

ЭФФЕКТ ОБЖАТИЯ НАГРУЖАЕМОГО РЕЛЬСА ПОЛУШПАЛАМИ L-ОБРАЗНОГО СЕЧЕНИЯ*

Канд. техн. наук, доц. СУХОДОЕВ В. Н., инженеры ТРУШКИНА А. В., ЛАПЕНОК Н. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: shura.valerevna.65@mail.ru

Рассмотрена проблема введения в практику фундаментостроения понятия и закономерностей «эффекта обжатия внецентренно нагружаемого рельса полушпалами L-образного сечения» на примере ленточного трамвайного пути, преимущества которому обеспечивают вдвоенные внецентренно нагружаемые фундаменты – полушпалы. Полушпала L-образного сечения – это рычаг L-образной формы, преобразующий в горизонтальные вертикальную нагрузку и сжимаемость основания. Для создания положительного эффекта использовали свойства двух полушпал, вдвоенных, навстречу ориентированных, внецентренно нагружаемых. Обжатие создает горизонтальная сила, которая проявляется как составляющая вертикальной нагрузки на перемещениях, функционально зависящих от сжимаемости основания. Эти зависимости показывают, что прочностные и деформационные свойства грунтового основания вертикального направления используются для создания горизонтальных свойств вертикального плеча полушпала.

Изучена механика эффекта обжатия нагружаемого рельса полушпалами L-образного сечения. Установлено, что эффект обжатия рельса – это результат сжатия в двух взаимно перпендикулярных направлениях (обжатие) нагрузкой от колеса рельса с прокладками, если расположить их внутри шпала-механизма на упругом основании.

Методика расчета параметров эффекта обжатия рельса является инструментом для решения прикладных задач ленточных трамвайных путей. Результаты предлагаемого расчета эффекта обжатия рельса в упругой постановке задачи и при неизменных размерах сечения рельсовой нити и введении поправочных коэффициентов соотношения с новыми исходными данными по нагрузке рекомендуются к практическому применению как достоверные значения.

Выявлена пропорциональная зависимость эффекта обжатия рельса по прочности от величины равнодействующей реактивного давления, разности эксцентриситетов этой равнодействующей и нагрузки и обратно пропорциональной зависимости от расстояния по вертикали между вектором силы обжатия и положением связи вдвоенных фундаментов. Сила обжатия рельса увеличится, если уменьшить высоту фундаментов при неизменной ширине и давлении на основание или если увеличить ординату расположения связи между ними при неизменной высоте фундамента.

Ключевые слова: эффект обжатия рельса, ленточный трамвайный путь, полушпала, рельс, шпала-механизм.

Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.

SQUEEZING EFFECT OF RAIL LOADED BY SEMI-SLEEPERS HAVING L-SHAPED CROSS-SECTION

SUKHODOEV V. N., TRUSHKINA A. V., LAPIONOK N. V.

Belarusian National Technical University

The paper considers a problem on introduction of a conception and regularities of “squeezing effect of a rail loaded non centrally by semi-sleepers having L-shaped cross-section” exemplified by belt-type tramway. Its advantages are ensured by doubled non centrally loaded foundations these are semi-sleepers. Semi-sleeper of L-shape cross-section is a lever of L-shape form, transforming a vertical load into horizontal ones and foundation squeezing. Properties of two semi-sleepers being doubled, orientated to each other and non centrally loaded have been used in order to create a positive effect. A horizontal force creates squeezing and it is revealed as a component of a vertical load during displacements which functionally depend on foundation squeezing. These dependences demonstrate that strength and deformation properties of earth foundation of vertical direction are used for creation of horizontal properties of sleeper vertical shoulder.

The paper studies mechanics pertaining to a squeezing effect of a rail loaded by semi-sleepers having L-shaped cross-section. It has been established that the rail squeezing effect results from squeezing process executed in two mutually perpendicular directions (reduction of cross-sectional area) by load of a rail wheel with spacers if they are set inside of a sleeper-mechanism on an elastic foundation.

Methodology for calculation of parameters on the rail reduction effect is considered as a tool for handling of applied problems on belt-type tramways. Results of the proposed rail reduction effect in problem statement for elastic conditions, with unchanged cross-sectional dimension of a rail line and introduction of correction ratio coefficients due to new initial load data have recommended for practical application as reliable values.

* Печатается в порядке обсуждения.

The paper has revealed a proportional dependence of the rail reduction effect according to strength on the resultant value of reaction pressure, eccentricity difference of the resultant and load and inverse proportion due to distance along vertical line between reduction force vector and connection position of doubled foundations. Rail squeezing force will be increased if we reduce foundation height while having unchanged width and foundation pressure or if we increase an ordinate of the connection arrangement between them while having unchanged foundation height.

Keywords: rail squeezing effect, belt-type tramway, semi-sleeper, rail, sleeper-mechanism.

Fig. 2. Tab. 2. Ref.: 10 titles.

Объект изучения и исследования – эффект обжатия рельса (ЭОР), внецентренно нагружаемого, с прокладками и его осадки через две полушпалы L -образного сечения. ЭОР в системе «основание – фундамент» в силу своей новизны [1] является недостаточно изученным. В технической литературе отсутствует описание ЭОР, нет его параметров, расчетов по прочности и перемещениям, кроме патентов и авторских статей с описанием идеи ЭОР и преимуществ его применения в конструкциях трамвайных путей.

Если шарнирно соединить две полушпалы (рис. 1а) и между ними уложить рельс (рис. 1б), можно строить ленточный трамвайный путь (ЛТП) с продольным расположением шпал. Две полушпалы образуют шпалу-механизм, а она с рельсом – рельсовую нить. Рельсовый путь строят на двух рельсовых нитях, сложенных из слоев без жестких связей. Участок цельной рельсовой нити образуется обжатием рельса с прокладками нагрузкой в вертикальной плоскости и составляющей нагрузки в горизонтальной плоскости. Шпала-механизм предназначена, кроме функций фундамента, сжимать полушпалами нагружаемый рельс с прокладками и отпускать их по мере продвижения нагрузки. Такое функциональное назначение лежит в основе термина «шпала-механизм».

Особенность исследований заключается в выявлении и разработке закономерностей эффекта обжатия рельса шпалой-механизмом, уложенной на упругом основании. Наличие упругих деформаций – обязательное условие действия ЭОР, без них сила обжатия превращается в реакцию неподвижной опоры. Численно жесткости рельса и шпалы-механизма во много раз превышают жесткость грунтового основания, поэтому их собственными деформациями в расчетах ЭОР пренебрегали.

Существенным являются использование и учет совместной работы нагружаемой рель-

совой нити и сопротивления окружающего ее грунта, что входит как важная часть в общую проблему проектирования, устройства и строительства трамвайных путей оптимальной конструкции. Методика изучения и исследования ЭОР состоит в использовании научно-технического направления в научно-исследовательской работе. На основе решения технических задач, относящихся к устройству ленточных рельсовых путей, установить неизвестные ранее закономерности преобразований сдвоенными полушпалами, расположенными на деформируемом основании, в горизонтальных вертикальных сил и перемещений. Методика обусловлена сложностью решения технических задач, не имеющих в общем случае осевой симметрии. Отсутствие осевой симметрии создается специально внецентренной загрузкой полушпал с целью получения положительного эффекта при строительстве и эксплуатации трамвайных путей.

