

**БУДІВНИЦТВО, РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

УДК 625.143

*Даренский А.Н., к.т.н., профессор (УкрГАЗТ)
Витольберг В.Г., ст. преподаватель (УкрГАЗТ)
Бугаец Н.В., ассистент (УкрГАЗТ)*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО
ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ШПАЛ ПРОДОЛЬНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ**

Сопротивления продольным перемещениям шпал в балласте является одним из параметров, определяющим работу пути как под действием нагрузки от подвижного состава, так и под воздействием температурных сил в конструкции бесстыкового пути. От величины этих сопротивлений зависит, в частности длина активной, с точки зрения температурной работы, части плети бесстыкового пути, температурные напряжения в рельсах, перемещения отдельных сечений плети, сопротивляемость бесстыкового пути выбросам.

Впервые материалы по данному вопросу были обобщены М.Т. Членовым [1] в 50 – е годы XX века. На основании личных опытов и анализа результатов работ других исследователей он установил, что для сдвига одиночной нагруженной деревянной шпалы, при отсутствии вибрации, необходимо усилие при песчаном балласте 6 – 7 кН, а при щебеночном 8-10кН и величина сопротивлений зависит от величины смещения.

Более поздними исследованиями ряда авторов [2, 3, 4 и другими] установлено, что большое влияние на сопротивление шпал в балласте оказывает вертикальная нагрузка на шпалу, включая и ее собственный вес. При вибрациях от действия подвижного состава сопротивление может уменьшаться до 0,75, а в отдельных случаях до 0,5 своего статического значения [2].

Сопротивление продольному смещению шпал значительно увеличивается с увеличением времени нахождения балласта в пути. По – видимому это объясняется уплотнением щебня за счет вибрации от подвижного состава, его измельчением и загрязнением. По данным венгерских исследований [5] после пропуска 5млн.т. груза брутто, объемный вес щебеночного балласта стабилизируется и составляет около 1,8 т/м³ (для балласта с фракциями 30-60 мм).

Дальнейшее возрастание объемного веса связано с загрязнением балластного слоя.

В исследованиях бесстыкового пути рассматривается упруго-фрикционные сопротивления шпал продольным перемещениям, причем в качестве зависимостей сопротивлений от величины сдвига x используют, как правило, выражение вида:

$$R_{ux} = a + vx^c . \quad (1)$$

Эта зависимость не сложная, что обеспечивает вычисления, даже при больших сдвигах хорошо описывает опытные кривые. Она обладает достаточной универсальностью, так как при $c = 1$, $a = 0$ получаем закон Гука, а при $v = 0$, $R_x = const$ - закон жесткопластичного тела. Но зависимость (1) имеет и недостатки: она плохо аппроксимирует опытные кривые при малых деформациях, в большинстве случаев параметр c оказывается числом дробным, поэтому приходится решать системы нелинейных алгебраических уравнений с нецелыми показателями что возможно, как правило, численными методами. Кроме того, функция (1) не имеет максимума при $P = P_{max}$, в то время как экспериментальные диаграммы при этот максимум имеют.

Зависимость сопротивлений опор от величины их перемещений, в данном случае зависимость сопротивлений шпал продольным перемещениям $R_{xui} = f(x)$, принято называть упругой характеристикой. При нелинейной зависимости сопротивлений от перемещений различают возрастающую (мягкую) при $c = 0 \div 1$ и затухающую (жесткую) при $c > 1$ характеристику.

Действующие в Украине Правил расчета пути на прочность и устойчивость [6], предполагают определять продольную жесткость шпалы по формуле:

$$c_{ш-б} = c_{ш-б}^0 + A_{ш-б} \cdot Q_{дин}, \quad (2)$$

где $c_{ш-б}^0$ - продольная горизонтальная жесткость рельсового основания, отнесенная к одной шпале без вертикальной нагрузки (Н/мм);

$A_{ш-б}$ - коэффициент, который зависит от качества балласта ($мм^{-1}$);

$Q_{дин}$ - вертикальная динамическая нагрузка на шпалу от рельсов (Н).

В [6] приведены значения параметров $c_{ш-б}^0$ и $A_{ш-б}$ для «слежавшегося щебеночного балласта» и «хорошо уплотненного щебеночного балласта».

Таким образом, Правила [6] предполагают линейную упругую характеристику сопротивлений шпал продольным сдвигам в виде:

$$R_{шх} = c_{ш-б} \cdot x, \quad (3)$$

где $c_{ш-б}$ - жесткость шпалы при продольном сдвиге (Н/мм).

