути определены из условия обеспечения надежности пути в зависимости от его класса (классы путей нормируются в соответствии с «Положением о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах РФ»):

$[\sigma_k]$ - из условия непревышения допустимого количества отказов рельсов за период нормативной наработки;

$[\sigma_{ш}]$ - из условия непревышения допустимого износа шпал и прокладок под подкладками за период нормативной наработки;

$[\sigma_6]$ и $[\sigma_3]$ - из условия непревышения допустимой интенсивности накопления остаточных деформаций соответственно в балласте и на основной площадке земляного полотна.

Эти критерии названы оценочными критериями прочности пути.

Численные значения оценочных критериев прочности пути применительно к градации грузонапряженности в соответствии с Положением о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах РФ приведены в таблице.

Критерии	Виды подвижного состава	Значения критериев прочности, МПа при грузонапряженности, млн тбрутто/км в год			
		более 50	50-25	24-10	менее 10
[σ_k]	локомотивы	190	200	240	340
	вагоны	150	160	200	300
[$\sigma_{ш}$]	локомотивы	1,2	1,6	2,0	3,0
	вагоны	1,1	1,5	1,8	2,7
[σ_6]	локомотивы	0,4	0,42	0,45	0,50
	вагоны	0,26	0,30	0,35	0,40
[σ_3]	локомотивы	0,10	1,10	0,11	0,12
	вагоны	0,08	0,08	0,09	0,10

Данные таблицы применимы:

$[\sigma_k]$ - для типовых нетермообработанных рельсов в прямых и кривых радиусом более 1000 м. В кривых радиусом 1000 м и менее действующими нормативными документами предусмотрена сплошная смена рельсов между капитальными ремонтами пути.

Поэтому из условия обеспечения указанных показателей надежности пути в таких кривых значение оценочных критериев прочности рельсов принимается $[\sigma_k]=240$ МПа; при использовании только термоупрочненных рельсов приведенные в таблице значения $[\sigma_k]$ увеличиваются на 14%;

$[\sigma_6]$ - для щебеночного и асбестового балласта; при песчаном балласте приведенные в таблице значения необходимо уменьшить в 1,6 раза, а при карьерном гравии и ракушке – в 1,4 раза;

$[\sigma_3]$ - для земляного полотна из суглинистых грунтов.

Изложенный в лекциях алгоритм расчета пути на прочность реализуется в инструментальной среде MathCAD и позволяет выполнять многовариантные вычисления для различных конструкций пути и типов подвижного состава. Расчет пути на прочность производится для условий (в прямых и кривых участках, для зимних и летних условий). Исходные данные для расчета пути на прочность на ПЭВМ заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета пути на прочность на ПЭВМ

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Значение
1. Статическая нагрузка на ось	$P_{ст}$	Н	112500
2. Отнесенный к колесу вес неподрессоренной части экипажа	q_k	Н	13800
3. Жесткость рессорного подвешивания	J_p	Н/м	1,64
4. Статический прогиб рессорного подвешивания	$f_{ст}$	м	0,187
5. Диаметр колеса	d	м	1,22
6. Расстояние между центрами осей колесных пар экипажа	l_1	м	2,15
	l_2		2,15