При выполнении исследований были поставлены, изучены и решены следующие технические задачи практической направленности:

1) изучить, рассчитать и описать механику эффекта обжатия внецентренно нагружаемого рельса с прокладками (далее – рельса) составляющей нагрузки через полушпалы L -образного сечения;

2) скрепление рельса со шпалой с автоматическим регулированием силы скрепления на меняющиеся условия в эксплуатационный период. Такое объемное, не точечное, скрепление передаст и перераспределит энергию вибрирующего рельса на железобетонную шпалу-механизм и далее на основания из балласта и грунта. Разнообразие грунтовых условий и соответственно их параметров следует в процессе проектирования выравнять до уровня равных прочности и жесткости подбором составляющих конструкцию балласта и основания, исключением упругопластических деформаций при обкатке пути;

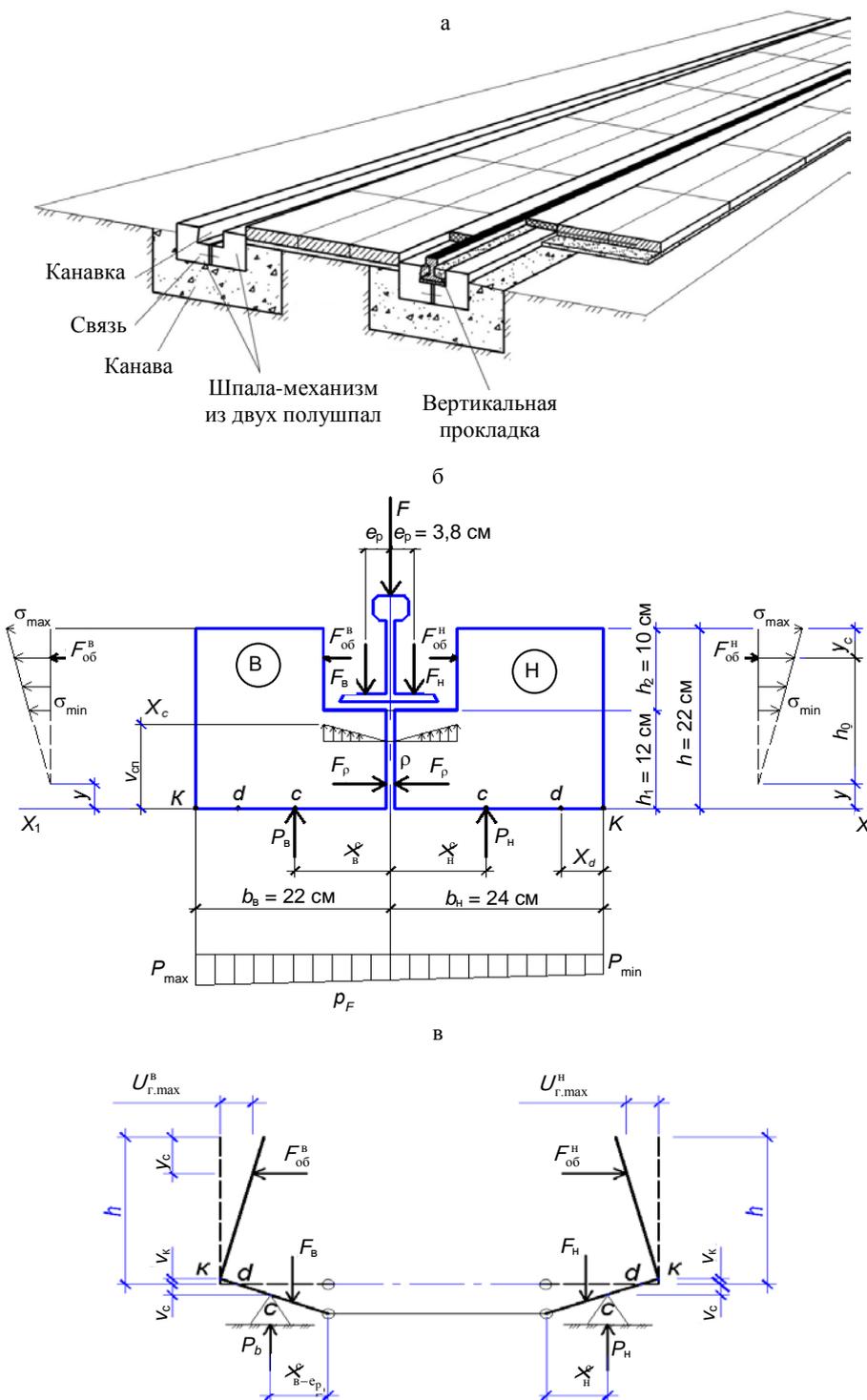


Рис. 1. Эффект обжатия и конструкция ленточного трамвайного пути:
 а – ленточный трамвайный путь (фрагмент); б – расчетная схема ЭОР по прочности, $\Sigma M_p = 0$;
 в – то же по перемещениям $U_{г}, v_c = y_{max}, v_d = 0$

3) обеспечить устойчивое положение рельса и резкое снижение уровня шума, размещая рельс внутри шпалы-механизма, создавая

экран из полушпал, увеличивая его массу в результате обжатия этой железобетонной шпалой;

4) построить ленточный рельсовый путь не условно ленточным путем, а состоящим из слоев в виде лент постоянного поперечного сечения, отсюда название ЛТП.

ЭОР по прочности определяется горизонтальными силами встречного взаимодействия (σ_i), распределенными на вертикальных гранях полушпалы и рельса (рис. 1б) по треугольным эпюрам. (Подтверждается результатами компьютерного расчета рельсовой нити методом конечных элементов.) Расчетной считается равнодействующая этих сил $F_{об}$. Под нагрузкой на рельс она действует как сила обжатия $F_{об}$ с полюсом u_c в центре тяжести треугольной эпюры напряжений. По горизонтали вдоль рельсовой нити зона влияния силы $F_{об}$ определяется длиной $2l'_o$ участка по эпюре в виде треугольника сжатых лент основания, шпалы-механизма, рельса, симметрично располагаемых по обе стороны от колеса. Аналог – эпюра распределения прогибов балки на упругом основании [2] по параболе, состоящей практически из двух треугольников, под действием сосредоточенной силы.

Упругое основание оценивается величиной модуля упругости E , разной у различных материалов. Уменьшение E сопровождается увеличением сжимаемости основания и крена полушпал. Этот параметр расширяет диапазон возможностей ЭОР по перемещениям. Из практики строительства трамвайных путей на рельсошпальной решетке известно, что величина горизонтальной опрокидывающей рельсов силы F_r не превышает 25 % вертикальной нагрузки F . Поэтому для устойчивости ЛТП, удержания рельса в железобетонной шпале-механизме от опрокидывания, гашения вибрации и шума от проходящего поезда проектировали $F_{об} \leq 0,25F$.

