

## Лекция 3 ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ

### План лекции:

- 3.1. Основы динамического расчета пути на прочность.
- 3.2. Переменные силы, действующие на путь.
- 3.3. Выбор расчетной нагрузки.
- 3.4. Расчетные формулы для определения напряжений в элементах пути.
- 3.5. Определение допускаемых скоростей движения поездов.
- 3.6. Допускаемые напряжения в элементах верхнего строения пути.

### 3.1. Основы динамического расчета пути на прочность

Динамический расчет пути под воздействием системы грузов сводится к тому, чтобы найти одну такую силу, которая, будучи статически приложенной в расчетном сечении, по своему воздействию на путь оказалась бы эквивалентной динамическому воздействию на это сечение пути всей системы грузов [6].

Следовательно, динамический расчет пути на прочность заключается в определении **эквивалентных сил**, которые можно было бы подставить в расчетные формулы и получить величины изгибающего момента и прогиба рельса, давления на шпалу и далее напряжений в элементах пути.

Статическое воздействие на путь стоящего экипажа определяется его массой и числом осей. При движении воздействие экипажа на путь становится значительно сложнее. В это время, кроме сил тяжести, на путь действуют и силы инерции, появляющиеся при совместных колебаниях подвижного состава и пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях; тормозные и силы тяги и т. д. Колеса экипажа при общем поступательном движении имеют сложные пространственные перемещения, которые вызывают колебания рессорных комплектов и находящегося на них кузова [1].

Сложные колебания кузова принято разделять на *возвратно-поступательные*: подпрыгивание (вдоль вертикальной оси); подергивание (вдоль продольной оси); отброс (вдоль поперечной оси) и *вращательные*: виляние (вокруг вертикальной оси); боковая качка (вокруг продольной оси); галопирование (вокруг поперечной оси).

Кроме того, путь и колеса подвижного состава имеют ряд несовершенств, каждое из которых вызывает добавочные силы инерции [1].

Несовершенства (неровности) на пути:

а) явные или геометрические за счет отклонений в отметках продольного профиля пути и микронеровностей на поверхности катания головки рельсов;

б) неявные (потайные) или силовые за счет неплотного прилегания элементов верхнего строения пути друг к другу и выборки люфтов под нагрузкой.

Несовершенства колес:

а) несовпадение центра тяжести колеса с центром вращения (дисбаланс);

б) овальность колес;

в) неравномерность износа колеса в поперечном сечении.

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) [1].

В исследовательских целях используется методика динамического расчета взаимодействия пути и подвижного состава М.Ф. Вериго, А.Я. Когана [15].

### 3.2. Переменные силы, действующие на путь

Вертикальные силы от колес к рельсам приложены статически. Но величина сил определяется с учетом динамики. Рассмотрим определение дополнительных инерционных сил, связанных с колебаниями кузова и необрессоренных масс подвижного состава при наличии несовершенств пути и колес.

**Силы, связанные с колебаниями обрессоренных масс экипажа  $P_p$ .**

Расчетная модель представлена на рис. 3.1 и имеет следующие обозначения:

$M_k$  – масса кузова, приведенная к колесу;

$Z$  – сжатие рессор при движении экипажа по неровности на пути;

$J_p$  – жесткость рессорного подвешивания, приведенная к колесу,

$$J_p = (0,5 \div 2,0) \cdot 10^3 \text{ кН/м.}$$

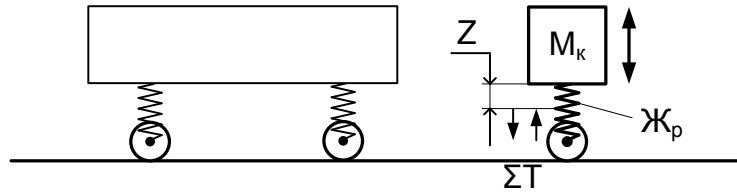


Рис. 3.1. Расчетная модель колебаний обрессоренных масс подвижного состава

В этом случае дифференциальное уравнение колебаний кузова имеет вид

$$\mathcal{J}_p \cdot Z + M_k \frac{d^2 \cdot Z}{d \cdot t^2} = 0. \quad (3.1)$$

Данное дифференциальное уравнение колебания груза на рессоре в явном виде

$$\frac{d^2 \cdot Z}{d \cdot t^2} + \frac{\mathcal{J}_p}{M_k} \cdot Z = 0. \quad (3.2)$$

В уравнение (3.2) пришлось в рессоры добавить силы трения ( $\Sigma T$ ) – сухие (псевдо) и вязкие (квази), иначе при критической скорости движения  $V_k$  могут возникнуть резонансные явления. Если рельсы 12,5 м –  $V_k = 70 \div 80$  км/ч, при 25 м –  $V_k = 140 \div 160$  км/ч;  $\frac{\mathcal{J}_p}{M_k} = \Psi^2$  – квадрат циклической частоты собственных колебаний груза на рессорах. Циклическость – за  $2\pi$  секунд;  $\frac{\Psi}{2\pi}$  – частота, Гц.

