

Лекция 1

РАСЧЕТ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ НА ПРОЧНОСТЬ

План лекции:

- 1.1. Краткая история развития теории расчетов пути на прочность.
- 1.2. Цели расчетов.
- 1.3. Предпосылки и допущения при расчетах.
- 1.4. Упругие характеристики пути.

1.1. Краткая история развития теории расчетов пути на прочность

Теория расчетов пути на прочность исторически развивалась в двух направлениях:

- 1) совершенствовалась расчетная схема;
- 2) улучшалась методика вероятностного расчета.

В 1831 г. инженер П.П. Мельников книгой «О железных дорогах» делает первый шаг по расчету пути на прочность – рассчитывает рельс как балку, лежащую на двух жестких опорах и нагруженную вертикальной нагрузкой. То есть использовал законы строительной механики.

В 1888 г. немецкий ученый Циммерман усложняет схему, рассматривая рельс как неразрезную балку, лежащую на четырех упругих опорах.

В 1903–1906 гг. академик Н.П. Петров принимает в расчетах рельс уже в виде балки бесконечной длины, лежащей на множестве точечных упругих опор или как на сплошном упругом основании. Эта расчетная схема используется и в современных практических расчетах пути на прочность.

Первой книгой по сложнейшим вопросам взаимодействия пути и подвижного состава является работа Н.П. Петрова, опубликованная им в 1915 г., «Давление колеса на рельсы железных дорог, прочность рельсов и устойчивость пути», в которой он закрепляет приоритет русских ученых в развитии транспортной науки. В 1914 г. на базе работ Н.П. Петрова, А.А. Васютнинского, А.А. Холодецкого, К.Ю. Цеглинского и других ученых была разработана первая Инструкция по определению нагрузок на железнодорожный путь и скоростей движения поездов в зависимости от типа верхнего строения пути.

В дальнейшем эта инструкция совершенствовалась и переиздавалась:

- | | | |
|---------------|---|--|
| 1925 г. | } | расчеты по законам строительной и теоретической механики; |
| 1931 г. | | |
| 1936 г. | | |
| 1941 г. | | |
| 1954 г. | } | расчеты по законам строительной и теоретической механики + по законам теории вероятностей. |
| 1972–1976 гг. | | |

В 1923 г. профессор А.М. Годыцкий-Цвирко (ЛИИЖТ) издает фундаментальную для того времени монографию «Взаимодействие пути и подвижного состава», главное внимание уделяя вопросам расчета динамических сил взаимодействия.

В 1933 г. выходит в свет на русском языке монография французского ученого Г. Марье, посвященная взаимодействию пути и подвижного состава с детальными исследованиями колебательного процесса подвижного состава.

В 1956 г. издан обобщающий труд по взаимодействию пути и подвижного состава и практическому методу расчета пути на прочность коллективом авторов: М.Ф. Вериго, В.Н. Данилова, Е.М. Бромберга и М.А. Фришмана «Взаимодействие пути и подвижного состава». Вероятностный анализ отдельных сил и метод композиции их результирующего действия разработаны М.Ф. Вериго. В 1972 г. на базе экспериментальных и теоретических исследований им разработаны предложения по корректировке практического метода расчета пути на прочность.

В 1986 г. издательством «Транспорт» выпущено фундаментальное исследование профессоров М.Ф. Вериго и А.Я. Когана «Взаимодействие пути и подвижного состава», в котором излагаются современные взгляды на эту проблему и два метода расчета пути на прочность – практический (инженерный), широко используемый на железных дорогах страны при движении поездов со скоростью до 100–120 км/ч, и новый, более совершенный метод – метод в полной постановке задачи, позволяющий исследовать силы взаимодействия пути и подвижного состава при любых реальных скоростях движения поездов с использованием современных, быстродействующих ЭВМ.

Большой вклад в теорию и опытные исследования внесли ученые ВНИИЖТа, МИИТа, ЛИИЖТа, ДИИТа и других организаций, такие как М.Ф. Вериго, Г.М. Шахунянц, М.А. Фришман, М.А. Чернышев, М.П. Смирнов, В.Ф. Яковлев, А.Я. Коган и многие другие.