Для количественной оценки ЭОР нужен способ расчета силы обжатия по прочности и перемещениям. Определенность состояния слоистой конструкции рельсовой нити под колесом на сжатом расчетном участке $2l'_o$ и ее параметров образуется в результате обжатия рельса с вертикальными прокладками силой $F_{об}$. Характеризуется выполнением условий равновесия, условий совместимости перемещений всех элементов конструкции рельсовой нити, условий взаимодействия конструкции со

средой. Эта определенность обосновывает использование расчетной схемы и способ расчета рельсовой нити как балки на упругом основании в сочетании с предлагаемым способом расчета ЭОР.

Количественная оценка эффекта обжатия рельса с прокладками разработана на примере расчетов ЛТП. Базовый вариант – трамвайный путь на рельсошпальной решетке (прерывистый фундамент). С ним целесообразно сравнивать эффективность ЛТП (ленточный фундамент), используя его расчетные данные и размеры площадей подошв, передающих нагрузку на основание с последующей корректировкой по мере научной разработки ЭОР и практической необходимости. Например, суммарная опорная площадь подошвы шпал одного километра пути на рельсошпальной решетке, построенного из шпал длиной $l_{ш} = 2,7$ м, шириной $b_{ш} = 0,20$ м при количестве 1680, равна $A_{ш} = 2,7 \cdot 0,2 \cdot 1680 = 907,2$ м². Из них на один метр пути приходится 0,907 м² и под одну рельсовую нить – 0,46 м² при ширине $B = 0,46$ м = 46 см. Если принять шпалу-механизм высотой $h = 22$ см, потребуется расход бетона, соизмеримый с расходом бетона трамвайного пути на рельсошпальной решетке.

Крен рельса к оси пути создаст внецентренное нагружение рельсовой нити, для чего проектируется шпала-механизм из полушпал разной ширины: $b_b = 22$ см, $b_n = 24$ см. Отсюда как вариант [3] принимаем для расчета и анализа устанавливаемых закономерностей ЭОР размеры шпалы-механизма под трамвайный путь по рис. 1б, где упругие прокладки по трем граням рельса условно не обозначены.

Расчетные данные пути на рельсошпальной решетке: допускаемое давление на балласт под шпалой $R_1 = 0,15–0,30$ МПа; допустимое напряжение в основании балласта $R = 0,25–0,60$ МПа. Для балласта использовали щебень как имеющий стабильные деформационные свойства. Модуль упругости щебня $E_{щ} = 100–200$ МПа, его зимний модуль упругости $E_{y,z} = 200$ МПа. В процессе эксплуатации балласт уплотнялся. Целесообразно считать упругим балласт с величиной модуля упругости $E_o = 200$ МПа. Соответственно упругими считаются определенные с его применением сжимае-

мость основания, осадки и перемещения полупшпал и рельсовой нити.

Грунт, окружающий шпалу-механизм, рассматривается как упругая, линейно-деформируемая среда, характеризуемая коэффициентом постели K_0 или приведенным коэффициентом постели $K = K_0 b$. При расчете ЛТП по несущей способности основания для выявления закономерностей ЭОР использовали рекомендуемые [2] коэффициенты постели, равные 150 и 200 МН/м, которые характеризуют практически упругое основание. Формируются в результате многократной загрузки основания ленточного пути расчетной нагрузкой при положительной и отрицательной температуре. Соответственно при $B = 0,46$ м приведенный коэффициент постели балластного слоя $K = 150 \cdot 10^6 \cdot 0,46 = 69$ МПа и $K = 200 \cdot 10^6 \cdot 0,46 = 92$ МПа.

Осовой момент инерции рельса Р43 $I_x = 1489$ см⁴, момент сопротивления $W_x = 208$ см³, ордината центра тяжести $Y_p^c = 6,86$ см и площадь сечения $A_p = 55,7$ см². Модуль упругости стали $E_c = 206$ ГПа. Жесткость рельса Р43 $E_p J_p = 2,98 \cdot 10^6$ Н·м². Начальный модуль упругости бетона $E_6 = 23-40$ ГПа, для бетона класса С25/30 $E_6 = 32,5$ ГПа [2].

Использовали две прокладки 8×7 см из прессованной [4] резины ($E_{рез} = 8$ ГПа; $R_2 = 10-12$ МПа), располагаемые по сторонам шейки рельса. Их делают из того же материала, что и горизонтальные прокладки под подошвой железнодорожного рельса, где через них передается в 3–4 раза большая нагрузка, а потому гарантированы в ЛТП их прочность и жесткость. Расчет не требуется.

Задача. Определить геометрические характеристики и жесткость поперечного сечения рельсовой нити с рельсом Р43, шпалой-механизмом, состоящей из двух полупшпал [4] шириной $b_b = 22$ см и $b_n = 24$ см, высотой $h = 22$ см (рис. 1б). Площадь сечения за вычетом площади канавки $A = 862$ см².

Решение. Шпала-механизм. Ордината центра тяжести сечения относительно оси X_1 , расположенной на ее подошве, $y_6 = (46 \cdot 22 \cdot 11 - 15 \cdot 10 \cdot 17)/(46 \cdot 22 - 15 \cdot 10) = 8582/862 = 9,96$ см. Осовой момент инерции ее относительно центральной оси X_6 с ординатой y_6 : $I_{x6} = 46 \cdot 22^3/12 + 46 \cdot 22 \cdot (11 - 9,96)^2 -$

$-(15 \cdot 10^3/12 + 15 \cdot 10 \cdot (17 - 9,96)^2) = 33224$ см⁴. Жесткость из бетона класса С25/30: $E_6 I_{x6} = E_{ш} J_{ш} = 32,5 \cdot 10^9 \cdot 33224 \cdot 10^{-8} = 10,80 \cdot 10^6$ Н·м².

Рельсовая нить. Сечение рельсовой нити, составленной из слоев разных материалов (железобетонной шпалы-механизма, стального рельса, упругих прокладок), но обжатое и поэтому практически цельное, приводится к параметрам веса бетона ординаты центра тяжести (центр масс) составной рельсовой нити относительно оси X_1 (рис. 1б) с учетом объемного веса составляющих сечение слоев:

$$y_{сн} = (862 \cdot 9,96 \cdot 2,5 + 55,7 \cdot 19,86 \cdot 7,85 + 14 \cdot 8 \cdot 18 \cdot 1,0)/(862 \cdot 2,5 + 55,7 \cdot 7,85 + 14 \cdot 10 \cdot 1,0) = 32,16 \cdot 10^6/2,732 \cdot 10^6 = 11,76$$
 см.

Осовой момент инерции сечения составной рельсовой нити относительно центральной оси X_c :

$$I_{xc} = 46 \cdot 22^3/12 + 862 \cdot (9,96 - 11,76)^2 + 3,14 \cdot (1489 + 55,7 \cdot (19,96 - 11,76)^2 + 0,4 \cdot ((7 \cdot 2 \cdot 8^3/12 + 14 \cdot 8 \cdot (18 - 11,76)^2)) = 43600 + 16435 + 1983 = 62018$$
 см⁴.

Здесь коэффициенты: $3,14 = 7,85/2,5$ – сталь рельса; $0,4 = 1,0/2,5$ – прокладки из жесткой резины.

