

ПРОДОЛЬНАЯ УПРУГОСТЬ ПУТИ УЗКОКОЛЕЙНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ШИРИНОЙ 750 мм

С. И. МОРОЗОВ

Аспирант

(Ленинградская лесотехническая академия)

Угон пути ведет к расстройству пути и подвижного состава, увеличивает расходы на их содержание и может привести к авариям, а поэтому представляет большое зло для железных дорог. Угон пути происходит в результате совместного действия сил, возникающих при прохождении по путям подвижного состава.

Настоящая статья содержит результаты опытного и теоретического исследования упругих свойств пути в горизонтальной плоскости. Не имея данных об упругих свойствах пути, невозможно успешно решить вопросы угона пути и методов борьбы с ним. Как показывает анализ процесса возникновения угона, величина продольных сил в значительной степени зависит от упругости пути в горизонтальной плоскости. Применение на дорогах противоугонов также основано на использовании упругости пути.

В настоящее время этот вопрос надлежащим образом не изучен. Только в 1950 году кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Московского института инженеров транспорта были проделаны опыты по определению продольной упругости верхнего строения пути ширококолейных железных дорог. По результатам эксперимента удалось составить эмпирическую формулу, отражающую зависимость величины продольного усилия P от перемещения пути. Формула имеет вид:

$$P = U \cdot \Delta x, \quad (1)$$

где Δx — перемещение пути, U — модуль продольной упругости, в свою очередь определяемой по формуле:

$$U = \frac{a + bQ}{2l}, \quad (2)$$

где Q — вертикальная нагрузка,
 l — расстояние между осями шпал,
 a и b — коэффициенты, определяемые эмпирически.

Однако формулу (2) нельзя признать полноценной, ибо она не содержит характеристик пути и грунта, и поэтому не может быть применена в условиях, отличных от тех, в которых проводились опыты*.

Приступая к изучению угона на железных дорогах, ширина колеи которых равна 750 мм, необходимо определить фактическую зависимость между действующими на путь горизонтальными силами и перемещениями пути.

Так как упругость верхнего строения пути как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости в основном зависит от упругости материала балластной призмы, то нами было предпринято исследование упругости балласта.

Условия постановки опытов. Опыты проводились на учебном дворе Ленинградской лесотехнической академии им. С. М. Кирова в период с 1 мая по 13 июля 1957 г. Нами был выбран участок пути (одно звено) длиной 7 м, тип рельса *P 15*, шпалы типа II, расстояние между осями шпал 75—80 см. Балластная призма песчаная, толщиной 30—35 см. Анализом отдельных проб получены следующие гранулометрические и физико-механические характеристики балласта:

Фракции в мм	>2,0	2,0—1,0	1,0—0,5	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,005	<0,005
Содержание частиц в %	14,2	17,4	26,5	35,0	1,4	3,2	2,3

Угол внутреннего трения $\varphi = 35^\circ 15'$ (рис. 3), $\operatorname{tg} \varphi = 0,71$. Модуль деформаций для различных образцов колебался от 400 до 520 кг/см².

Упругие свойства балласта определялись путем замера соответствующих перемещений, возникающих вследствие приложения горизон-