7. Скорость движения экипажа		v_1	м/с	40
		v_2		80
		v_3		120
		v_4		160
8. Глубина изолированной неровности		e	м	0,00047
9. Коэффициент, учитывающий горизонтальные силы		f_{np}	-	1,06
		$f_{кр}$	-	1,32
10. Модуль упругости подрельсового основания	лето прямая	$U_{лп}$	МПа	51
	лето кривая	$U_{лк}$		55
	зима прямая	$U_{зп}$		66
	зима кривая	$U_{зк}$		72
11. Расстояние между осями шпал	прямая	$l_{шп}$	м	0,55
	кривая	$l_{шк}$		0,5
12. Момент инерции рельса		I_z	$м^4$	$3,208 \cdot 10^{-5}$
13. Момент сопротивления рельса		W	$м^3$	$4,17 \cdot 10^{-4}$
14. Коэффициенты, учитывающие влияние	типа рельса	β	-	0,87
	рода балласта	γ	-	1
	жесткости пути	ε	-	0,322
	изменение колеблющейся массы пути на железобетонных шпалах	α_1	-	0,931
	колеблющейся массы пути	α_0	-	0,403
15. Площадь подрельсовой прокладки		ω	$м^2$	0,021
16. Площадь полушпалы		Ω_α	$м^2$	0,2975
17. Толщина балластного слоя		H	м	0,6
18. Ширина нижней постели шпалы		B	м	0,27
19. Поправочный коэффициент		r_1	-	0,7

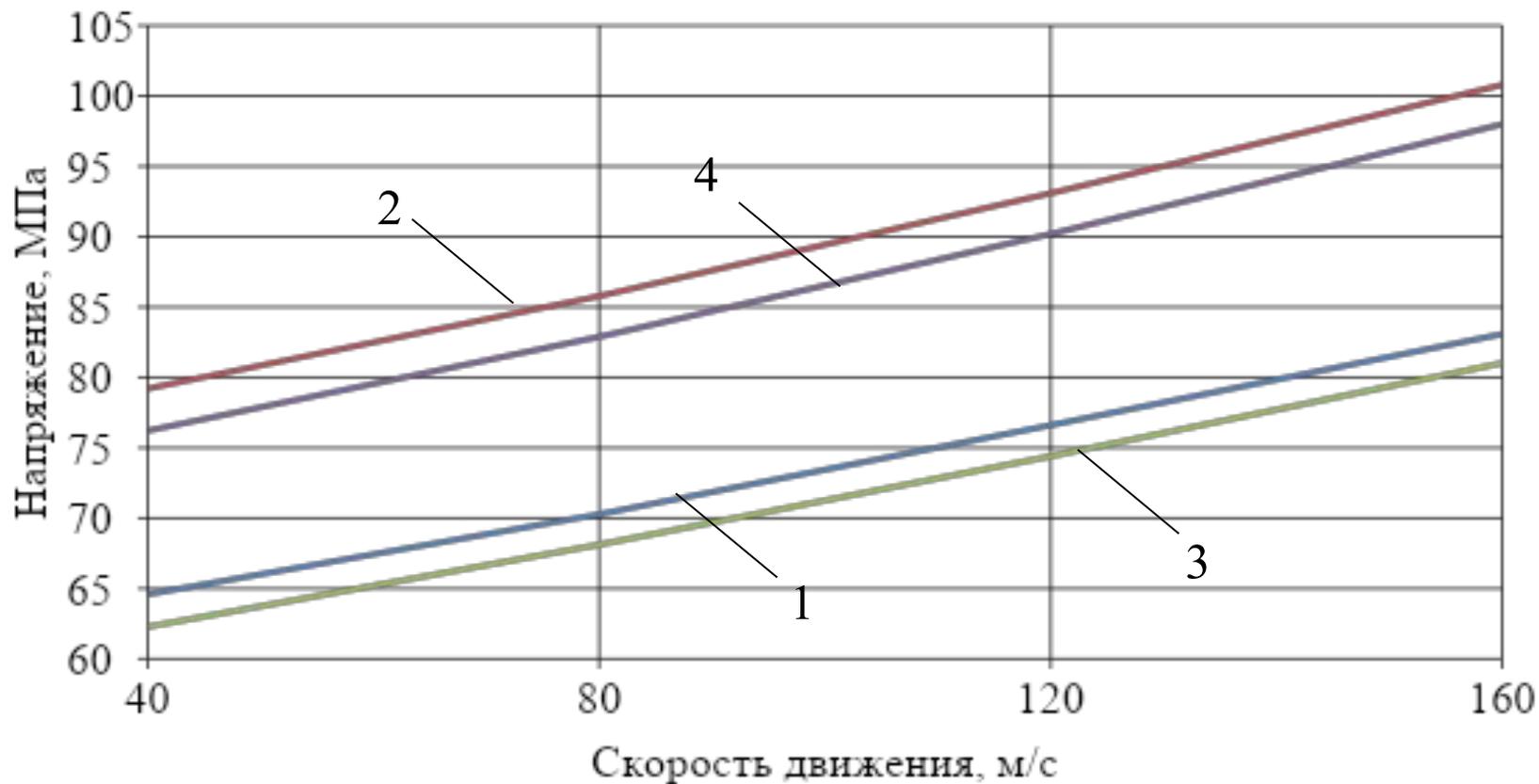
Результаты расчетов приведены в таблицах 2 и 3, а также на рисунках 1 и 2.