Жесткость составного обжатого расчетного участка рельсовой нити из бетона класса С25/30: $E I_{xc} = 32,5 \cdot 10^9 \cdot 62018 \cdot 10^{-8} = 20,16 \cdot 10^6$ Н·м² образуется при наезде колеса.

Жесткость составного необжатого участка рельсовой нити: $E I_{xc} = (10,8 + 2,98) \cdot 10^6 = 13,78 \cdot 10^6$ Н·м² образуется при откате колеса за пределы расчетного участка.

С целью контроля выполнен расчет жесткости сечения из двух полупшпал, но уже с учетом центра жесткости и модуля упругости составляющих сечение слоев. Результаты отличаются на $(62018 - 61085)/62018 \cdot 100 \% = 1,5 \%$, т. е. в пределах допустимой точности выбранных параметров рельсовой нити.

Расчет ЭОР по условию прочности. Задача. Вертикальная динамическая нагрузка $F_d = F_{ст} K_d = 50 \cdot 1,4 = 70$ кН действует в средней части рельсовой нити. Коэффициент динамичности $K_d = 1,4$. Требуется определить I'_0 , M_{max} , u_{max} методом расчета балки на упругом основа-

нии, использующем гипотезу Фусса – Винклера [5]. Далее по тексту $F_d = F$.

$$\text{Решение. } K = 92 \text{ МПа, } \beta = \sqrt[4]{K/4EI_{xc}} = \sqrt[4]{92 \cdot 10^6 / 4 \cdot 20,16 \cdot 10^6} = 1,03.$$

$l_0 = \pi/\beta$, $l'_0 = 0,75l_0 = 0,75 \cdot 3,14/1,03 = 2,28 \text{ м}$ – полудлина сжатого участка рельсовой нити по треугольной эпюре распределения давления в уровне ее подошвы на основание.

$y_{\max} = v_{\max} = -F\beta/2K = -70 \cdot 10^3 \cdot 1,03/2 \times 92 \cdot 10^6 = -0,4 \text{ мм}$ – упругий прогиб, равный осадке под силой F , испытывающий сжатие участка рельсовой нити.

$M_{\max} = F/4\beta = 70/4 \cdot 1,03 = 16,99 \text{ кН}\cdot\text{м}$ – изгибающий рельсовую нить момент относительно центральной оси X_c .

Соотношение параметров слоев рельсовой нити можно регулировать по формуле $1/\rho = M/EI = M_p/E_p I_p = M_{ш}/E_{ш} I_{ш} = \text{const}$. Например, под нагрузкой момент M_{\max} перераспределяется между рельсом и шпалой-механизмом, а так как она имеет большую жесткость, соответственно, воспримет большую часть момента M_{\max} .

В ЛТП уменьшается роль рельса по вопросам прочности и жесткости рельсовой нити, следовательно, массу рельса можно уменьшить и экономить металл:

$$M_{ш} = M_{\max} E_{ш} I_{ш} / EI_{xc} = 16,99 \cdot 10,80/20,16 = 9,1 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

$$M_p = M_{\max} - M_{ш} = 16,99 - 9,1 = 7,89 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Напряжения в бетоне шпалы-механизма (без учета прочности арматуры – в запас) от M_{\max} :

$$\sigma_{ш} = M_{ш}(h - y_c)/I_{xc} = 9,1 \cdot 10^3 \times 11,76 \cdot 10^{-2} / 62018 \cdot 10^{-8} = 1,73 < 17 \text{ МПа}.$$

Напряжения в рельсе: $\sigma_p = 7,89 \cdot 10^3 / 208 \times 10^{-6} = 37,93 \text{ МПа} < 240 \text{ МПа}$.

Получен многократный (10; 6) запас прочности материалов рельсовой нити и однократ-

ное (см. далее по тексту) соблюдение запаса по величине условия прочности основания. Значит, размеры рельсовой нити следует оптимизировать соответственно конкретным параметрам рельса, железобетона, балласта и грунта.

Проверка условия $\varepsilon_p = \varepsilon_{ш}$. Здесь $\varepsilon_{ш} = 1,73 \cdot 10^6 / 32,5 \cdot 10^9 = 0,056 \cdot 10^{-3}$ – деформация шпалы-механизма; $\varepsilon_p = 37,93 \cdot 10^6 / 206 \cdot 10^9 = 0,18 \cdot 10^{-3}$ – то же рельса. Разная величина деформаций контактирующих рельсов и шпалы: рельса больше, поэтому нагруженная железобетонная шпала совместно с балластом силами трения между слоями будут препятствовать смещению в шпале рельса от изгибов, работать как противоугонное устройство рельсов.

По табл. 1, где приведены результаты расчета рельсовой нити, можно заключить:

1) уменьшение жесткости рельсовой нити в полтора раза незначительно (10 %) на результатах расчета v_{\max}^m и l'_0 , но может повлиять на динамику движения, так как колебания величины смещения v_i рельса от горизонтальной линии качения колеса сопровождаются появлением дополнительных сил инерции;

2) уплотнение основания в процессе эксплуатации ЛТП при росте коэффициента постели K_0 на 33 % сопровождается уменьшением $y_{\max} = v_{\max}$ на 40 % – обратная зависимость.

В поперечном направлении расчет ЭОР по прочности – это расчет силы обжатия на сжатом участке нагружаемого основания и рельсовой нити через условие равновесия одной полушпалы, как рычага, например наружной [2]. Геометрическую схему рычага образуют вертикальная наружная контурная линия сечения полушпалы и горизонтальная линия, параллельная подошве и проходящая через связь (точка ρ).

Таблица 1

Результаты расчета рельсовой нити 46 · 22 см, как балка на упругом основании (БУО), на нагрузку $F = 70 \text{ кН}$

Коэффициент постели K_0 (К), МПа	Бетон С25/30							
	БУО: шпала-механизм, рельс, прокладка (средняя часть), обжатие				БУО из шпалы-механизма (под шарнирным стыком рельсов без учета их жесткости)			
	$EI_{xc} \cdot 10^6$, Н·м ²	v_{\max} , мм	M_{\max} , кН·м	l'_0 , м	$EI_{xc} \cdot 10^6$, Н·м ²	v_{\max} , мм	M_{\max} , кН·м	l'_0 , м
200 (92)	20,16	0,40	16,99	2,28	13,78	0,44	15,35	2,07
150 (69)	20,16	0,66	20,11	2,71	13,78	0,73	18,23	2,46

Расчетную схему рычага создают горизонтальное плечо полушпалы, распределяющее движущую нагрузку F на контактное давление в уровне подошвы на основание (рис. 1б), и вертикальное плечо с треугольной эпюрой горизонтальных сил сопротивления. Распределенную нагрузку согласно принципу освобожденности тел от связей уравнивали равнодействующими силами P_i и $F_{об}$, прикладывая их в центре тяжести площадей эпюр.

Но рычагу необходима опора. Этому требованию соответствуют: точка расположения равнодействующей P_i реактивного давления на полушпалу при расчете ее наклона и точка p на горизонтальной связи, служащая условной опорой при расчете силы обжатия. Считали крен вертикального плеча полушпалы, как рычага, относительно точки d с нулевым значением реактивного давления по эпюре рис. 2б.