На основании результатов больших натурных испытаний принято определять максимальную силу инерции от колебаний кузова на рессорах как

$$P_p = Z \cdot \mathcal{J}_p. \quad (3.3)$$

Значения  $Z$  принимают по материалам испытаний по следующей зависимости

$$Z = a + b \cdot V^2, \quad (3.4)$$

где  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты, установленные для различных подвижных единиц [2, 6].

Среднее значение  $P_p^{cp} = 0,75P_p$ .

Среднее квадратическое отклонение данной силы  $S_p$  характеризует разброс данных относительно среднего значения и определяется следующим образом: значение силы  $P_{pi}$  по формуле (3.3) для различных величин  $Z_i$ . Рассчитывается среднее арифметическое значение силы  $P_{p\text{cp}}$ . Далее вычисляется отклонение каждой величины силы  $P_{pi}$  от среднего значения  $P_{p\text{cp}}$ . Полученная разность возводится в квадрат. Среднее квадратическое отклонение  $S_p$  определяется по формуле (3.5).

$P_{p_1}$	$Z_1$	$S_{p_1} = P_{p_1} - P_{p\text{cp}}$	$S_{p_1}^2 = (P_{p_1} - P_{p\text{cp}})^2$
$P_{p_2}$	$Z_2$	$S_{p_2} = P_{p_2} - P_{p\text{cp}}$	$S_{p_2}^2 = (P_{p_2} - P_{p\text{cp}})^2$
$P_{p_3}$	$Z_3$	$S_{p_3} = P_{p_3} - P_{p\text{cp}}$	$S_{p_3}^2 = (P_{p_3} - P_{p\text{cp}})^2$
...	...	...	...
$P_{p_n}$	$Z_n$	$S_{p_n} = P_{p_n} - P_{p\text{cp}}$	$S_{p_n}^2 = (P_{p_n} - P_{p\text{cp}})^2$
$P_{p\text{cp}}$	$\sum_{i=1}^n S_{pi} = 0$ , так как $\sum P_{pi} = \sum P_{p\text{cp}}$		$S_p = \sqrt{\frac{\sum S_{pi}^2}{n-1}}$ (3.5)

ВНИИЖТ сопоставил  $S_p$  и  $P_p$  и установил, что  $S_p = 0,08 P_p$ .

**Силы, связанные с колебаниями необрессоренных масс (колесная пара, буксовый узел, рессора)  $P_{np}$ .**

В этом случае определяются дополнительные силы инерции, возникновение которых связано с наличием неровности на пути. Неровности железнодорожного пути – это искажения в профиле (геометрические неровности  $\eta$  – видимые) и динамические неровности за счет просадки подрельсового основания  $y$  (рис. 3.2).

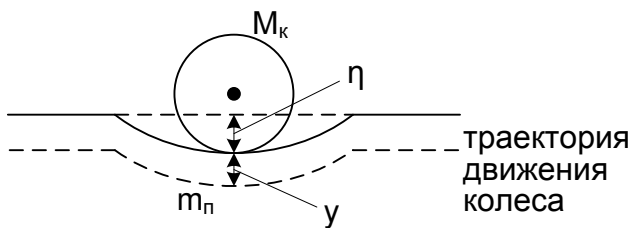


Рис. 3.2. Схема неровностей на пути

Общая просадка колеса в зоне геометрической неровности равна  $(\eta + y)$ .

Вертикальная скорость колеса на этом перемещении:

$$\frac{d(\eta + y)}{dt}, \quad (3.6)$$

а вертикальное ускорение 
$$\frac{d^2(\eta + y)}{dt^2}. \quad (3.7)$$

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

Рассмотрим взаимодействие колеса и пути в самом упрощенном виде.

Уравнение равновесия можно записать в следующем виде:

$$R + \Sigma J + \Sigma T + Q = 0. \quad (3.8)$$

где  $R$  – реакция рельса;  $\Sigma J$  – силы инерции;  $\Sigma T$  – силы трения;  $Q$  – внешние силы.