1.2. Цели расчетов

1. Определение напряжения в элементах верхнего строения пути при заданных типе верхнего строения пути и подвижной нагрузке, скорости движения, плане и профиле пути:

σ_p^k – общие кромочные напряжения в подошве от изгиба и кручения рельса, МПа;

$\sigma_{ш}$ – напряжения под подкладкой на шпалах, МПа;

$\sigma_б$ – напряжения в балласте на уровне нижней постели шпалы в подрельсовом сечении, МПа;

σ_h – напряжения на основной площадке земляного полотна, кПа.

2. Определение допускаемых скоростей движения экипажей по условиям прочности пути $V_{\text{доп}}$, км/ч.

3. Получение наименьшей мощности пути для заданных условий эксплуатации $P_{\text{ос}}$, V , T и т. д.

4. Получение исходных данных для разработки технических условий на укладку бесстыкового пути и выполнения технико-экономических расчетов.

1.3. Предпосылки и допущения при расчетах

1. Рельс рассматривается как балка постоянного сечения бесконечной длины, лежащая на сплошном упругом однородном основании (рис. 1.1, а) или как балка на множестве точечных упругих опор (рис. 1.1, б). Фактически путь имеет упругопрерывистое основание (рис. 1.1, в). Замена фактической расчетной схемы на первую дает разницу в величинах напряжений в рельсах на 2–4%, на вторую – на 5–7%.

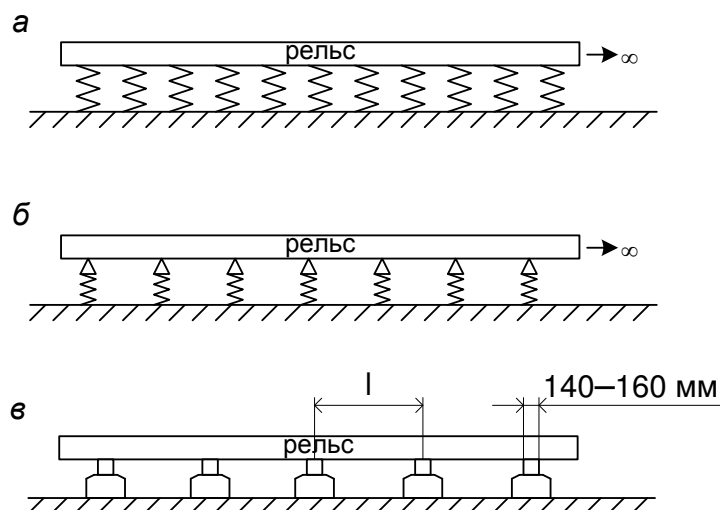


Рис. 1.1. Расчетная схема рельса

2. Рельсы рассматриваются:

- неослабленные болтовыми отверстиями;
- расчетное сечение берется на удалении от стыка на 3,5 м и более;
- не учитывается подуклонка рельсов;
- оба рельса считаются равнозагруженными (рис. 1.2).

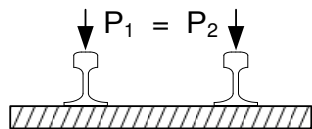


Рис. 1.2. Вертикальные нагрузки на рельсы

Рассчитывают только один рельс, задача упрощается: рассматривают не колесную пару и тележку в целом, а колесо и все нагрузки приводят к этому колесу.

3. Принята гипотеза о линейной зависимости между прогибами и нагрузками (рис. 1.3).

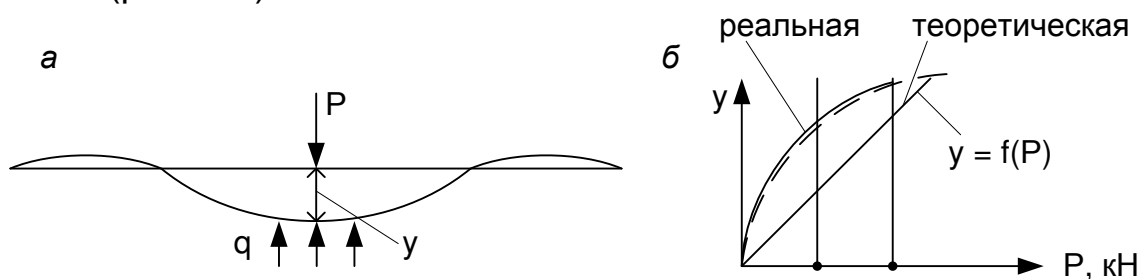


Рис. 1.3. Расчетная схема рельса с вертикальной силой (а) и зависимость прогиба от нагрузки (б)