По условию равновесия проекции возможных сил на горизонтальную ось полушпалы следует, что усилие в связях, соединяющих полушпалы, соизмеримо с силой обжатия. Связь прерывистая из арматурных стержней укладывается при бетонировании шпалы-механизма на высоте y от подошвы в точке p . Точка p – проекция на плоскость поперечного сечения линии, проходящей через стыки горизонтальных металлических связей с бетоном полушпалы.

Изгиб рельсовой нити в поперечном направлении относительно точки p описывается формулой внешнего изгибающего момента $M_n^p = P_n(x_n^c - e_p)$ (рис. 1) и уравнивается внутренним моментом, который создает сила обжатия $M_{об}^p = F_{об}(h - y - y_c)$. Из формул моментов M_n^p и $M_{об}^p$ следует, что их величины зависят от геометрических параметров полушпал и их соотношений, а из равенства моментов выводится формула расчета силы $F_{об}$:

$$F_{об} = P_n(x_n^c - e_p)/(h - y - y_c),$$

где y_c в соответствии с условием пропорциональности величины напряжений расстоянию от точки p , образующих треугольную эпюру, в сечениях боковых вертикальных прокладок, определяется по формуле $y_c = h_2((h +$

$+ 2h_1 - 3y)/3(h + h_1 - 2y)$; x_n^c – абсцисса центра тяжести сечения полушпалы относительно оси рельса; P_n – равнодействующая реактивного давления балласта на подошву наружной полушпалы.

По мере удаления нагрузки от колеса образуются волнообразные прогибы слоистой рельсовой нити, амплитуда колебаний которых быстро уменьшается с уменьшением ее жесткости. Уменьшение (непостоянство) жесткости обусловлено действием нагрузки от колеса: по мере приближения колеса – постепенное суммирование параметров включаемых слоев, а по мере удаления колеса – постепенное вычитание параметров выключаемых слоев. Расчетной принята конструкция рельсовой нити под колесом с названием «цельная».

В расчетах принято допущение, что на сжатие сзади и впереди нагрузки работают ее участки длиной полуволны l'_0 с распределением давлений на основание по эпюре треугольника вместо эпюры волнообразного очертания [2]. Продольную эпюру распределения контактных сжимающих напряжений в основании шпалы-механизма по треугольнику можно уравновесить по прямоугольнику $0,5l'_0 \cdot 2p_{max} = p_{max}l'_0$ для упрощения практических расчетов перемещений полушпал и краевого давления на балласт.

При разработке метода расчета ЭОР принят вариант действия сил на внутреннюю и наружную полушпалы (относительно оси ЛТП), работающих отдельно, т. е. без учета взаимовлияния напряженно-деформированного состояния в их основании. В этом случае закономерно применение принципа независимости действия сил. Кроме того, силовые параметры отдельно работающих полушпал – это их максимально возможные значения в упругой стадии, практически резерв их возможностей в данной ситуации. Они свидетельствуют о надежности ЛТП с ЭОР. Изменение такой силовой расчетной схемы с учетом взаимовлияния способствует увеличению ЭОР.

Контактное давление в уровне подошвы правой рельсовой нити на основание рассчитывается, как под фундаментом, внецентренно (эксцентриситет $e = 1$ см) нагруженным вер-

тикальной силой (рис. 1а). Краевое давление на основание:

- внутреннего края подошвы рельсовой нити

$$-p_{\max} = -70 \cdot 10^3 / 2,28 \cdot 0,46 - 70 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 6 / 2,28 \cdot 0,46^2 = (-66743 - 8706) \text{ Па} = -0,076 \text{ МПа} < -0,25 \text{ МПа};$$

- наружного края

$$p_{\min} = (-66743 + 8706) \text{ Па} = -0,058 \text{ МПа}.$$

Различие числовых значений p_{\max} и p_{\min} характеризует наклон рельсовой нити к оси пути. По трапеции (рис. 1б) реактивного давления промежуточные значения определяются по формуле $p_i = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min})x_i/B$.

Соответственно давление по оси рельса при $x = 0,24$ м составляет величину $p_f = -0,058 - (0,076 - 0,058) \cdot 0,24/0,46 = -0,068$ МПа.

Равнодействующая сила для наружной полушпалы с краевыми параметрами трапеции реактивного давления: $p_f = -0,068$ МПа; $p_{\min} = -0,058$ МПа; $x_i = b_n = 0,24$ м; $x_{i-1} = 0$; $l'_0 = 2,28$ м:

$$P_n = -(0,058 + 0,068) \cdot 10^6 \cdot 2,28 \cdot (0,24 - 0)/2 = -34,47 \text{ кН} \approx -35 \text{ кН}$$

с абсциссой полюса силы $x_n^c = (b_n - 0) \times (p_f + 2p_{\min})/3(p_f + p_{\min}) = 0,24 \cdot (0,068 + 2 \cdot 0,058)/3 \cdot (0,068 + 0,058) = 11,68$ см (рис. 2в).

Числовые значения $F_{об}$, y_c , рассчитанные для сжатого участка $l'_0 = 2,28$ м, приведены в табл. 2.

Таблица 2

P_n , кН	B , см	h , см	y , см	y_c , см	$F_{об}$, кН
34,47	46	22	3	4,41	18,62
			6	4,24	23,10
			9	3,96	30,05
		26	3	4,54	14,71
			6	4,44	17,46
			9	4,31	21,40

Увеличение высоты шпалы-механизма ведет к уменьшению силы обжатия, если $B = \text{const}$, а увеличение y_i – к росту $F_{об}$ при $h = \text{const}$.

Приближается к нормируемой $F_{об} = 17,5$ кН по числовому значению $F_{об} = 18,62$ кН, если $y = 3$ см, $h = 22$ см. Принимаем $y = 3$ см для расчетов и последующего анализа и как необходимую толщину защитного слоя концов металлической связи в бетоне.

Полушпалы. Контактные давления (рис. 2б) в уровне подошв полушпал правой относительно оси пути (рис. 2б) рельсовой нити на основание:

а) наружной полушпалы (давление от рядом расположенной с ней внутренней полушпалы пока не учитываем), эксцентриситет нагрузки $(x_n^c - e_p) = 7,88$ см:

• наибольшее $p_{\max} = -34,47 \cdot 10^3 / 2,28 \cdot 0,24 - 34,47 \cdot 10^3 \cdot 0,079 \cdot 6 / 2,28 \cdot 0,24^2 = (-62993 - 124412) \text{ Па} = -187405 \text{ Па} = -0,19 \text{ МПа}$ (сжатие основания);

• наименьшее $p_{\min} = (-62993 + 124412) = 0,06$ МПа – растяжение-отрыв от основания наружного края полушпалы;

• давление под центром тяжести полушпалы с $x = 0,117$ м составляет величину

$$p_c = 0,06 + (-0,19 - 0,06) \cdot 0,117/0,24 = -0,066 \text{ МПа};$$

б) аналогично вычисляются контактные давления $p_{\max} = -0,204 < -0,25$ МПа; $p_{\min} = 0,063$ МПа (рис. 2а) в уровне подошвы внутренней полушпалы, нагруженной вертикальной и горизонтальной силами. Эксцентриситет $(x_n^c - e_p) = 6,88$ см.