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, u , м
Тепловоз ТЭП70					
Прямая, лето					
40	131974	123069	25406	41666	0,00149
80	142949	126236	27675	45183	0,00161
120	154743	129403	30119	48964	0,00175
160	167212	132570	32706	52962	0,00189
Кривая, лето					
40	131625	123069	25007	38381	0,0014
80	142028	126236	27118	41465	0,00151
120	153274	129403	29405	44801	0,00163
160	165206	132570	31836	48342	0,00176
Прямая, зима					
40	132942	123069	24495	44372	0,00122
80	144647	126236	26780	48364	0,00133
120	157284	129403	29252	52676	0,00145
160	170671	132570	31874	57246	0,00158
Кривая, зима					
40	132625	123069	24060	41028	0,00114
80	143718	126236	26181	44539	0,00124
120	155784	129403	28492	48360	0,00134
160	168616	132570	30953	52427	0,00146

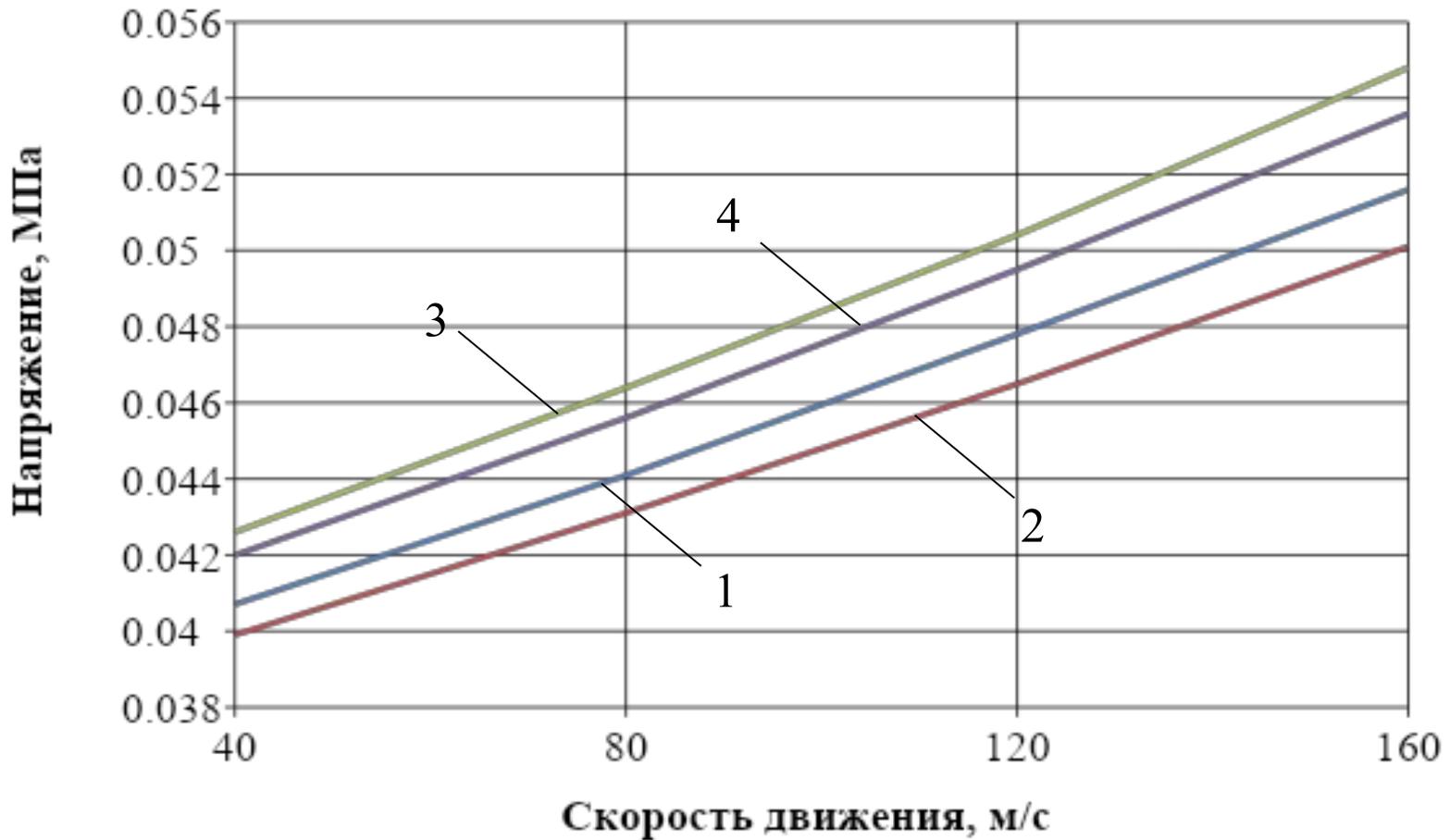
Таблица 3 – Результаты расчета напряжений