4. Расчет ведется на вертикальные силы, учет действия горизонтальных поперечных сил, влияния внецентренного приложения вертикальных сил и подуклонки рельсов осуществляется коэффициентом f , полученным экспериментально

$$f = \frac{\sigma_{\text{HK}}^{\text{max}} (\sigma_{\text{BK}}^{\text{max}})}{0,5(\sigma_{\text{HK}} + \sigma_{\text{BK}})}, \quad (1.1)$$

где $\sigma_{\text{HK}}^{\text{max}}$, $\sigma_{\text{BK}}^{\text{max}}$ – соответственно максимальные напряжения по наружной, внутренней кромкам подошвы рельса; $0,5(\sigma_{\text{HK}} + \sigma_{\text{BK}})$ – осевые напряжения в подошве рельса.

5. Расчет ведется по формулам статики ($V = 0$), при действии системы нагрузок принимается закон независимости действия сил; переменные динамические силы от расчетного колеса принимаются в их максимально вероятном значении, от остальных колес – в их среднем значении.

6. Колеса подвижного состава при движении не отрываются от поверхности катания рельса (рассматривается безударное движение).

7. Рельс рассчитывается по напряжениям изгиба; контактные, напряжения под головкой и другие местные напряжения не учитываются.

8. Собственным весом элементов верхнего строения пути пренебрегают.

9. Путь и подвижной состав находятся в исправном состоянии, отвечающем требованиям ПТЭ.

10. Расчет ведется по четырем оценочным критериям прочности пути (допускаемым напряжениям) из условия обеспечения его надежности в зависимости от класса путей:

- $[\sigma_K]$ – из условия непревышения допускаемого количества отказов рельсов за период нормативной наработки;

- $[\sigma_{\text{ш}}]$ – 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.

В теории надежности под **отказом** понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособности. При **полном отказе** объект перестает выполнять все функции. Так, излом рельса приводит к остановке движения поездов, т. е. к полному отказу. При **частичном отказе** изделие перестает выполнять какую-либо одну или несколько функций или выполняет свои функции, но с пониженными параметрами (пропуск поездов осуществляется с пониженными скоростями движения).

Наработкой называется продолжительность или объем работы объекта. Для железнодорожного пути – это количество пропущенного тоннажа в миллионах тонн брутто.

1.4. Упругие характеристики пути

1.4.1. Жесткость рельсовых опор J_0

Рельс обычно опирается на отдельные опоры. Запишем условие равновесия деревянной (рис. 1.4, а) и железобетонной (рис. 1.4, б) шпалы при ее сплошном опирании на упругое основание при воздействии

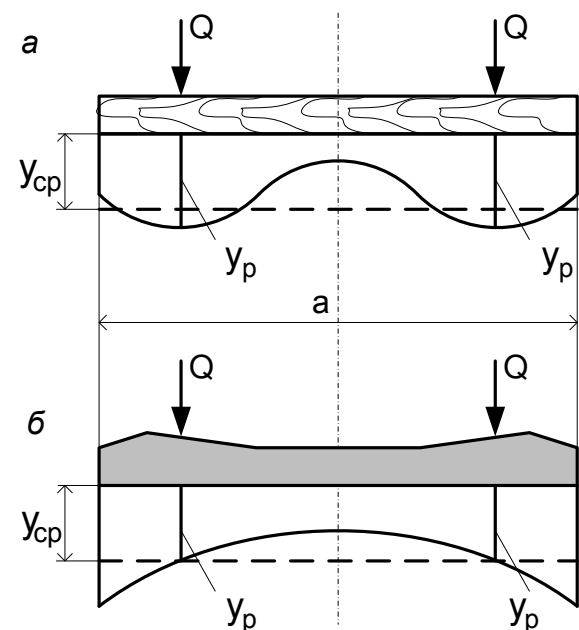
вертикальной силы от каждой рельсовой нити

$$2Q = a \cdot b \cdot C \cdot y_{\text{ср}}, \quad (1.2)$$

где a , b – длина и ширина шпалы, м; C – коэффициент постели шпалы (коэффициент упругого сжатия подшпального основания), Н/м^3 ($C = 100 \div 120 \text{ Н/м}^3$ при деревянных шпалах на гравийном и щебеночном балласте летом; $C = 1000 \div 1500 \text{ Н/м}^3$ для скального грунта; $C = 10 \div 200 \text{ Н/м}^3$ для плотной глины); $y_{\text{ср}}$ – средняя упругая осадка шпалы.