В результате перерасчета краевых давлений по двузначной эпюре (без зоны «растяжения» основания) показано увеличение p_{\max} на 10,5 % и уменьшение p_{\min} на 32,8 %, что соответственно увеличит крен и величину резерва ЭОР по перемещениям, т. е. коэффициент запаса.

Из-за большой разницы эксцентриситетов приложения нагрузки напряженно-деформированное состояние основания цельной рельсовой нити с полушпалами в ней значительно меньше его отдельно нагруженных полушпал (рис. 2). Это объясняет наличие мгновенного поворота полушпал внутри рельсовой нити, а если убрать связь или увеличить ее длину, рельс будет опираться на две отдельные полушпалы с резким увеличением разницы реактивного давления на подошву и увеличения разницы деформаций основания. Такое изменение расчетной схемы – один из путей регулирования величины ЭОР, резерв увеличения ЭОР и стабильности в условиях длительной эксплуатации ЛТП.

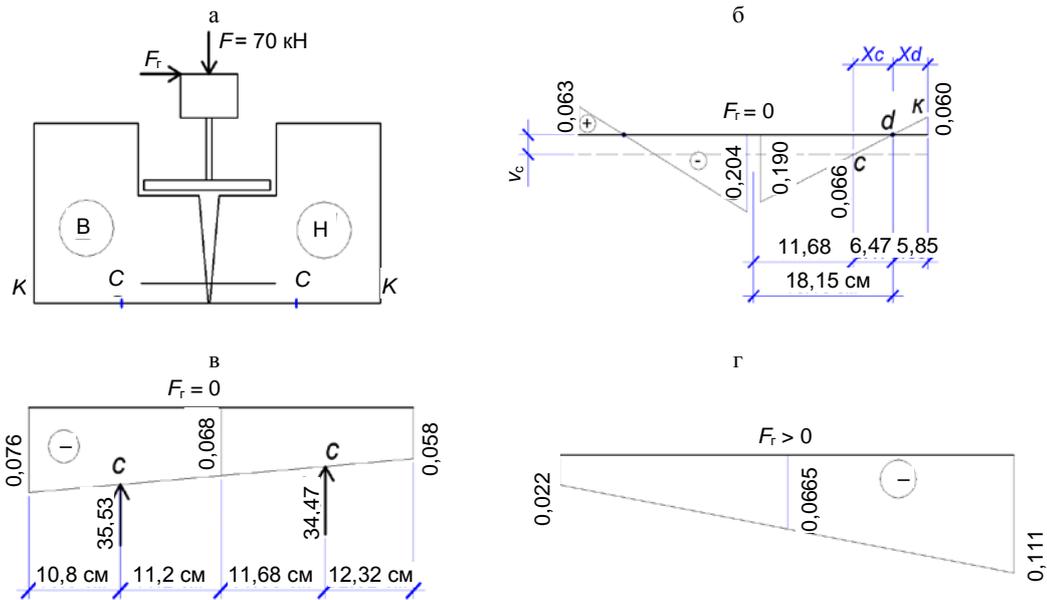


Рис. 2. а – схема сечения рельсовой нити и действующих внешних сил; б – эпюра контактного давления на основание в уровне подошвы внутренней (В) и наружной (Н) полушпал без учета взаимовлияния; в – то же контактного давления на основание в уровне подошвы цельной рельсовой нити и равнодействующие реактивные силы; г – то же контактного давления на основание в уровне подошвы цельной рельсовой нити

Основным вариантом загрузки рельсовой нити для исследований ЭОР принят вариант по рис. 2б как характеризующий напряженно-деформированное состояние основания отдельно работающих полушпал в шпале-механизме перед слиянием далее по мере движения нагрузки и полушпалы в напряженно-деформированное состояние основания цельной рельсовой нити (рис. 2в).

Конструкцией ЛТП предусмотрен крен рельсовой нити к оси пути, что исключает появление болтанки вагона и горизонтальный удар колеса по рельсу. Произойдет плавный накат реборды колеса на головку левого или правого рельса по ходу движения. Но если допустить, что вся горизонтальная нагрузка передается ребордой колеса (без учета сил трения колеса по головке параллельного рельса) только на одну рельсовую нить, тогда необходимы контрольный расчет и анализ результатов решения задачи по учету возможной горизонтальной силы F_r .

Задача. Рассчитать реактивные давления основания по подошве рельсовой нити в зоне действия вертикальной силы $F = 70 \text{ кН}$, силы обжатия $F_{об} = 18,62 \text{ кН}$ и горизонтальной

нагрузки от реборды с плечом $(h_1 - y + h_p) = 12 - 3 + 14 = 23 \text{ см}$, направленной от оси пути к правому рельсу. Плечо – расстояние от горизонтальной связи полушпал до контакта реборды с головкой рельса.

Решение. При загрузке правой рельсовой нити вертикальной силой совместно с ударом горизонтальной силой на уровне головки рельса не меняются давления в основании левой рельсовой нити. Но на мгновение могут измениться давление (рис. 2г) на основание правой рельсовой нити и крен. Наружный край шпалы-механизма окажет увеличенное давление

$$p_{\max}^H = (-70 \cdot 10^3 / 2,28 \cdot 0,46 + 70 \cdot 10^3 \times 0,01 \cdot 6 / 2,28 \cdot 0,46^2 - 18,62 \cdot 10^3 \cdot 0,23 \times 6 / 2,28 \cdot 0,46^2) \text{ Па} = -66743 + 8706 - 53261 = -111298 \text{ Па} = -0,111 \text{ МПа} > -0,058 \text{ МПа} \text{ (рост на } 91,4 \%)$$

Уменьшится давление внутренним краем шпалы-механизма на основание

$$p_{\min}^B = -66743 - 8706 + 53261 = -22188 \text{ Па} = -0,022 \text{ МПа} < -0,076 \text{ МПа} \text{ (уменьшение на } 71 \%)$$

Крен рельсовой нити изменит направление (рис. 2в, г). Такие мгновенные изменения возможны при условии, если горизонтальная сила изогнет рельсовую нить ЛТП.

Однако сопутствующее упругое смещение ее в горизонтальном направлении возможно лишь теоретически из-за большой жесткости и массы рельсовой нити ЛТП в этом направлении. Если сравнивать с жесткостью рельса на рельсошпальной решетке, то она в 60–70 раз больше. Кроме того, рельсовая нить бесконечной длины и она как неразрезная жесткая упругая балка сгладит любой разовый горизонтальный выгиб рельса от действия горизонтальной силы. Горизонтальная сила не учитывается в расчетах ЭОР.

Эффект обжатия по перемещениям. В период обкатки ЛТП выбираются упругопластические деформации основания рельсовой нити, формируется упругое основание, характеризующееся модулем упругости E и принципом линейной деформируемости грунтов. С упругими деформациями вырабатывается в поперечном направлении ломаный со встречным наклоном след подошвы шпалы-механизма, характеризующийся осадкой, наклоном i горизонтального плеча каждой полушпалы относительно горизонтальной подошвы шпалы-механизма, креном i вертикальных плеч и обжатием рельса с прокладками (рис. 1) с резервом $U_{г.макс}$.