Сила упругого отпора (реактивная сила) рельса может быть определена по формуле

$$R = \frac{y}{y_1}, \quad (3.9)$$

где  $y$  – просадка рельса под колесом (динамический прогиб);  $y_1$  – величина просадки под единичной силой.

В статике

$$y = \frac{P \cdot K}{2U} \cdot 1 \rightarrow y_1 = \frac{1 \cdot K}{2U}; \quad \frac{1}{y_1} = \frac{2U}{K} = J_n, \quad (3.10)$$

где  $J_n$  – жесткость пути, приведенная к контакту колеса и рельса,  $J_n = (0,5 \div 2,0) \cdot 10^5$  кН/м;

$$R = y \cdot J_n. \quad (3.11)$$

Если измерим прогиб  $y$  под неизвестной силой  $P_x$ , то можем найти и силу  $P_x = \frac{y}{y_1}$ .

Силы инерции для системы «колесо–путь» определяются по выражению

$$\Sigma J = M_k \frac{d^2(\eta + y)}{dt^2} + m_n \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (3.12)$$

где  $m_n$  – фиктивная масса колеблющегося пути, приведенная к точке. Экспериментально установлено, что она равна примерно 2–4-метровому куску рельса [1].

Суммарные силы трения можно получить по выражению

$$\Sigma T = r_0 + r_1 \cdot y + r_2 \frac{dy}{dt} + r_3 \frac{d^2 y}{dt^2} + r_4 \frac{d^3 y}{dt^3} + \dots, \quad (3.13)$$

где  $r_0$  – параметр сил трения, независящих от величины перемещения (по боковым поверхностям шпалы, между костылями и подошвой рельса);  $r_1$  – параметр сил трения, зависящих от величины перемещения рельса (силы трения в балласте);  $r_2$  – параметр сил трения, зависящих от скорости перемещения нагрузки (силы вязкого трения).

Параметры сил трения мало изучены и в практических расчетах не учитываются.

Воздействия внешних сил  $Q$  может и не быть. С учетом вышеизложенного в общем виде запишем следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{y}{y_1} + M_k \frac{d^2(\eta + y)}{dt^2} + m_n \frac{d^2 y}{dt^2} + f(t) = 0. \quad (3.14)$$

Выполним преобразование и получим

$$\frac{y}{y_1} + (M_k + m_n) \frac{d^2 y}{dt^2} + \underbrace{M_k \frac{d^2 \eta}{dt^2}}_{f_1(t)} + f(t) = 0;$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{1}{y_1(M_k + m_n)} y = \frac{1}{M_k + m_n} f_1(t), \quad (3.15)$$

где  $\frac{1}{y_1(M_k + m_n)} = \Psi^2$  – квадрат циклической частоты собственных колебаний системы «колесо–путь».

Тогда основное дифференциальное уравнение современного динамического расчета пути на прочность запишется в следующем виде

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \Psi^2 \cdot y = \underbrace{\frac{1}{M_k + m_n} f_1(t)}_{\text{внешние силы}}, \quad (3.16)$$

где  $\Psi^2$  – квадрат циклической частоты собственных колебаний системы «колесо–путь»,

$$\Psi^2 = \frac{1}{\frac{K}{2U} \cdot \frac{q_k}{g}} = \frac{2U \cdot g}{K \cdot q_k}, \quad (3.17)$$

$g$  – ускорение силы тяжести;  $q_k$  – необрессоренный вес, приходящийся на колесо.

Период собственных колебаний системы «колесо–путь» при известной частоте определяется по формуле

$$T_{\Psi} = \frac{2\pi}{\Psi}. \quad (3.18)$$

Профессор С.П. Тимошенко (1909 г.) исследовал три вида неровности на пути:

- треугольную;
- параболическую;
- косинусоидальную.

Было установлено, что наиболее неблагоприятной формой неровности на пути при определении дополнительного прогиба рельса  $y$  и дополнительной силы инерции является косинусоидальная.

Данная неровность описывается уравнением

$$\eta = \frac{a}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{\ell_n} x\right), \quad (3.19)$$

где  $a$  – наибольшая ордината (амплитуда) неровности;  $\ell_n$  – длина неровности;  $x$  – текущее значение неровности,  $x = V \cdot t$ .

Вторая производная от уравнения (3.19) была подставлена в правую часть уравнения (3.16) ( $\frac{d^2\eta}{dt^2}$  – внешняя сила при наличии неровности).