Отношение средней просадки шпалы $y_{\text{ср}}$ к просадке в подрельсовом сечении y_p обозначим как коэф-

Рис. 1.4. Эпюра просадки шпалы:
а – деревянной; б – железобетонной



фициент просадки опоры в подрельсовом сечении α_p

$$\frac{y_{\text{ср}}}{y_p} = \alpha_p, \quad (1.3)$$

Значения α_p летом при деревянных шпалах находятся в пределах $0,72 \div 0,86$, при железобетонных – $0,85 \div 0,88$ [7] и может доходить до $1,0 \div 1,05$ [8].

Тогда $2P = a \cdot b \cdot C \cdot \alpha_p \cdot y_{cp}$, откуда $P = \frac{a \cdot b}{2} C \cdot \alpha_p \cdot y_p$.

Под жесткостью опоры понимается сила, кН/м, приложенная в под-
рельсовом сечении к опоре и вызывающая ее осадку на единицу длины

$$Ж_0 = \frac{P}{y_p}. \quad (1.4)$$

Жесткость опор в летний период находится в диапазоне от 90000 до 200000 Н/м. Значение $Ж_0$ определяется экспериментально с фиксацией вертикальной силы на опору и ее просадки. При $y_p = 1$ см величина $P = Ж_0$.

1.4.2. Модуль упругости рельсового основания U

При расчете рельса как балки на сплошном упругом основании, для того чтобы вызвать просадку основания на единицу длины (1 см), вместо силы $Ж_0$ прикладывают вдоль по рельсу равномерно распределенную нагрузку U, МПа (кгс/см²), которая в сумме на протяжении расстояния между осями шпал ℓ составляет силу $Ж_0$

$$U = \frac{Ж_0}{\ell} = \frac{a \cdot b}{2\ell} C \cdot \alpha_p. \quad (1.5)$$

Физический смысл модуля упругости – это погонная нагрузка на 1 см балки, вызывающая ее осадку на 1 см.

Это основная характеристика пути в расчетах. Величина U рассчитывается по данным экспериментов в натурных условиях. Используются следующие способы.

1. По просадкам рельса Δy при приложении ступенями вертикальной силы ΔP (рис. 1.5).

Величина просадки рельса определяется по формуле

$$y = \frac{P \cdot K}{2U}, \quad (1.5)$$

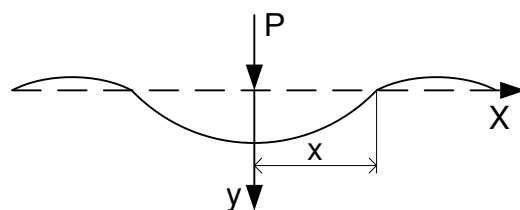


Рис. 1.5. Схема прогиба рельса под одиночной вертикальной силой

где K – коэффициент относительной жесткости рельса и рельсового основания, см^{-1} ,

$$K = \sqrt[4]{\frac{U}{4 EJ}}, \quad (1.6)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; J – момент инерции поперечного сечения рельса относительно горизонтальной оси, для рельса типа Р65 $J = 3208$ см^4 .

Подставляя выражение (1.6) в (1.5) и учитывая приращение просадки рельса Δy при изменении вертикальной силы ΔP , получим расчетную формулу

$$U = \left(\frac{\Delta P}{\Delta y} \right)^{4/3} \frac{1}{\sqrt[3]{64 EJ}}. \quad (1.7)$$

2. По длине просадки рельса. Половина длины просадки рельса x (рис. 1.5) определяется по формуле

$$x = \frac{3 \pi}{4 K}. \quad (1.8)$$

Подставляя выражение для определения K (1.6) в (1.8), получим расчетную формулу

$$U = \frac{81 E \cdot J \cdot \pi^4}{64 x^4}. \quad (1.9)$$

В данном способе очень важно точно определить величину x , так как эта величина возводится в четвертую степень и любая погрешность существенно влияет на модуль упругости U .