О деформированном состоянии упругого основания полушпал свидетельствуют эпюры напряжений на рис. 2 и расчетная схема ЭОР по перемещениям на рис. 1в. На рис. 1в и рис. 2 показаны два положения горизонтального плеча наружной (относительно оси ЛТП) полушпалы: первое исходное положение – горизонтальное, второе положение плеча наклонное. Поворот горизонтального плеча полушпалы i относительно точки c происходит одновременно с его осадкой ($v_c = y_{макс}$) при движении колеса по рельсу и наезде на рассчитываемое сечение.

Очевидно, что чисто упругое поведение зернистой среды возможно лишь при очень небольших перемещениях, сообщаемых внешним многократным воздействием. Речь идет о долях миллиметров, т. е. о величинах, обычно не учи-

тываемых в геотехнической практике [5, 6]. Однако подобные малые упругие перемещения и есть необходимая величина для проявления ЭОР по перемещениям.

Пример. Определить минимальное необходимое перемещение $U_{г}$ вектора силы $F_{об}$ для проявления ЭОР из условия $U_{г.мин} \geq \Delta$ в упругой постановке задачи расчета.

Решение. Рассчитываем упругую деформацию Δ с использованием формулы Гука и чисел из предыдущих примеров $U_{г.мин} = \Delta = F_{об} \delta_{пр} / E_{пр} h_2 l'_0 = 18,62 \cdot 10^3 \cdot 0,07/8 \cdot 10^9 \cdot 0,08 \times 2,28 = 0,89 \cdot 10^{-3}$ мм. Следует иметь в виду, что в процессе эксплуатации образуется износ рельса, полушпал, прокладок – соответственно, для целей практики нужен автоматически реализуемый резерв для погашения неупругих перемещений $U_{г}$, больший по величине деформации Δ сжатия вертикальной прокладки.

Резерв – гарант стабильности ЭОР на случай возможных изменений грунтовых параметров при изменениях климатических условий. Разница возможных и необходимых перемещений является резервом ЭОР по перемещениям. Рассчитывается резерв горизонтальных перемещений вектора $F_{об}$, используя эпюры прочности на рис. 2 и исходя из линейной зависимости между ними, деформациями основания [7] и принципа независимости действия сил. Применяется правило линейного приращения ординат эпюры прочности вдоль сжатого участка [7].

Числовой пример. Используя эпюру (рис. 2б) контактного давления в уровне подошвы наружной полушпалы на основание, определяем положение точки d , характеризующей нулевое значение давления, из подобия треугольников $x_d / (24 - x_d) = 0,06/0,190$. Относительно правого конца полушпалы $x_d = 5,85$ см. Также из подобия треугольников $x_c / 18,15 = 0,066/0,190$ вычисляется $x_c = 6,47$ см = 64,7 мм.

Осадка точки d равна $y_{макс} = 0,4$ мм по расчету рельсовой нити по прогибам. Считаем наклон горизонтального плеча и крен вертикального плеча полушпалы $i = 0,4/64,7 = 6,16 \cdot 10^{-3}$. Перемещение в уровне вектора $F_{об}$ равно $U_{г.макс} = 6,16 \cdot 10^{-3} \cdot (221 - 44,1) = 1,1$ мм.

Такие горизонтальные перемещения полушпалы получают увеличением ($1,1/0,4 = 2,75$ раза) ею собственной осадки. Эти возможные (отсутствие рельса) перемещения раздельно работающих полушпал в $1,1/0,89 \cdot 10^{-3} = 1236$ раз больше необходимых для развития ЭОР перемещений.

Столь большой коэффициент запаса служит подтверждением достоверности использования общих выводов и положений об ЭОР, разработанных по исходным числовым данным частного случая загрузки рельсовой нити. Это означает также, что при проектировании рельсовой нити полный расчет ЭОР по перемещениям не требуется. Нет необходимости учитывать и не имеющую практического значения величину ($0,89 \cdot 10^{-3} \cdot 70/18,62 = 3,35 \cdot 10^{-3}$ мм) деформации прокладки под подошвой рельса.

Крен рельсовой нити и полушпал образуется не только внецентренной их загрузкой, но и особенностями конструкции ЛТП. К. Терцаги отметил, что посередине загруженной площади основание имеет большую осадку, чем участки по ее краям. В. Титов и В. Хромов [8] экспериментально подтвердили: по оси рельсового пути с поперечным расположением шпал упругие осадки основания в 2–2,5 раза больше осадок основания по оси рельса. Применительно к ожидаемым деформациям в аналогичной ситуации под нагрузкой будет происходить увеличение неодинаковых деформаций основания рельсовых нитей к оси ЛТП, соответственно и их крена, что будет препятствовать развалу колеи и невозможности накатывания реборды колеса на рельс.

Намного больше увеличивают возможный резерв крена рельса следующие известные факторы: по оси рельсовой нити в основании двух полушпал, где зазором определяется расстояние между ними, увеличению возможного (отсутствие вставки из рельса с прокладками) крена полушпал к оси рельса способствует наложение напряженно-деформированного состояния в их основании. Кроме того, даже на уплотненном основании образуется неодинаковая осадка разных по ширине ленточных фундаментов: уменьшение ширины – увеличение осадки полушпал. Для объяснения здесь

применимо заключение Л. Мелентьева [9]. Он пишет: «Сужение ширины нижней постели брусьев до 21 см недопустимо, так как в этом случае удельная осадка (1 мм на 1 млн т) увеличивается на 30 % по сравнению с осадкой при ширине 23 см, на 51 % – по сравнению с шириной 25 см и на 66 % – с шириной 27 см». Значит, сужение в шпале-механизме подошв полушпал от 24 до 22 см резко увеличит разницу их осадок и наклон рельсовой нити к оси пути через более узкую полушпалу.

ЛТП – гибкая конструктивная система, совместно с балластом гасит механические колебания рельса и шум, а регулированием величины ЭОР достигается необходимое демпфирование системы. В ЛТП упругие прокладки под подошвой и по бокам рельса служат ему и шпале-механизму амортизатором, так как смягчая удары, защищают их.

С устройством жестких стыков уменьшается ударный характер шума. Основная доля шума на трамвайных путях обусловлена качением колеса по рельсу и, чем больше шероховатость поверхности катания колеса, рельса и эллипсоидность колеса, чем больше разница в диаметрах колес одной оси, тем выше уровень шума, распространяемого рельсом. В ЛТП энергию вибрирующего рельса воспринимает шпала-механизм в процессе обжатия его нагрузкой от колеса, балласт и основание.

Специфика ЭОР по защите от шума и вибрации [10]: демпфирование, т. е. принудительное гашение энергии удара в горизонтальной плоскости в момент и в зоне ее возникновения, изоляция вибрирующего и звучащего рельса железобетонными экранами из полушпал. Шум и вибрация гасятся также в результате изменения жесткости слоистой рельсовой нити при наезде колеса и при откате его. Вне сжатого участка каждый слой колеблется с разной амплитудой и препятствует контактирующим с ним слоям достигать резонанса.