То есть, в формуле (1) принято $a = 0$, $b = c_{x-ш}$, $c = 1$.

Жесткость шпалы при продольном сдвиге $c_{ш-б}$ [6] зависит от вида шпал (деревянные и железобетонные) и состояния балласта.

Для выявления влияния эксплуатационных характеристик путей промышленного железнодорожного транспорта (высокие осевые нагрузки, высокая засоренность пути, гранулометрический состав балласта, который отличается от балласта для магистральных дорог, широкое применение звеньевого пути на железобетонных шпалах) были проведены экспериментальные работы на четырех опытных участках горнодобывающих предприятиях Украины (Центральный и Южный горнообогатительный комбинат, г. Кривой Рог). Участки были подобраны так, что имели одинаковые технические характеристики и различались лишь временем, прошедшим после ремонтов с заменой рельсошпальной решетки. На всех участках был уложен звеньевого пути с рельсами типа Р65, износ рельсов от 2 до 8 мм, шпалы железобетонные типа Ш-1-1 в количестве 180 шт/кН. Промежуточные скрепления типа КБ с подрельсовыми прокладками ЦП – 143 и ЦП – 260 и нашьпальными прокладками типа ЦП – 4. Балласт щебеночный, размеры частиц от 15 до 70 мм. Засоренность балласта на участках изменялась от 10 до 35%. Толщина балласта под шпалами 25-35 см. Все участки однопутные, расположены в прямых, уклоны от 0 до 3%. С момента проведения ремонтов с заменой

БУДІВНИЦТВО, РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

рельсошпальной решетки на участках прошло от 2 до 11 лет, пропущенный тоннаж составлял от 34 до 370 млн. т. брутто (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимости сил сопротивления шпал от величины их продольных перемещений

№ участка	Пропущенный тоннаж (млн.т)	Начальная сила сцепления и трения $R_{ух}^{нач}$ (кН)	Зависимость $R_{ух} = f(x)$ (кН)
1	34	2,61	$2,59 + 3,36 x^{1,545}$
2	92	2.64	$2,59 + 5,70 x^{1,652}$
3	216	2,53	$2,59 + 13,85 x^{1,780}$
4	370	2.57	$2,59 + 16,53 x^{1,970}$

Эксперименты по определению сопротивлений шпал продольным перемещениям проводились на звеньях длиной 12,5 м (23 шпалы) на действующем пути в технологические перерывы в движении поездов.

Для сдвига рельсов были использованы гидравлические разгонные приборы РН – 02, оборудованные манометрами. Перемещения рельсов и шпал фиксировались индикаторами ИЧ -10 с ценой деления 0,01 мм, которые закреплялись на свайках длиной 1м, забитых через балласт в земляное полотно. Схема размещения приборов приведена на рисунке 1. Перемещения рельсов и шпал измерялись в начале и конце звена.

Перед началом эксперимента гайки клеммных и закладных болтов закручивали моментом 150 Нм, гайки стыковых болтов – полностью ослабляли.

Эксперименты проводились в следующей последовательности: после установки разгонных приборов и индикаторов к каждому рельсу прикладывалась нагрузка 2,5 кН (5кН на звено) для выборки возможных люфтов с полной последующей разгрузкой. Затем нагрузка прикладывалась ступенчато с интервалом 10кН на рельс (20 кН на звено), снимались отсчеты по индикаторам перемещений до достижения уровня нагрузки 230 кН на один рельс, что является конструктивным пределом разгонного прибора. Таким образом удалось достичь уровня средней нагрузки на одну шпалу 10 кН, что перекрывало рабочий диапазон реальных нагрузок в пути

при екстремном торможении состава из 16 4-осных груженых думпкаров ВС – 85, локомотив 2 ТЭ – 3 скорость движения - 40 км/ч. Тормозные силы были рассчитаны по методике изложенной в [6].