В результате получено следующее решение уравнения

$$y = \frac{a}{2} \frac{M_k}{M_k + m_n} \cdot \frac{1}{\left(\frac{T_0}{T_{\Psi}}\right)^2 - 1} \left( \cos \frac{2\pi}{T_0} t - \cos \frac{2\pi}{T_{\Psi}} t \right), \quad (3.20)$$

где  $T_0$  – время прохождения колесом неровности,  $T_0 = \frac{\ell_n}{V}$ ;  $T_{\Psi}$  – период собственных колебаний [формула (3.18)].

После вычисления дополнительного прогиба рельса  $y$ , вызванного неровностью  $\eta(t)$ , была определена сила инерции [6, 16]

$$R = P_{np} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2g}} \cdot i \cdot \sqrt{\frac{U}{K}} \cdot \sqrt{q_k} \cdot V, \quad (3.21)$$

где  $i$  – уклон динамической неровности,  $i = \frac{2a}{\ell_n}$ .

После преобразования и дополнительных исследований для пути с железобетонными шпалами была получена расчетная формула

$$P_{\text{нп}} = 0,8 \cdot 10^{-8} \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot \ell \cdot P_{\text{ср}} \sqrt{\frac{U}{K}} \cdot \sqrt{a_k} \cdot V, \quad (3.22)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияние типа рельсов на образование динамической неровности на пути ( $\beta = 1$  – для Р50;  $\beta = 0,87$  – для Р65;  $\beta = 0,82$  – для Р75);  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий влияние рода балласта на образование динамической неровности на пути ( $\gamma = 1$  – для щебня;  $\gamma = 1,1$  – для гравия;  $\gamma = 1,5$  – для песка);  $\ell$  – расстояние между осями шпал, см;  $P_{\text{ср}}$  – средняя со стороны колеса нагрузка, действующая на путь;  $V$  – скорость движения, км/ч;  $\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий влияние колеблющейся массы пути на образование динамической неровности на пути ( $\alpha_1 = 0,931$  – для железобетонных шпал;  $\alpha_1 = 1,000$  – для деревянных шпал);  $\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий влияние жесткости пути на величину уклона динамической неровности ( $\varepsilon = 0,322$  – для железобетонных шпал;  $\varepsilon = 1$  – для деревянных шпал).

Среднее квадратическое отклонение данной силы:

$$S_{\text{нп}} = \sqrt{\frac{\sum P_{\text{нп}i} - P_{\text{нп}}^{\text{ср}}{}^2}{N}}, \quad S_{\text{нп}} = 0,707 P_{\text{нп}}. \quad (3.23)$$

### Силы инерции, связанные с наличием изолированных неровностей на колесах $P_{\text{инк}}$ .

При движении колеса с изолированной неплавной неровностью на поверхности катания (ползун, выбоина) получается удар. В расчетах пути на прочность рассматривают случаи, когда колесо прокатывается по рельсу своей изолированной неровностью без отрыва, т.е. безударное взаимодействие.

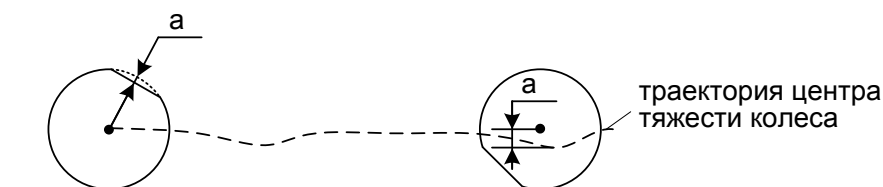


Рис. 3.3. Схема колеса с изолированной неровностью:  
а – ползун (выбоина)

Согласно ПТЭ дополнительная глубина неровности допускается для колес с подшипниками скольжения – 2 мм; с подшипниками качения – 1,0 мм. В соответствии с выполненными исследованиями получена следующая расчетная формула [6, 16]:



$$P_{\text{инк}} = y_{\text{max}} \cdot a_1 \cdot \alpha_0 \frac{2U}{K}, \quad (3.24)$$

где  $y_{\text{max}}$  – максимальный дополнительный прогиб рельса при прохождении колесом косинусоидальной неровности, отнесенный к единице глубины неровности, определяется по отношению  $\frac{T_0}{T_\Psi}$ , где  $T_0$  – период вынужденных колебаний колеса при прохождении им неровности;  $T_\Psi$  – период собственных колебаний системы «колесо–путь».

Расчетные значения  $T_0$  и  $T_\Psi$  определяются по формулам:

$$T_0 = 0,036 \frac{\ell_{0-i}}{V} \text{ и } T_\Psi = 5,56 \sqrt{\frac{Kq_k}{gU}}; \quad (3.25)$$

$$\ell_{0-1} = 20 \text{ см и } \ell_{0-2} = \pi d; \quad g = 981 \text{ см/с}^2.$$

При  $\frac{T'_0}{T_\Psi} < 0,71 < \frac{T''_0}{T_\Psi}$ ,  $y_{\text{max}} = 1,47$ ; при других значениях  $y_{\text{max}}$  определяется по графику профессора С.П. Тимошенко (рис. 3.4) как наибольшая величина в интервале значений.