Сравнительно с жесткостью рельса в трамвайном пути на рельсошпальной решетке вертикальная жесткость рельсовой нити в ЛТП в 3–6 раз больше, но меньше в 12–15 раз излишней жесткости трамвайного пути на сплошной железобетонной плите. Излишняя жест-

кость трамвайного пути на железобетонной плите даже с учетом ее равнопрочности и равножесткости создает условия, при которых все большая часть энергии вибрации рельса воспринимает плита с выключением упругого основания. Плита становится резонатором ударного шума.

ВЫВОДЫ

1. Изучена механика эффекта обжатия нагружаемого рельса полушпалами *L*-образного сечения. Установлено, что эффект обжатия рельса – это результат сжатия в двух взаимно перпендикулярных направлениях (обжатие) нагрузкой от колеса рельса с прокладками, если расположить их внутри шпалы-механизма на упругом основании.

2. Методика расчета параметров эффекта обжатия рельса является инструментом для решения прикладных задач ленточных трамвайных путей. Результаты предлагаемого расчета эффекта обжатия рельса в упругой постановке задачи и при неизменных размерах сечения рельсовой нити и введении поправочных коэффициентов соотношения с новыми исходными данными по нагрузке рекомендуются к практическому применению как достоверные значения.

3. Свойства эффекта обжатия тела по горизонтальному направлению – копия свойств его основания, увеличенных либо уменьшенных рычагами *L*-образной формы. Используя эту закономерность, разработаны, исследованы и доведены до практического применения расчетные схемы эффекта обжатия рельса по прочности и перемещениям – основным свойствам и параметрам эффекта обжатия.

4. Выявлена пропорциональная зависимость эффекта обжатия рельса по прочности от величины равнодействующей реактивного давления, разности эксцентриситетов этой равнодействующей и нагрузки и обратно пропорциональной зависимости от расстояния по вертикали между вектором силы обжатия и положением связи сдвоенных фундаментов. Сила обжатия рельса увеличится, если уменьшить высоту фундаментов при неизменных ширине

и давлением на основание или если увеличить ординату расположения связи между ними при неизменной высоте фундамента.

5. Установлено, что в поперечном сечении рельсовой нити горизонтальное перемещение каждой точки вертикального плеча полушпалы относительно точки с нулевым значением давления, расположенной на горизонтальном плече, пропорционально произведению прогиба этой точки и расстоянию по высоте между ними. Способ расчета эффекта обжатия рельса рельсовой нити по перемещениям необходим для расчета резерва горизонтальных перемещений вертикального плеча, обеспечивающего гарантию проявления эффекта обжатия рельса во времени.

6. Гашение шума, передаваемого рельсом, необходимо регулировать величиной силы обжатия полушпалами рельса с прокладками, меняя ординату расположения горизонтальной связи, длину горизонтального плеча полушпал или высоту вертикального плеча.

7. Для решения накопившихся противоречий между экологией и потребностью города в надежном и бесшумном трамвае, дешевом в строительстве и не нуждающемся в эксплуатационных расходах, предлагается саморегулирующаяся бесшумная конструкция ленточного трамвайного пути на рельсовых нитях с эффектом обжатия рельса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рельсовый** путь: пат. № 3262 Респ. Беларусь: МПК E01B 2/00, E01B 21/00 / А. В. Трушкина, В. Н. Суходоев; дата публ.: 30.03.2000; Рельсовый путь: пат. № 2177061 Российской Федерации: МПК E01B 2/00, E01B 21/00 / А. В. Трушкина, В. Н. Суходоев; дата публ.: от 20.12.2001.
2. **Байков, В. Н.** Железобетонные конструкции / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1985. – С. 368.
3. **Суходоев, В. Н.** Конструкция трамвайного пути с эффектом граблей / В. Н. Суходоев // Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2013. – Ч. 2. – С. 276–290.
4. **Резина.** Метод определения упруго прочностных свойств при растяжении: ГОСТ 270–75 (СТ СЭВ 2594–80). – Взамен ГОСТ 270–64; введ. 01.01.78 до 01.01.88. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 13 с.

5. **Сосянц, В. Г.** Городские рельсовые пути и дороги / В. Г. Сосянц. – М.: Стройиздат, 1965. – С. 145–148.

6. **Соболевский, Д. Ю.** Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д. Ю. Соболевский. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – С. 232.

7. **Фундаменты** плитные. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-67–2007 (02250). – Введ. 01.09.2007. – Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2008. – 136 с.

8. **Титов, В. П.** Прибор для измерения упругих осадок земляного полотна при проходе транспорта / В. П. Титов, В. И. Хромов // Труды VIII Междунар. конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. – М.: Стройиздат, 1973. – 205 с.

9. **Мелентьев, Л. П.** Об оптимальном соотношении механических свойств элементов верхнего строения пути / Л. П. Мелентьев // Труды ЦНИИ МПС. – М.: Транспорт, 1973. – Вып. 501: Совершенствование конструкций пути и стрелочных переводов. – С. 31–35.

10. **Суходоев, В. Н.** Ленточный путь избавления от грохота / В. Н. Суходоев // Ахова працы. – 2001. – № 6. – С. 28–29.

REFERENCES

1. **Trushkina, A. V., & Sukhodoev, V. N.** (2000) Railway. Patent Republic of Belarus, no 3262 (in Russian); Trushkina, A. V., & Sukhodoev, V. N. (2001). Railway. Patent Russian Federation, no 2177061 (in Russian).

2. **Vaykov, V. N., & Sigalov, E. E.** (1985) *Reinforced Concrete Structures*. Moscow, Stroyizdat, 368 (in Russian).

3. **Sukhodoev, V. N.** (2013) Design of Tramway with Raker Effect. *Geo-Technics of Belarus: Science and Practice. Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Part. 2*. Minsk: BNTU, 276–290 (in Russian).

4. **State Standard 270–75** (СТ СЭВ 2594–80). Rubber. Method for Determination of Elastic and Strength Properties During Extension. Moscow, Publishing Standards, 1987. 13 p. (in Russian).

5. **Sosyants, V. G.** (1965) *Urban Railways and Roads*. Moscow, Stroyizdat, 145–148 (in Russian).

6. **Sobolevsky, D. Yu.** (1994) *Strength and Bearing Capability of Dilatant Soil*. Minsk, Navuka i Tekhnika. 232 p. (in Russian).

7. **Technical Code ТКП 45-5.01-67–2007** (02250) Plate Foundations. Designing Rules and Regulations. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of Belarus, 2008. 136 p. (in Russian).

8. **Titov, V. P., & Khromov, V. I.** (1973) Device for Measuring Elastic Earthwork Compaction in the Process of Transport Passover. *Proceedings for VIII International Congress on Mechanics of Earth and Foundation Construction*. Moscow, Stroiizdat. 205 p. (in Russian).

9. **Melentiev, L. P.** (1973) On Optimum Ratio of Mechanical Properties of Track Superstructure Elements. *Proceedings of Central Scientific-Research Institute, Ministry of Railways [TsNII MPS]. Issue. 501: Modernization of Railway Structures and Track Switches*. Moscow, Transport, 31–35 (in Russian).

10. **Sukhodoev, V. N.** (2001) Noise Removal on Belt-Type Railway. *Akhova Pratsy [Labour Security]*, 6, 28–29 (in Russian).

Поступила 23.05.2013