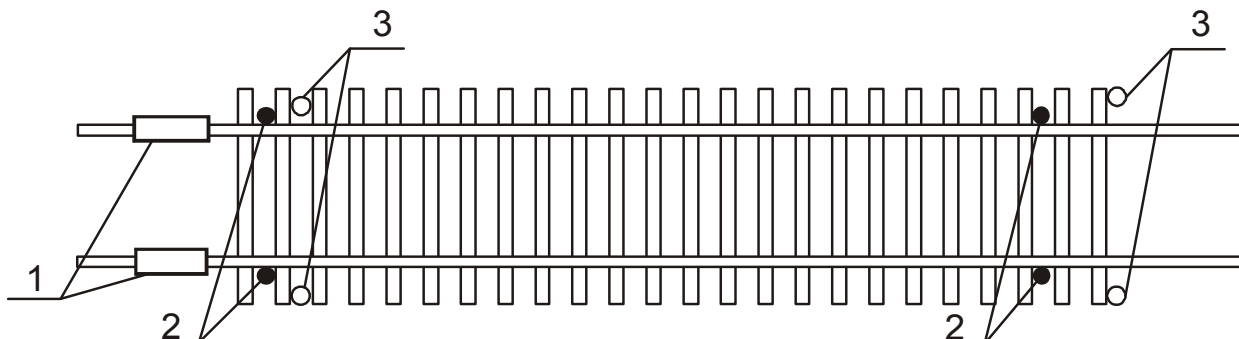


Рисунок 1 – Схема размещения приборов на опытном звене: 1 – разгоночные приборы РН-02; 2 – индикаторы перемещения рельсов; 3 – индикаторы перемещений шпал

Расположение индикаторов перемещений в начале и конце звена позволило учитывать упругие деформации рельсов при действии продольных сил:

$$\Delta l = \frac{P \cdot l_{зв}}{E \cdot F}, \quad (4)$$

где P - продольная сила, создаваемая разгоночным прибором (Н);

$l_{зв}$ - длина рельсов опытного звена (12,5 м);

E - модуль упругости рельсовой стали ($2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м²);

F - площадь поперечного сечения рельсов (м²).

Такие упругие деформации достигали значений 1,65мм при максимальной нагрузке на рельс.

К дальнейшей обработке принимались средние для всего звена значения перемещений рельсов и шпал.

Измерение перемещений рельсов и шпал относительно неподвижных сваек позволило определять, кроме того, перемещения в узлах скреплений. Это дало возможность проверки в условиях действующего пути параметров упругих характеристик промежуточных скреплений КБ, которые были

получены ранее в лабораторных условиях [8]. Полученные в полевых условиях упругие характеристики креплений КБ, имеют хорошую сходимость с данными, приведенными в [8]. Различие значений не превышало 3-5%.

На рисунке 2 приведены, в качестве примера для опытного участка №3 (таблица 1) графики зависимостей между продольными нагрузками и перемещениями рельсов, шпал и перемещениями рельсов относительно шпал (за счет деформаций в узле креплений):

$$X_c = X_p - X_{ш},$$

где X_c – перемещения рельса относительно шпал;

X_p – перемещения рельса относительно неподвижной свайки;

$X_{ш}$ – перемещения шпалы относительно неподвижной свайки.