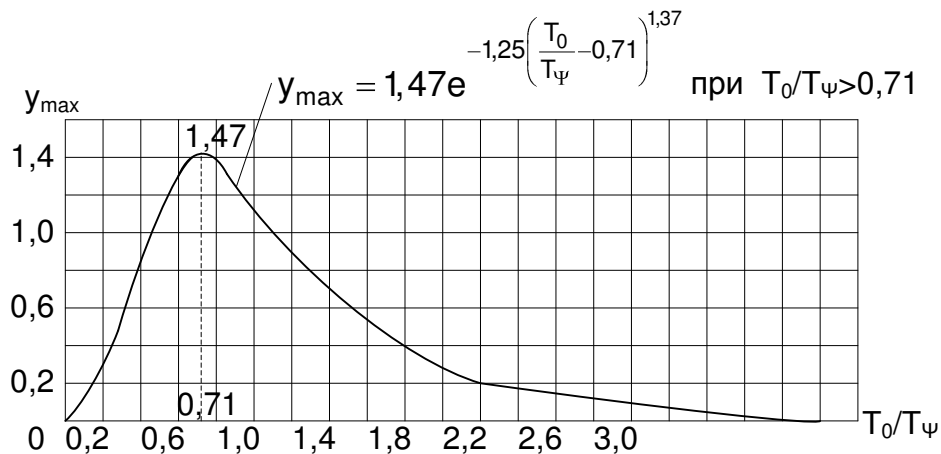


Рис. 3.4. Кривая дополнительного прогиба рельса  $y_{\text{max}}$  в зависимости от соотношения  $\frac{T_0}{T_\Psi}$

Другой способ определения  $y_{\text{max}}$  сводится к нахождению критической скорости  $V_{\text{кр}}$ , при превышении над которой заданной  $V_i$   $y_{\text{max}} = 1,47$ . Критическая скорость определяется по зависимости

$$V_{кр} = 0,182 \sqrt{\frac{U g}{K q_k}}. \quad (3.26)$$

Если  $V_{кр} > V_i$ , то  $y_{max}$  определяется по графику при значении

$$\frac{T_0}{T_\Psi} = \frac{0,129 \sqrt{\frac{U g}{K q_k}}}{V} \text{ или при } \left| \frac{T_0}{T_\Psi} \right| \geq 0,71 - \text{ по аппроксимированному выраже-}$$

нию кривой указанного графика  $y_{max} = 1,47 e^{-1,25 \left( \frac{T_0}{T_\Psi} - 0,71 \right)^{1,37}}$ , а при  $\frac{T_0}{T_\Psi} < 0,71$  –

по линейной зависимости, заменяющей криволинейное очертание этого участка в графике (е – основание натуральных логарифмов).

В формуле (3.24)  $a_1$  – расчетная глубина изолированной неровности на колесе, принимается величиной 2/3 от допускаемого значения по ПТЭ ( $a_1 = 0,065$  см – при подшипниках качения и  $a_1 = 0,133$  см – при подшипниках скольжения);  $\alpha_0$  – коэффициент, учитывающий влияние колеблющейся массы пути ( $\alpha_0 = 0,433$  – при деревянных шпалах,  $\alpha_0 = 0,403$  – при железобетонных шпалах).

Среднее квадратическое отклонение данной инерционной силы равно следующей величине

$$S_{инк} = 0,25 P_{инк} = 0,5 y_{max} \cdot a_1 \cdot \alpha_0 \cdot \frac{U}{K}. \quad (3.27)$$

### **Силы инерции, связанные с наличием непрерывной неровности на колесе $P_{ннк}$ .**

Непрерывные неровности на колесе появляются за счет несовпадения центра тяжести колеса с центром тяжести оси и центром вращения (рис. 3.5, а), за счет овальности колес (рис. 3.5, б) и за счет неравномерности износа колес в поперечном сечении и перехода круга качения с диаметра  $D_1$  на  $D_2$  (рис. 3.5, в).

По уточненным данным профессора М.Ф. Вериго [6] дополнительную силу инерции за счет непрерывной неровности на колесе можно определить по формуле

$$P_{ннк} = \frac{0,231 \alpha_0 \cdot U \cdot V^2 \sqrt{q_k}}{d^2 \sqrt{K \cdot U - 3,26 K^2 \cdot q_k}}, \quad (3.28)$$

где  $V$  – скорость движения, км/ч;  $d$  – диаметр колеса, см.