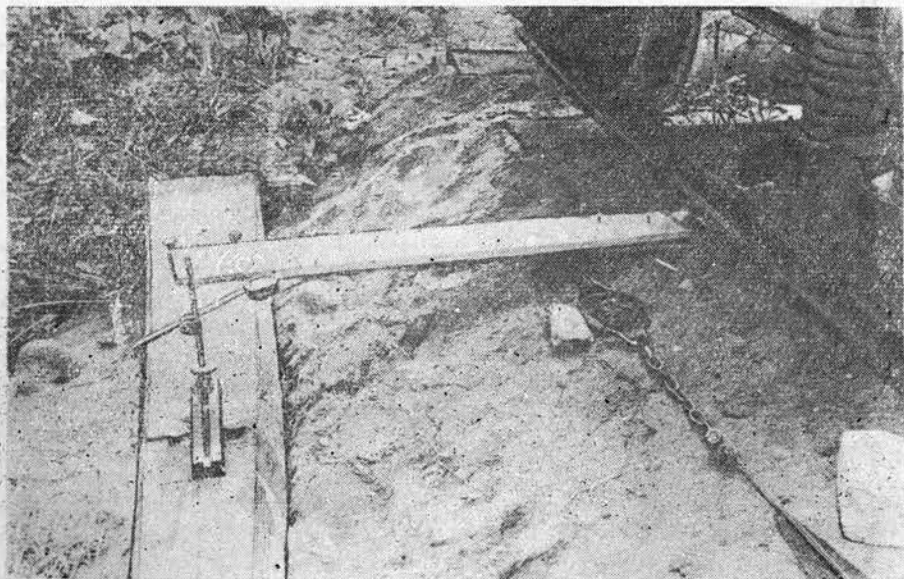


Рис. 1. Расположение приборов.

* Для узкоколейных железных дорог U было определено опытным путем Л. Е. Савиным.

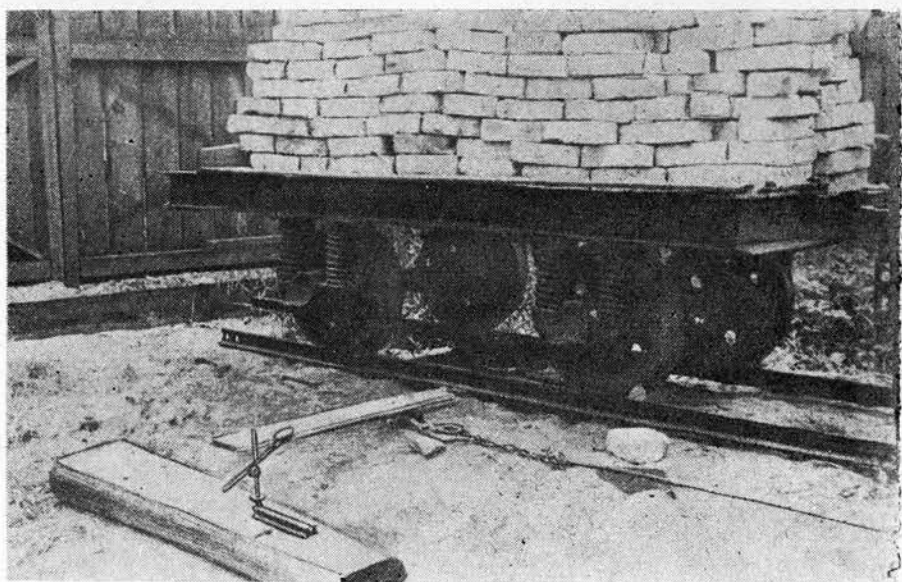


Рис. 2. Общий вид установки.

тальной силы к одиночной шпале или к секции из нескольких шпал. Горизонтальное усилие создавалось домкратом, величина его замерялась динамометрами с точностью отсчетов ± 2 кг, перемещение замерялось индикаторами с точностью отсчетов $\pm 0,005$ мм (рис. 1).

Вертикальная нагрузка на шпалу создавалась при помощи нагруженной вагонетки. Чтобы нагрузка от вагонетки передавалась только на исследуемую шпалу, подкладки под рельсом в количестве 3—4 шт. укладывались только на этой шпале и стыковой. Остальных шпал рельсы не касались. Центр тяжести вагонетки размещался строго над шпалой и, следовательно, практически усилие передавалось на эту шпалу (рис. 2).

После обработки опытных данных были выявлены:

1. Максимальное сдвигающее усилие для шпал длиной 150 см при отсутствии вертикальной нагрузки.
2. Зависимость перемещения одиночной ненагруженной шпалы от величины приложенного горизонтального усилия.
3. Зависимость между сдвигом шпал и вертикальной нагрузкой на них.

Максимальное сдвигающее усилие. Под максимальной сдвигающей силой понимают силу, которую нужно приложить к шпале, чтобы вызвать срыв ее с места.

Знание этой величины необходимо при расчетах и конструировании противоугонов для того, чтобы иметь возможность определить, какое усилие должны выдерживать противоугоны, то есть какова должна быть их мощность.