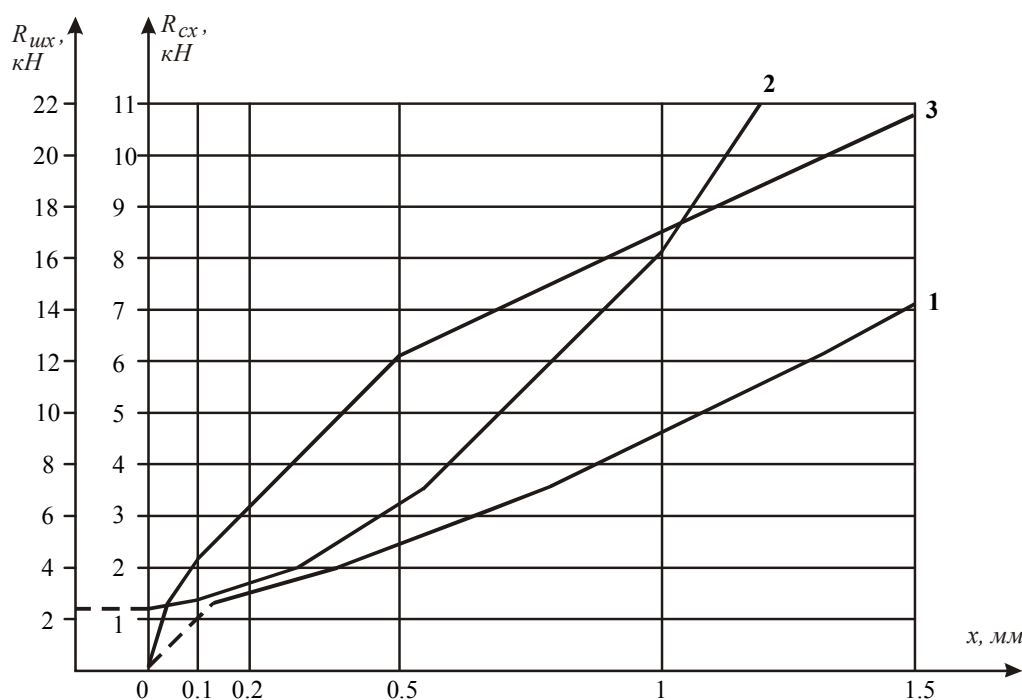


Рисунок 2 – Упругие характеристики опытного звена, участок №3 (пропущенный тоннаж 216 млн.т): 1 – перемещения рельсов относительно неподвижной свайки; 2 – перемещение шпалы относительно неподвижной свайки; 3 – перемещение рельсов относительно шпалы

Нагрузка на шпалу $R_{ш}$ (рисунок 1) равна сумме нагрузок на два узла скрепления R_c . Эти нагрузки принимались средними для всего опытного звена:

$$R_{cx} = \frac{P}{N_{ш}},$$

где P – продольная сила, создаваемая одним разгоночным прибором (кН);

$N_{ш}$ – число шпал на звене (23шт).

Сравнительный анализ графиков на рисунке 2 показывает, что сопротивление продольным перемещениям шпал в балласте, в отличие от сопротивлений продольным перемещениям скреплений, и мест затухающую («жесткую») характеристику, с увеличением перемещений силы сопротивлений возрастают. До уровня нагрузки 2,53 кН на шпалу ее перемещений отмечено не было.

На рисунке 3 приведены графики зависимостей сопротивлений шпал продольным перемещениям (сдвигам), которые были получены на основании данных экспериментов на четырех опытных участках (таблица 1).

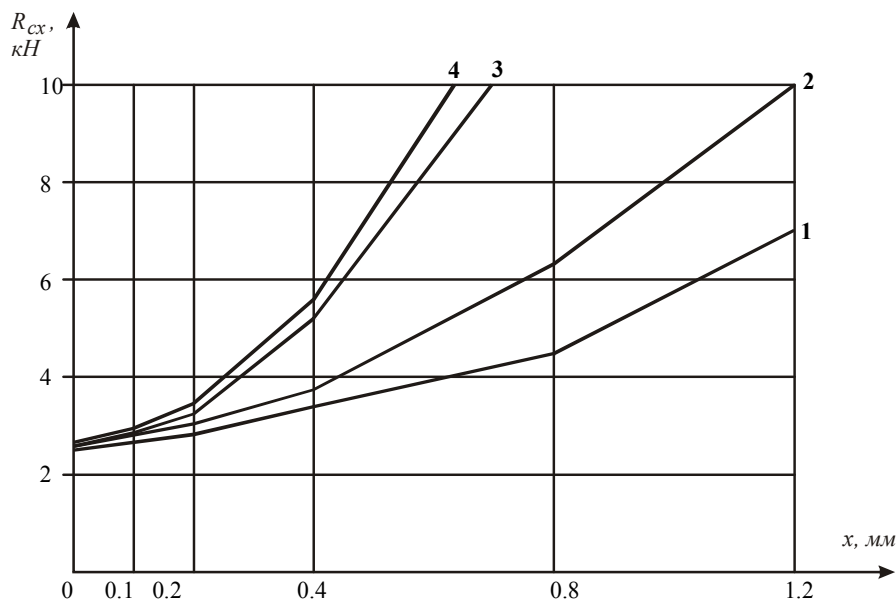


Рисунок 3 – Зависимости сопротивлений шпал продольным перемещениям (сдвигам) : 1 – участок 1 (пропущенный тоннаж 34 млн.т); 2 –участок 2 (тоннаж 92 млн.т), 3 – участок 3 (тоннаж 216 млн.т); 4 – участок 4 (тоннаж 370 млн . т)

Характер зависимостей на всех опытных участках одинаков. Зависимости между силами сопротивлений и перемещениями не линейны, упругая характеристика затухающая («жесткая»). На всех участках перемещения шпал начинались после достижения нагрузки на них от 2,53 до 2,64 кН (таблица 1). С ростом пропущенного по участкам тоннажа сопротивления перемещениям шпал (сдвигам) возрастают.

Можно предположить, что продольные перемещения шпал начинаются после преодоления сил сцепления и трения шпал в балласте. Дальнейшее увеличение сопротивления шпал перемещениям происходит за счет фрикционно – упругого сжатия балласта в шпальных ящиках.