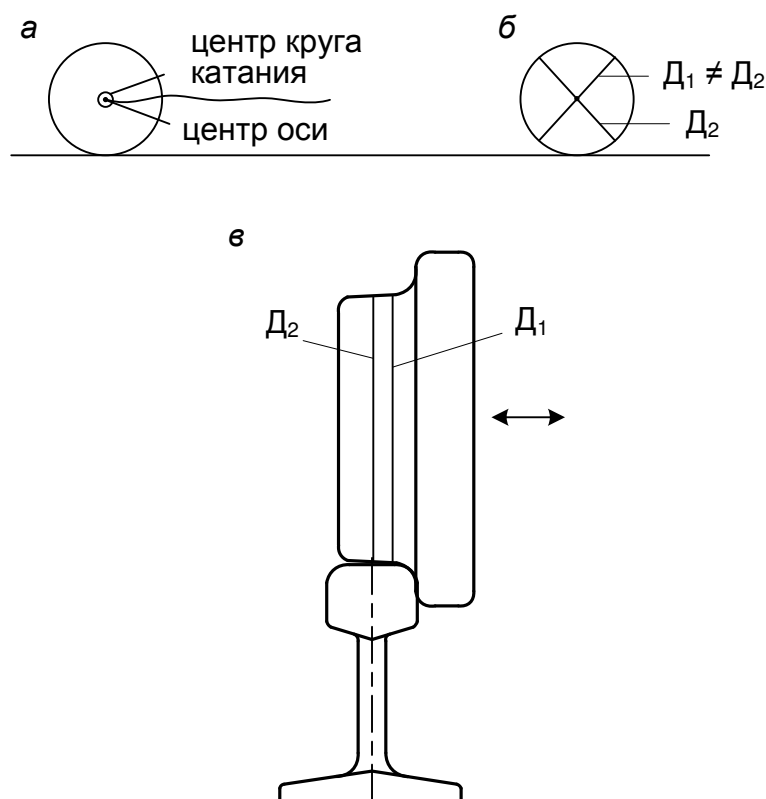


Рис. 3.5. Непрерывные неровности на колесе

Среднее квадратическое отклонение данной силы

$$S_{\text{ннк}} = 0,225 P_{\text{ннк}} \cdot \quad (3.29)$$

### 3.3. Выбор расчетной нагрузки

Для расчета необходимо определить вероятное значение суммарной вертикальной силы.

Вероятностная композиция вертикальных сил записывается в следующем виде

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{ст}}^* \cdot P_{\text{р}}^* \cdot P_{\text{нп}}^* \cdot P_{\text{инк}}^* \cdot P_{\text{ннк}} \cdot \quad (3.30)$$

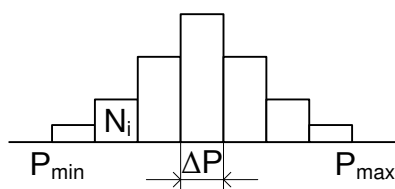


Рис. 3.6. Гистограмма распределения  $P_i$

Расчетную силу надо составить с заданной степенью вероятности. Пусть измерено  $N$  раз значение вертикальной силы в сечении пути. Построим гистограмму плотности частот (вероятностей) (рис. 3.6). Весь диапазон сил от  $P_{\text{min}}$  до  $P_{\text{max}}$  разделим на равные интервалы (разряды) величиной  $\Delta P$  (шаг интервала).

Обозначим:

$N_i$  – частота наблюдений величины  $P$  в  $i$ -м интервале;

$\frac{N_i}{N} = \Phi_i$  – частота (вероятность) появления сил  $P_i$  в  $i$ -м интервале;

$\frac{N_i}{N \cdot \Delta P} = W_i$  – относительная плотность распределения (плотность вероятностей (частот)).