Нами выяснено, что для шпал длиной 150 см максимальное сдвигающее усилие находится в тесной зависимости от величины расстояния между шпалами, уменьшаясь, при прочих равных условиях, с увеличением шпального пролета.

В табл. 1 приводятся среднеарифметические значения максимальных сдвигающих усилий, измеренных во время опытов.

Расстояние между осями шпал в см	55	85	100	110
Максимальное сдвигающее усилие в кг	385	310	280	280

В интервале значений $l = 65 \div 100$ см зависимость величины максимального сдвигающего усилия (P_m) от расстояния между осями шпал достаточно хорошо описывается эмпирической формулой, выражающей линейную зависимость P_m от l , а именно:

$$P_m = 480 - 2l \quad (3)$$

Таким образом, если на ширококолейных железных дорогах противоугоны устанавливаются так, чтобы на каждую шпалу передавалось

усилие не больше 500 кг, на дорогах с шириной колеи 750 мм следует рекомендовать (при отсутствии вибрации пути) устройство таких противоугонов, чтобы усилие, передаваемое на каждую шпалу, не превышало 300—350 кг. Вибрация снижает P_m примерно вдвое.

Упругий сдвиг одиночной ненагруженной шпалы. Хотя грунт и не является упругим телом в обычном понимании, так

как наряду с упругими ему присущи и остаточные деформации, опыты показывают, что при большом количестве циклов «нагрузка-разгрузка» величина остаточных деформаций составляет незначительный процент от общей деформации. Работа железнодорожного пути характеризуется многократно повторяющимися нагрузками и разгрузками, поэтому свойства грунта можно отождествить со свойствами упругого тела.

Данная группа опытов проделана с целью выявления роли засыпки в общей схеме упругой деформации балласта. Поскольку шпала не нагружена и вес ее незначителен, то можно считать, что ее перемещение в основном определяется деформациями засыпки.

Всего было произведено 220 замеров на четырех шпалах. В таблице приведены значения усилий, необходимых для сдвига шпалы, и соответствующие им перемещения в мм при различных расстояниях между осями шпал, полученные после обработки результатов методами вариационной статистики, а на рис. 4 представлен график.

Расстояние между осями шпал в см	Усилие в кг				
	30	60	90	120	200
	Перемещения в мм				
55	0,034	0,089	0,195	0,370	0,637
88	0,036	0,091	0,228	0,426	0,952
95	0,038	0,092	0,233	0,481	1,253
110	0,040	0,105	0,253	0,491	1,446

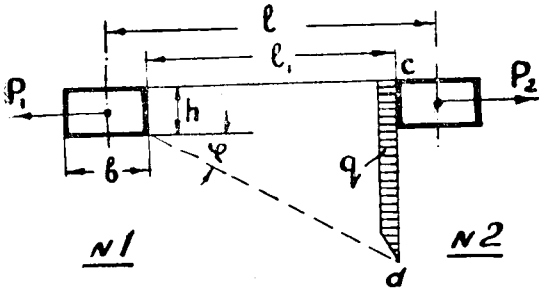


Рис. 3. Схема распространения давления.

Из рассмотрения результатов этой группы опытов видно, что величина перемещения, при прочих равных условиях, зависит от расстояния между шпалами.

По данным опытов было составлено корреляционное уравнение, отражающее зависимость перемещения шпалы от действующего на нее усилия:

$$\delta = aP + bP^2 \quad (4)$$

δ — перемещение шпалы в мм,
 P — усилие в кг,
 a и b — коэффициенты определяемые эмпирически и зависящие от l :

$$a = (0,000\ 000\ 258\ l^2 - 0,00\ 005\ 505\ l + 0,002\ 323)\ \text{мм/кг},$$

$$b = (0,0000\ 075 + 0,000\ 000\ 292l)\ \text{мм/кг}^2.$$

Значения a и b при $l = 55$; $a = 0,000076\ \text{мм/кг}$; $b = 0,00002323\ \text{мм/кг}^2$
 $l = 88$; $a = 0,0005223\ \text{мм/кг}$; $b = 0,00003392\ \text{мм/кг}^2$.