Принимая начальные сопротивления шпал перемещениям средним для четырех участков (5,59 кН) и используя в качестве аппроксимирующей функцию вида (1), были получены зависимости сил сопротивлений шпал продольным перемещениям (сдвигам) которые приведены в таблице 1.

Можно предположить, что начальные силы сцепления и трения зависят от вертикальной нагрузки на шпалу R_y . Для незагруженного подвижным составом пути вертикальная нагрузка R_y представляет собой вес самой шпалы, вес комплектов скреплений и вес рельсов, приходящийся на эту шпалу. Для рассматриваемой конструкции это значения составляет 358,8 кг или величины $R_y = 3,59$ кН. Тогда можно оценить коэффициент сцепления и трения железобетонных шпал по балласту

$$f = \frac{R_{ух}^{нач}}{R_y} = \frac{2,59}{3,59} = 0,72.$$

Общий вид зависимости сопротивлений шпал $R_{ух}$ от величины продольных перемещений может иметь вид:

$$R_{ух} = fR_y + vx^c, \text{ (кН)}, \quad (5)$$

где v и c – эмпирические параметры, зависящие от величины пропущенного по участкам тоннажа.

Учитывая, что получения зависимости сопротивлений шпал $R_{ух}$ от величины продольных перемещений не линейны, жесткость шпал при их продольных перемещениях изменяется и в общем случае может быть определена как:

$$C_{ух} = \frac{dR_{ух}}{dx} . \quad (6)$$

Используя принятый вид аналитического выражения (5) упругой характеристики $R_{ух}$ можно определить:

$$C_{ух} = vcx^{(e-1)} . \quad (7)$$

Полученные таким образом зависимости продольной жесткости железобетонных шпал $C_{ух}$ от величины их перемещений (сдвигов) для условий промтранспорта приведены в таблице 2 и графически на рисунке 4.

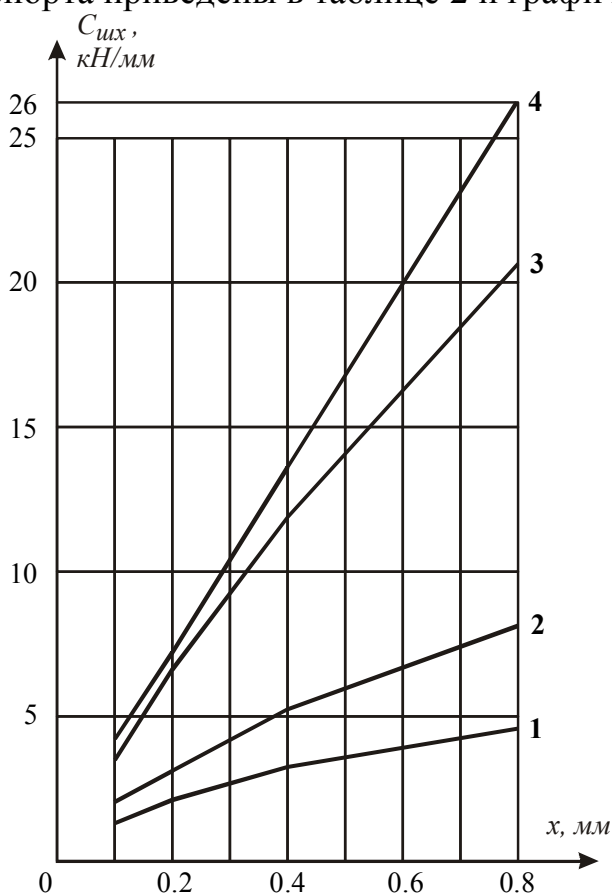


Рисунок 4 – Зависимости продольной жесткости шпал $C_{ух}$ от величины их перемещений: 1 – участок 1 (Т = 34 млн. т), 2 – участок 2 (Т = 92млн.т), 3 – участок 3 (Т = 216млн.т), 4 – участок 4 (Т = 370 млн.т)

Таблица 2 – Жесткость железобетонных шпал при продольных перемещениях

№ участка	Пропущенный тоннаж (млн.т)	Зависимость $C_{xш} = f(x)$ (кН/мм)	Расчетные значения $C_{шx}^{расч}$ (кН/мм)
1	34	$5,19 x^{0,545}$	5,32
2	92	$9,40 x^{0,650}$	7,89
3	216	$24,65 x^{0,780}$	14,04
4	370	$32,56 x^{0,97}$	15,23

В практических расчетах [6] принято считать продольную жесткость железобетонных шпал $C_{шx}$ величиной постоянной, заменяя «мягкую» или «жесткую» упругую характеристику линейной на рабочем участке методом хорд или методом касательных [8]. Используя метод хорд, зависимости $R_{xш} = f(x)$ и принимая в качестве рабочего диапазон нагрузок на шпалу от 2,59 до 13,4 кН можно получить расчетные значения $C_{шx}^{расч}$ для участков с различной грузонапряженностью (таблица 2). Минимальная граница рабочего диапазона 2,59 кН принята по условию преодоления сил начального сцепления и трения шпал в балласте, максимальная – из условия среднего статистического давления на шпалу в реальных условиях по данным [9].