При непрерывном изменении плотности вероятностей кривая подчиняется распределению Гаусса (рис. 3.7) и описывается зависимостью

$$W_i = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P_i - P_{cp})^2}{2S^2}}. \quad (3.31)$$

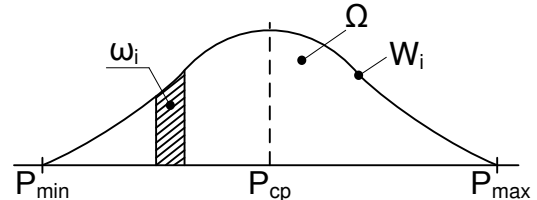


Рис. 3.7. Кривая распределения случайной величины (Гаусса)

Распределение Гаусса удовлетворяет четырем положениям:

1) кривая симметрична относительно  $P_{cp}$

$$P_{cp} = \frac{\sum P_i}{N}; \quad (3.32)$$

2) площадь между кривой и осью абсцисс равна единице. Площадь каждого прямоугольника гистограммы

$$\omega_i = \Delta P \frac{N_i}{N \cdot \Delta P} = \frac{N_i}{N}, \quad (3.33)$$

площадь всей гистограммы равна единице

$$\Omega = \sum \omega_i = \sum \frac{N_i}{N} = \frac{\sum N_i}{N} = \frac{N}{N} = 1; \quad (3.34)$$

3) чем больше количество  $N$ , тем больше  $N_i$  в каждом  $i$ -м интервале;

4) чем шире интервал  $\Delta P$ , тем большее количество случаев падает на него.

Кривая вероятностей Гаусса характеризуется величиной  $P_{cp}$  и  $S$ . Если принять за расчетное значение вертикальную силу, то

1)  $P_{расч} = P_{cp}$  (вероятность превышения расчетного значения 0,5);

2)  $P_{расч} = P_{cp} + S(0,159)$ ;

3)  $P_{расч} = P_{cp} + 2S(0,023)$ ;

4)  $P_{расч} = P_{cp} + 2,5S(0,006)$ ;

5)  $P_{расч} = P_{cp} + 3S(0,001)$ ;

$$6) P_{\text{расч}} = P_{\text{ср}} + 6S(0,0).$$

В правилах расчета [2, 3, 6] принято, что фактически силы могут превысить в 6 случаях из 1000 расчетные силы, т. е.

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{ср}} + 2,5 S, \quad (3.35)$$

где  $S$  – среднее квадратическое отклонение всех переменных сил, действующих на путь со стороны колеса;

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{ст}} + 0,75 P_p. \quad (3.36)$$

Теорией вероятностей доказывается, что дисперсия ряда независимых переменных равна сумме дисперсий каждой величины, т. е.

$$S^2 = \sum S_i^2, \text{ следовательно, } S = \sqrt{\sum S_i^2}. \quad (3.37)$$

Тогда [2, 3, 6], учитывая количество изолированных (5 %) и непрерывных (95 %) неровностей на колесе

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{\text{нп}}^2 + 0,05S_{\text{инк}}^2 + 0,95S_{\text{ннк}}^2}. \quad (3.38)$$

### 3.4. Расчетные формулы для определения напряжений в элементах пути

Напряжения изгиба в кромках подошвы рельса определяются по формуле

$$\sigma_p^k = \frac{f}{4 W_n \cdot K} \underbrace{(P_{\text{ст}} + 0,75 P_p + 2,5 S + \sum P_{\text{ср}} \cdot \mu)}_{P_{\text{расч}}}, \quad (3.39)$$

где  $f$  – коэффициент, учитывающий действие горизонтальных поперечных сил, внецентренное приложение вертикальных сил и подуклонки рельсов. Определяется экспериментально, приведен в [2, табл. 3].

Напряжения смятия в шпалах определяются по зависимости

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{K \ell}{2\omega} P_{\text{расч}} + \sum P_{\text{ср}} \cdot \eta, \quad (3.40)$$

где  $\omega$  – площадь передачи давления на шпалу через подкладку или прокладку (при бесподкладочном скреплении).

Напряжения сжатия в балласте в подрельсовой зоне равно

$$\sigma_6 = \frac{K \ell}{2 \Omega_\alpha} P_{\text{расч}} + \sum P_{\text{ср}} \cdot \eta, \quad (3.41)$$

где  $\Omega_\alpha$  – эффективная площадь нижней постели полушпалы (с учетом ее изгиба).

### 3.5. Определение допускаемых скоростей движения поездов

При проектировании железнодорожного пути иногда приходится решать задачи, связанные с определением допускаемых скоростей обращения подвижных единиц по условиям прочности пути. Для этого рассматривают напряжения в элементах верхнего строения пути заданной конструкции при движении данной подвижной единицы с различными скоростями в прямых и кривых разных радиусов. В результате получают графики  $\sigma_p^k = f(V)$ , подобные рис. 3.8.