В процессе постановки опытов было обнаружено, что одновременно с перемещениями исследуемой шпалы отмечаются перемещения соседней с ней шпалы по направлению действия силы.

Причину этого можно объяснить путем следующих упрощенных рассуждений.

Угол, определяющий направление распространения давления, полагаем равным углу внутреннего трения φ . По плоскости cd , совпадающей с боковой гранью второй шпалы, действует распределенное давление, в первом приближении равномерное с интенсивностью q . Величину q легко определить, имея в виду, что сила P_1 приложена к площади действия давления cd , тогда:

$$q = P_1 \frac{1}{\left(h + \frac{l_1}{\text{ctg}\varphi}\right) a}, \quad (5)$$

где P_1 — усилие, прилагаемое к шпале № 1,
 h — толщина шпалы,
 a — длина.

Полное усилие, передаваемое от шпалы № 1 на шпалу № 2, равно $P_2 = q \cdot h \cdot a$ (рис. 3). Тогда:

$$P_2 = P_1 \frac{1}{1 + \frac{l_1}{h \cdot \text{ctg}\varphi}} \quad (6)$$

В каждом частном случае величина $\frac{1}{1 + \frac{l_1}{h \cdot \text{ctg}\varphi}}$ постоянна.

Обозначая ее через n , получим:

$$P_2 = n \cdot P_1 \quad (7)$$

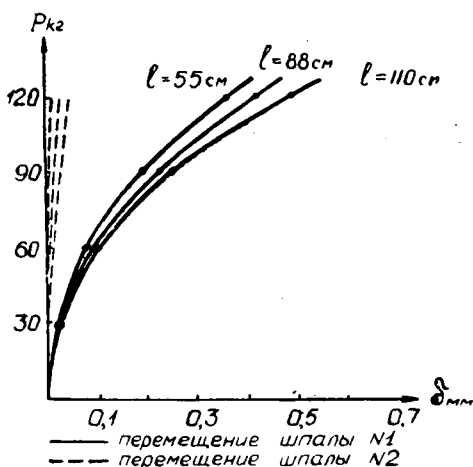


Рис. 4. Зависимость между силой, действующей на ненагруженную шпалу, и ее перемещением.

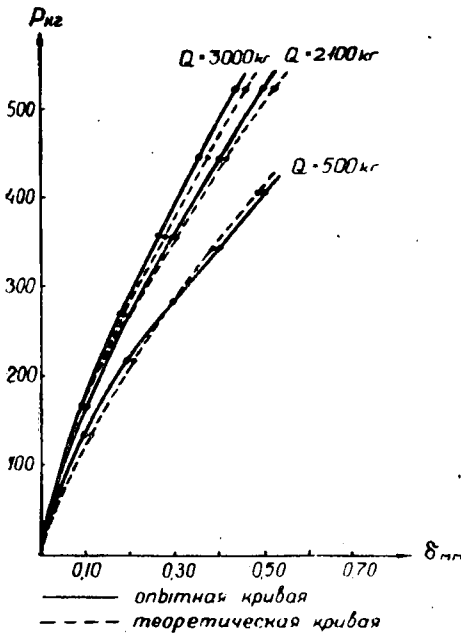


Рис. 5. Зависимость между действующей силой и перемещением нагруженной шпалы.

методу вариационной статистики, а результаты представлены на графике (рис. 5). Установлено, что сопротивление шпалы сдвигу возрастает с увеличением вертикальной нагрузки, причем эта зависимость нелинейная и может быть описана корреляционным уравнением:

$$P = A \delta' + B (\lg \delta' - 1) \quad (8)$$

где $\delta' = 1000\delta$, а A и B — коэффициенты, зависящие от Q :

$$A = (0,000000185Q^2 - 0,00035Q + 0,6369) \text{ кг/мм},$$

$$B = (33 + 0,143Q - 0,000053Q^2) \text{ кг}.$$

Формула (8) находится в хорошем соответствии с опытными данными.