На рисунке 5 приведены полученный таким образом график изменения расчетных значений жесткости железобетонных шпал при продольных перемещениях в зависимости от пропущенного по участкам тоннажа. Полученную зависимость можно аппроксимировать выражением вида:

$$C_{шx}^{расч} = 0,743 \cdot T^{0,53} \text{ . (кН/мм).} \quad (8)$$

Зависимость можно использовать при пропущенном тоннаже более 35 млн.т. При меньших значениях тоннажа вопрос требует дальнейших исследований.

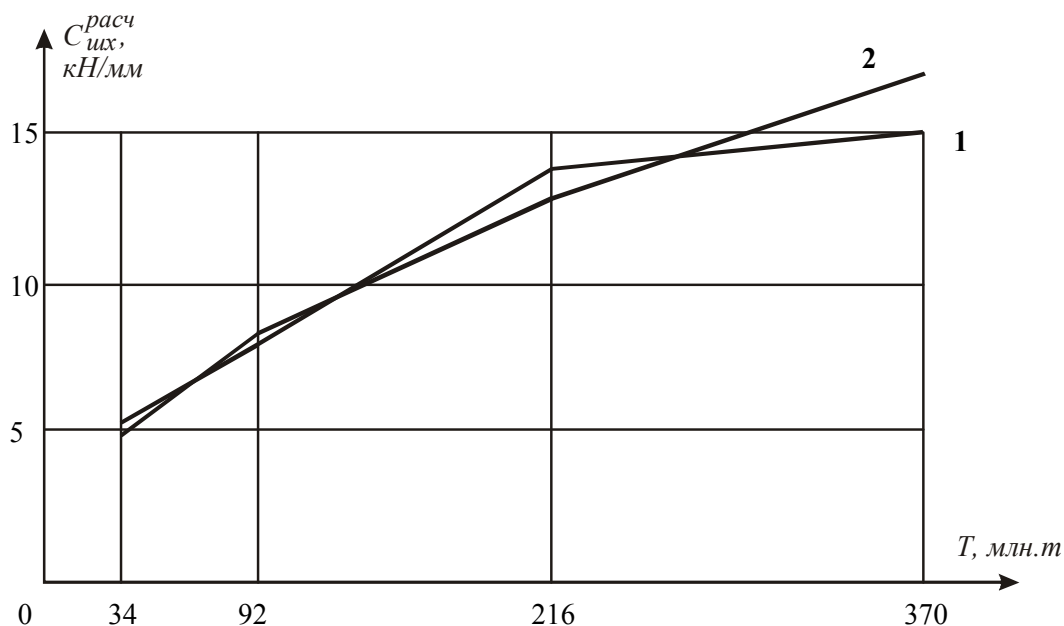


Рисунок 5 – Изменение продольной жесткости железобетонных шпал в зависимости от пропущенного по участкам тоннажа: 1 – расчетные значения $C_{шх}$, 2 – эмпирическая кривая

Для проверки предположений о характере зависимости (5) сопротивлений шпал $R_{шх}$ от величины вертикальных нагрузок R_y и продольных перемещений x были проведены дополнительные экспериментальные работы. На участке № 3 (пропущенный тоннаж 216 млн.т) было выбрано звено с рельсами нестандартной длины - 6,15 и 6,2 м на 12 шпалах. На этом звене были выполнены экспериментальные работы по определению перемещений шпал с использованием методики, изложенной выше. Было проведено три серии измерений. Вначале измерялись перемещения шпал нагруженного звена, 2 серия – звено пригружалось одной тележкой порожнего думпкара ВС – 85, 3 серия – вертикальная нагрузка создавалась одной тележкой груженого думпкара ВС – 85. Перед проведением 2 и 3 серий осевые нагрузки думпкара определялись на вагонных весах обогатительной фабрики предприятия (таблица 3).