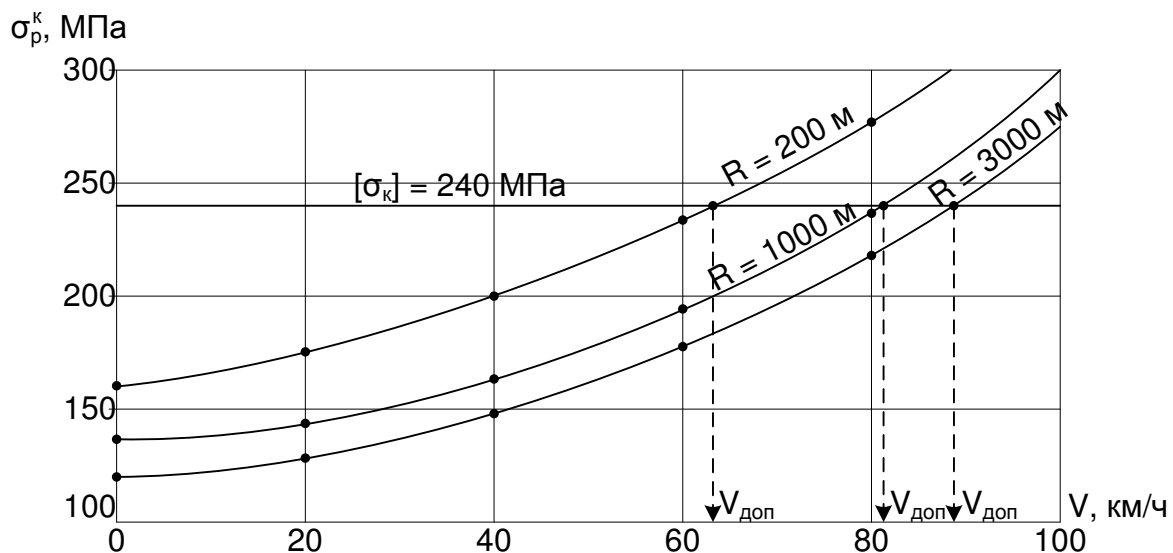


Рис. 3.8. Напряжения в кромках подошвы рельса типа Р50 при проходе локомотива

При нанесении на график значения оценочного критерия прочности в точке его пересечения с расчетной величиной получают допускаемую скорость движения подвижной единицы. На рис. 3.8 в качестве подвижной единицы показан локомотив с критерием прочности по напряжениям в рельсах  $[\sigma_k] = 240$  МПа [2] на участке пути с грузонапряженностью от 10 до 24 млн ткм бр. на км в год.

Как правило, допускаемую скорость движения подвижного состава устанавливают по напряжениям в рельсах. Если в других элементах верхнего строения пути (на шпалах, балласте, основной площадке земляного по-

лотна) расчетные напряжения больше допускаемых, то принимают решение об увеличении их мощности (увеличение количества, размеров).

Иногда при проектировании мероприятий по модернизации (реконструкции) пути с повышением скоростей движения поездов по подобным графикам (рис. 3.8) можно судить о том, какие кривые необходимо будет смягчить и до какого радиуса.

### 3.6. Допускаемые напряжения в элементах верхнего строения пути

В Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности [2] 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 допускаемого количества отказов рельсов за период нормативной наработки;

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

$[\sigma_6]$  и  $[\sigma_3]$  – из условия непревышения допускаемой 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 табл. 3.1.

Таблица 3.1

#### Оценочные критерии прочности пути

Критерии	Виды подвижного состава	Значения оценочных критериев прочности, МПа, при грузонапряженности, млн. т брутто/км в год*			
		более 50	50–25	24–10	менее 10
$[\sigma_k]$	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
$[\sigma_6]$	Локомотивы	0,4	0,42	0,45	0,50
	Вагоны	0,26	0,30	0,35	0,40
$[\sigma_3]$	Локомотивы	0,10	0,10	0,11	0,12
	Вагоны	0,08	0,08	0,09	0,10

\*Для новостроек – на десятый год эксплуатации.

Данные табл. 3.1 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:  $R = 1000 \div 651$  м – один раз, при  $R = 651 \div 351$  м – два раза и при  $R < 350$  м – три раза. Поэтому из условия обеспечения указанных показателей надежности пути в таких кривых значение оценочных критериев прочности рельсов принимается  $[\sigma_k] = 240$  МПа; при использовании только термоупроченных рельсов приведенные в табл. 3.1 значения  $[\sigma_k]$  увеличиваются на 14 %;

$[\sigma_6]$  – для щебеночного и асбестового балласта; при песчаном балласте приведенные в табл. 3.1 значения  $[\sigma_6]$  необходимо уменьшить в 1,6 раза, а при крьерном гравии и ракушке – в 1,4 раза;

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

Рекомендуемая литература [1, 2, 3, 6, 8].