A и B в частных случаях принимают следующие значения:

$$Q = 500 \text{ кг}$$

$$A = 0,5083 \text{ кг/мм}$$

$$B = 91,2 \text{ кг}$$

$$Q = 1300 \text{ кг}$$

$$A = 0,4935 \text{ кг/мм}$$

$$B = 128,6 \text{ кг}$$

$$Q = 2100 \text{ кг}$$

$$A = 0,7198 \text{ кг/мм}$$

$$B = 98,0 \text{ кг}$$

$$Q = 2500 \text{ кг}$$

$$A = 0,9125 \text{ кг/мм}$$

$$B = 59,0 \text{ кг}$$

$$Q = 3500 \text{ кг}$$

$$A = 1,6725 \text{ кг/мм}$$

$$B = 182,0 \text{ кг}$$

Значение P при прочих равных условиях зависит от толщины шпалы и величины шпального ящика.

Для того, чтобы полнее выявить характер зависимости $\delta = f(P)$ нами была сделана попытка установить эту закономерность, пользуясь методами теории упругости. Применение теории упругости к грунтам носит условный характер, тем не менее дает вполне достоверные результаты, чем и объясняется то, что в последнее время ее довольно часто и успешно применяют. Будем рассматривать шпалу как балку, ле-

Задаваясь значениями l , h и $\text{ctg} \varphi$ найдем, что величина n для узкоколейных железных дорог колеблется от 0,1 до 0,15. Таким образом, P_2 — силу, вызывающую смещение соседней шпалы, легко подсчитать.

В процессе опытов установлено, что упругость засыпки сильно зависит от степени уплотнения песка в балластном ящике. При уплотнении песка деревянной трамбовкой сопротивление шпал сдвигу резко возрастает.

Опыты показали, что засыпка играет определенную роль в общей упругой деформации пути.

Сопротивление шпал сдвигу при наличии вертикальной нагрузки. В этой группе опытов проведено 180 замеров на четырех шпалах.

Для каждой шпалы зависимость $\delta = f(P)$ была изучена при четырех различных значениях вертикальной нагрузки Q . Полученные данные обработаны по мето-

жащую на упругом основании (рис 6). Влияние засыпки не учитываем. На балку действует в общем случае горизонтальная сила P и вертикальная сила Q , равнодействующая которых равна $R = \sqrt{P^2 + Q^2}$ и наклонена к вертикали под углом β ($\cos\beta = \frac{Q}{R}$).

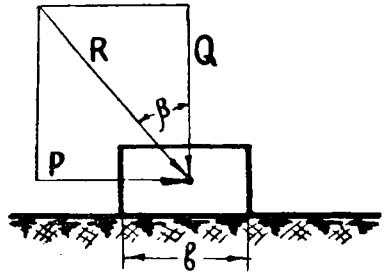


Рис. 6. Схема действия сил на шпалу в общем случае.

Если на ограничивающую неподвижное полупространство плоскость действует равномерно распределенная по площади F нагрузка, то по теории упругости осадка нагруженной площади определяется путем интегрирования выражения для перемещений W , вызванных действием элементарных сосредоточенных сил. Для того, чтобы определить среднюю осадку шпалы, надо решить уравнение:

$$W_T = \frac{\int_0^{a_1} dx \int_0^{b_1} W_{(x, y)} \cdot dy}{a_1 b_1}, \tag{9}$$

где $W_{(x, y)}$ — осадка нагруженной площади,
 a_1 — половина длины балки,
 b_1 — половина ширины балки.

Нами были проделаны все необходимые выкладки и получена формула:

$$\delta = \frac{\omega_T P \sqrt{R}}{C \sqrt{Q} \sqrt{F}}, \tag{10}$$

где δ — горизонтальная составляющая перемещения шпалы в см,
 F — площадь нижней постели шпалы в см²,
 ω_T — коэффициент, зависящий от соотношения сторон $\frac{a}{b}$ и величины угла β ,
 C — постоянная упругости полупространства, в свою очередь определяемая выражением:

$$C = \frac{E}{1 - \mu^2} \text{ кг/см}^2$$

E — модуль деформации грунта кг/см³,
 μ — коэффициент поперечного расширения

Если обозначить отношение длины шпалы к ширине через α , то:

$$\omega_T = \frac{1}{\pi} \left[\ln \frac{(\sqrt{\alpha^2 + \cos^2\beta} + \alpha) (\sqrt{\alpha^2 + \cos^2\beta} + \beta \cos \frac{\alpha}{\cos\beta})}{(\sqrt{\alpha^2 + \cos^2\beta} - \alpha) (\sqrt{\alpha^2 + \cos^2\beta} - \beta \cos \frac{\alpha}{\cos\beta})} - \frac{2}{3} \frac{(x^2 + \cos^2\beta)^{\frac{2}{3}} + (x^3 + \cos^3\beta)}{\alpha \cdot \cos^2\beta} \right] \tag{11}$$