Таблица 3 – Зависимости сил продольных сопротивлений загруженных шпал от величины их перемещений

Серия измерений	Осевые нагрузки тележки (т)	Вертикальная нагрузка на шпалу с учетом веса решетки R_y (кН)	Начальные силы сцепления и трения (кН)	Зависимость $R_{xui} = f(x)$ (кН)	Коэффициент сцепления и трения f
1	$P_1 = 0$ $P_2 = 0$	3,59	2,59	$2,59 + 13,85 x^{1,78}$	0,71
2	$P_1 = 8,75$ $P_2 = 8,75$	18,17	14,17	$14,17 + 13,82 x^{1,81}$	0,78
3	$P_1 = 28,700$ $P_2 = 28,300$	51,09	42,40	$42,4 + 13,85 x^{1,80}$	0,83

Схема загрузки звена с рельсовыми рубками тележками порожнего и груженого вагонов приведены на рисунке 6. Здесь приведены также расстояния от осей тележки до оси каждой шпалы и расстояния значения и параметры d_i , которые позволяют определить долю осевой нагрузки, приходящейся на шпалу [6]:

$$R_{yi} = P_{oc} \cdot d_i;$$

$$d_i = \frac{k \ell_u}{2} \sum \eta_i; \quad (9)$$

$$\eta_i = e^{-kx_i} (wskx_i + \sin kx_i),$$

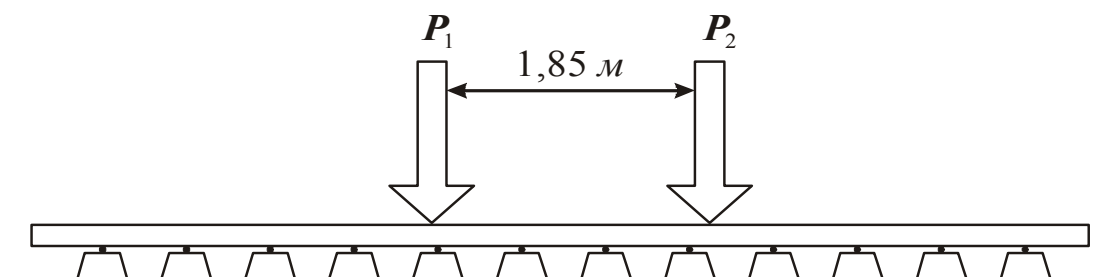
где k – коэффициент относительной жесткости рельса и основания (m^{-1});

ℓ_u – расстояния между осями шпал (м);

η_i – ординаты линии влияния поперечных сил.

БУДІВНИЦТВО, РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

К дальнейшим расчетам принимались средние нагрузки на каждую шпалу от тележек вагона. Общая величина вертикальной силы R_y определялась с учетом веса элементов рельсошпальной решетки.



Номер шпалы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Расстояния от шпалы до оси (м)	P_1	2,2	1,65	1,1	0,55	0	0,55	1,1	1,65	2,2	-	-	-
	P_2	-	-	-	2,4	1,85	1,3	0,75	0,2	0,35	0,9	1,45	2,0
$\frac{kl_{ш}}{2} \sum \eta_i$		-0,01	0,02	0,08	0,23	0,36	0,31	0,28	0,34	0,27	0,13	0,03	-0,01

Рисунок 6 – Схема загрузки рельсового звена тележкой думпкара ВС – 85

Результаты проведенных измерений перемещений шпал приведены графически на рисунке 7. Характер полученных зависимостей сопротивлений шпал продольным перемещениям соответствует сделанному ранее предположению формула (5).

Полученные на основании статистической обработки зависимости величин продольных сопротивлений незагруженных и загруженных шпал от величин их перемещений приведены в таблице 3.

Полученные данные подтверждают предположение о характере зависимости сил сопротивлений шпал от их перемещений формула (5). Вторые слагаемые в формулах $R_{xiii} = f(x)$ практически идентичны, различие не превышает 3-5%. С ростом вертикальных нагрузок на шпалы коэффициент сцепления и трения (первое слагаемое формула 5) несколько увеличивается.