Скорость движения, v , м/с	Напряжения, МПа				
	в подошве рельса по оси, $\sigma_{по}$	в кромке подошвы рельса, $\sigma_{пк}$	в подрельсо-вой про-кладке, $\sigma_{ш}$	в балласт-ном слое, $\sigma_{б}$	на основной площадке земляного полотна, $\sigma_{н}$
Тепловоз ТЭП70					
Прямая, лето					
40	60,9	64,6	1,98	0,14	0,0407
80	66,4	70,3	2,15	0,152	0,0441
120	72,2	76,6	2,33	0,165	0,0478
160	78,4	83,1	2,52	0,178	0,0516
Кривая, лето					
40	60	79,2	1,83	0,129	0,0399
80	65	85,8	1,97	0,139	0,0431
120	70,5	93,1	2,13	0,151	0,0465
160	76,3	100,8	2,3	0,162	0,0501
Прямая, зима					
40	58,7	62,3	2,11	0,149	0,0426
80	64,2	68,1	2,3	0,163	0,0464
120	70,1	74,4	2,51	0,177	0,0504
160	76,4	81	2,73	0,192	0,0548
Кривая, зима					
40	57,7	76,2	1,95	0,138	0,042
80	62,8	82,9	2,12	0,15	0,0456
120	68,3	90,2	2,3	0,163	0,0495
160	74,2	98	2,5	0,176	0,0536



1 – прямая летом; 2 – кривая летом; 3 – прямая зимой; 4 – кривая зимой;

Рисунок 1 – Зависимость кромочных напряжений в подошве рельса от скорости движения тепловоза ТЭП70 ($[\sigma_k] = 240$ МПа)



1 – прямая летом; 2 – кривая летом; 3 – прямая зимой; 4 – кривая зимой;

Рисунок 1 – Зависимость напряжений на основной площадке земляного полотна от скорости движения тепловоза ТЭП70 ($[\sigma_h] = 0,1$ МПа)

Из анализа рисунков 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 снижения скоростей движения поездов.