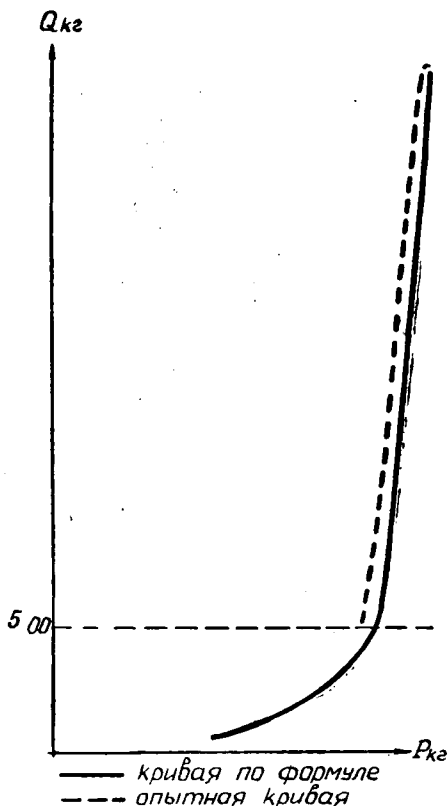


Рис. 7. Зависимость $P = \psi(Q)$ при $\delta = 0,2$ мм.

Так как выражение слишком громоздко и пользоваться им неудобно, нами найдено, что учитывая результаты опытов, его можно заменить приближенным выражением:

$$\omega_1 = \frac{A}{\sqrt{\cos \beta}} \quad (12),$$

где $A \approx 0,3z$,

тогда:

$$\delta = \frac{AP\sqrt{P^2 + Q^2}}{CQ\sqrt{F}} \quad (13)$$

На рис. 5 даны кривые зависимости $\delta = f(P)$, полученные по теоретической формуле при $C = 465 \text{ кг/см}^2$ для трех значений вертикальной нагрузки: $Q = 500 \text{ кг}$, $Q = 2100 \text{ кг}$, $Q = 3000 \text{ кг}$ и на основании опытов для тех же значений. На рис. 7 показана зависимость $P = \psi(Q)$ при $\delta = 0,2$ мм теоретическая и опытная. В том и в другом случае опытные и теоретические кривые достаточно хорошо соответствуют друг другу, что свидетельствует о возможности применения формулы (13) для определения упругости пути в горизонтальной плоскости. Достоинство ее в том, что она позволяет судить о влиянии механических свойств основания пути (C) и раз-

меров шпал (F, α) на упругие деформации пути в продольной плоскости.

Рассматривая связь между Q и P , следует отметить, что в первом приближении при больших значениях Q (примерно $Q > 500 \text{ кг}$) ее можно считать линейной (это совпадает с выводами В. Г. Альбрехта и Л. Е. Савина, а при небольших значениях Q , как видно по теоретической зависимости, она имеет ярко выраженную криволинейность (рис. 7).

Выводы

1. Доказано, что верхнее строение пути обладает значительной упругостью в горизонтальной плоскости и при небольших перемещениях пути упругие деформации преобладают над остаточными.

2. Величина сопротивления шпал сдвигу зависит от многих факторов: расстояния между шпалами, размеров шпал, степени уплотнения засыпки, модуля деформации грунта основания, коэффициента поперечного расширения грунта, величины вертикальной нагрузки на шпалу.

3. Максимальное сопротивление сдвигу шпал узкой колес примерно в 1,5 раза меньше, чем для шпал широкой колес.

4. Полученные нами зависимости позволяют применить их для выполнения необходимых расчетов по установлению величин угона пути и необходимых мер по стабилизации пути.