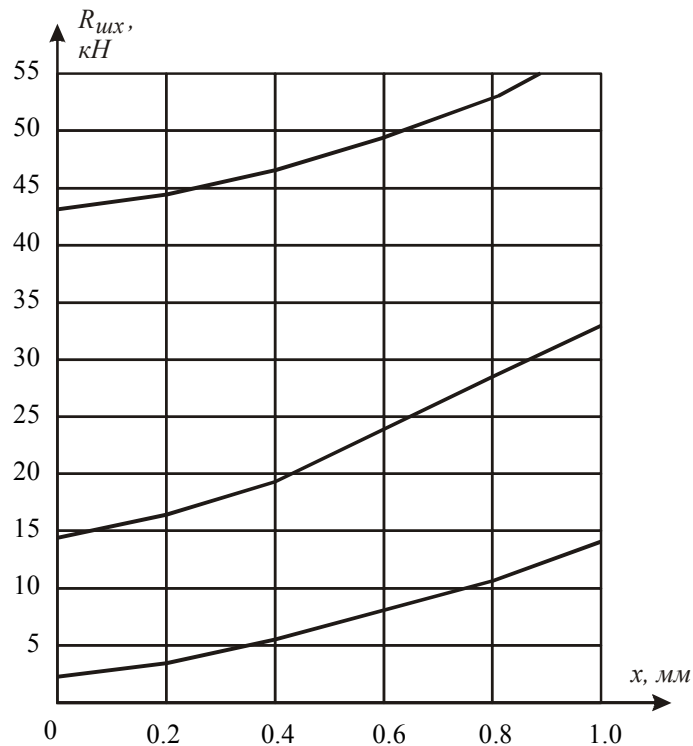


Рисунок 7 – Залежності опорів шпал продольним переміщенням:
1 – $R_y = 3,59$ кН (незагруженне звено); 2 – $R_y = 18,17$ кН (порожній думпкар ВС – 85), 3 – $R_y = 51,09$ кН (завантажений думпкар ВС – 85)

Висновки:

1. Залежності між силами продольних опорів залізобетонних шпал від їх переміщень не лінійні і, в відмінність від пружних характеристик кріплення, мають «жорстку» характеристику.
2. Продольні сили опорів шпал несуть фрикційно – пружний характер. На формування цих сил велике впливає вертикальні навантаження на шпалы. Частка фрикційних складових в загальних силах опорів продольним переміщенням може досягати 60-75 %. З збільшенням вертикальної навантаження на шпалы коефіцієнт тертя і сцеплення шпал в балласті декілька зростає.
3. З ростом пропущеного по ділянках вагона, по мірі ущільнення, дроблення і забруднення балласту, сили опорів шпал продольним переміщенням зростають. Так, при зростанні вагона з 34 до 370 т, опір продольним переміщенням незавантажених рухомих складових шпал збільшується більше ніж в два рази (рисунок 3).

4. Для линеаризации упругих характеристик продольных перемещений шпал предпочтительным является метод хорд. Расчетные значения жесткости шпал при их продольных перемещениях увеличиваются при изменении тоннажа с 34 до 370 млн.т. более чем в три раза.

5. Влияние вибраций, динамических нагрузок от промышленного подвижного состава на силы сопротивления шпал продольным перемещениям требует дальнейшего изучения.

Список литературы

1. Членов М.Т. Длинные рельсы. – М., Трансжелдориздат, 1950. – 203с.
2. Коган А.Я. Продольные силы в железнодорожном пути. – Тр. ВНИИЖТ, вып. 332, М., Транспорт, 1967. –166 с.
3. Клинов С.И. Метод определения погонного сопротивления по характеру продольных перемещений в бесстыковой рельсовой плети. – Тр. МИИТ, М., 1969. – Вып. 318. – С. 136 – 144.
4. Боченков М.С., Грищенко В.А. Определение стыковых и погонных сопротивлений температурным деформациям рельсовых плетей. – В кн.: - железнодорожный путь на грузонапряженных участках. – Новосибирск, 1976. – С. 51-56.
5. Влияние эксплуатации и работ по содержанию бесстыкового пути на поперечное сопротивление балластного слоя / Бюллетень технико-экономической информации / ЦНИИТЭИ МПС. – М., 1972. – №3. – С. 55-58.
6. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість / Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. – К. : Транспорт України, 2006. – 168 с.
7. Альбрехт В.Г., Коган А.Я., Угон железнодорожного пути и борьба с ним. М. Транспорт, 1996. – 160 с.
8. Даренский А.Н., Витольберг В.Г., Экспериментальное определение сопротивления креплений КБ и КПП-5 перемещениям рельсов в продольной плоскости // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2008. – Вип. 15. – С. 112-124.
9. Иванова Л.И., Карпущенко Н.И. Экспериментальные исследования связей рельсов с основанием // Труды НИИЖТа, Новосибирск. – 1971. – Вып. 129.– С. 51 – 60.