3. По напряжениям в подошве рельса. Осевые напряжения в кромке подошвы рельса определяются по формуле

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_H + \sigma_B}{2}, \quad (1.10)$$

где σ_H, σ_B – измеренные напряжения в кромках подошвы рельса соответственно с внутренней и внешней стороны, МПа.

Вертикальная сила, кН, рассчитывается по формуле

$$P = 4W \cdot K \cdot \sigma_0. \quad (1.11)$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения рельса, м^3 .

Используя расчетные значения силы P и замеренные просадки рельса, по формуле (1.7) определяют модуль упругости рельсового основа-

ния. Модуль упругости зависит от эпюры шпал, материала и состояния шпал, рода и состояния балласта, вида и состояния грунтов земляного полотна, времени года.

Величина U на пути с деревянными шпалами принимается от 16 до 29,5 МПа, на пути с железобетонными шпалами – от 100 до 167 МПа [2]. В зимний период жесткость подрельсового основания увеличивается, поэтому рекомендуется величину U повышать примерно в 2÷4 раза.

В суровых природно-климатических условиях при глубоком сезонном промерзании-оттаивании и наличии вечномерзлых грунтов в теле и основании земляного полотна величина модуля упругости рельсового основания изменяется в большом диапазоне. Так, по данным измерений ДВГУПС, на Дальневосточной железной дороге на пути с деревянными шпалами при эпюре 2000 шт./км в период протаивания балласта и грунтов насыпи величина U уменьшилась от 152 до 24 МПа (в 6,3 раза) [9].

Переход в настоящее время на железобетонное подрельсовое основание резко увеличивает жесткость железнодорожного пути и приводит к возрастанию в несколько раз модуля упругости U . При эксплуатации такого пути необходимо стремиться к оптимальной упругости пути с $U = 50 \div 100$ МПа [1, 8] за счет укладки качественных прокладок повышенной упругости в промежуточном скреплении, под подошву шпал или под балластный слой.

1.4.3. Коэффициент относительной жесткости рельса и подрельсового основания K

Коэффициент относительной жесткости рельса и подрельсового основания K , $\text{см}^{-1} (\text{м}^{-1})$, определяется как

$$K = \sqrt[4]{\frac{U}{4 EJ}}, \quad (1.12)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали, $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$ ($2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$); J – момент инерции поперечного сечения рельса, см^4 .

В расчетах пути закладывается не новый рельс, а рельс с предельно допустимым износом. Для обычных конструкций пути $K = 0,009 \div 0,018 \text{ см}^{-1}$ [2].

1.4.4. Жесткость пути β

При расчетах динамических сил, действующих от пути на колеса подвижного состава, одним из основных расчетных параметров является жесткость пути. Жесткость пути – это сила, вызывающая единичную осадку пути, определяется по формуле

$$\beta = \frac{P}{y} = \frac{P}{\frac{K}{2U}P} = \frac{2U}{K}. \quad (1.13)$$

С учетом формулы (1.12)

$$\beta = 2\sqrt[4]{4EJ \cdot U^3}, \quad (1.14)$$

где EJ – изгибная жесткость рельса, $\text{кгс} \cdot \text{см}^2$.

При рельсах типа Р65, щебеночном балласте на деревянных шпалах в прямых участках пути $U = 270 \text{ кгс/см}^2$, а на пути с железобетонными шпалами $U = 1000 \text{ кгс/см}^2$ [2]. Жесткость пути на деревянных шпалах равна 54000 кгс/см^2 , на железобетонных – 144000 кгс/см^2 . Переход на железобетонные шпалы в данном примере увеличивает жесткость пути в 2,67 раза.

Величина β существенно влияет на силы взаимодействия пути и подвижного состава, на изменение амплитудно-частотного спектра колебаний, а также на интенсивность накопления остаточных деформаций, износ и срок службы элементов железнодорожного пути и подвижного состава.

Рекомендуемая литература [1, 2, 3, 8, 14].