

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШПАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ И ШПАЛ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННЫХ УСЛОВИЙ ОПИРАНИЯ**

**<sup>1</sup>Говоруха В.В., <sup>1</sup>Говоруха А.В., <sup>1</sup>Кизилов В.К., <sup>1</sup>Собко Т. П., <sup>1</sup>Семидетная Л.П.**

<sup>1</sup>*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПІДШПАЛЬНОЇ ОСНОВИ І ШПАЛ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННИХ УМОВ ОПИРАННЯ**

**<sup>1</sup>Говоруха В.В., <sup>1</sup>Говоруха А.В., <sup>1</sup>Кізілов В.К., <sup>1</sup>Собко Т.П., <sup>1</sup>Семидітна Л.П.**

<sup>1</sup>*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України*

## **STUDY OF THE STRESS STATE OF THE SLEEPER BASE AND SLEEPERS OF RAIL TRACK WITH ACCOUNTING VARIABLE CONDITIONS OF THEIR RESTING**

**<sup>1</sup>Hovorukha V.V., <sup>1</sup>Hovorukha A.V., <sup>1</sup>Kizilov V.K., <sup>1</sup>Sobko T.P., <sup>1</sup>Semiditna L.P.**

<sup>1</sup>*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

**Аннотация.** В статье рассмотрена актуальная задача напряженного состояния подшпального основания и шпал рельсового пути с учетом удельных нормальных и удельных касательных напряжений при переменных условиях опирания шпал на основание. Методология работы направлена на определение взаимного влияния нормальных (сжимающих) и касательных (сдвигающих) удельных напряжений на формирование устойчивости от смещения отдельных частиц основания и установления зон устойчивости и зон сдвига частиц подшпального основания при различных условиях опирания шпал на основание. Установлены зоны неустойчивого положения основания под шпалами при опирании подрельсовыми частями и непрерывном опирании шпал на основание. Получено, что неустойчивое положение основания образовывается из-за превышения удельных касательных напряжений над удельными напряжениями сопротивления сдвигу, состоящими из удельного трения и удельного сцепления между частицами в основании. Установлено, что потеря устойчивости частиц балласта вызывает их перемещение в сторону действия сдвигающих удельных напряжений. В этих зонах происходит снижение плотности и жесткости подшпального основания. Это приводит к постепенному перераспределению реактивного отпора основания вдоль шпалы и в зависимости от этого перераспределения происходит изменение изгибающих моментов, действующих на шпалу. Установлено, что при опирании шпал только подрельсовыми частями сдвигающие напряжения и силы, а также напряжения и силы сопротивления сдвигу под средней частью шпал распределяются таким образом, что до глубины 60 см от подошвы шпалы сдвигающие силы превосходят силы сопротивления. Это явление приводит к смещению частиц балласта под среднюю часть шпалы, уплотнению балласта и к опиранию шпал средней частью с возможным трещинообразованием. В концевых участках шпал имеет место также потеря устойчивости балласта. Даны рекомендации по повышению показателей устойчивости подшпального основания и прочности шпал. Полученные результаты работы рассмотрено применять на горном, промышленном и железнодорожном рельсовом транспорте.

**Ключевые слова:** рельсовый путь, шпалы, подшпальное основание, напряжения, устойчивость

В существующих методах исследований прочности шпал и устойчивости подшпального основания положены допущения, что шпала имеет постоянное сечение, постоянную по длине ширину площади и опирание на сплошное упругое основание с постоянными свойствами по длине шпалы [1, 2]. Эти допущения не позволяют учитывать ряд возможных особенностей конструкции шпал, установление рациональной их формы и переменной ширины площади их опирания на основание вдоль длины шпалы. Не учитываются реальные эксплуатационные условия опирания шпал на основание, которое имеет переменные свойства упругости вдоль шпал в технологическом процессе строительства рельсового пути и его эксплуатации.

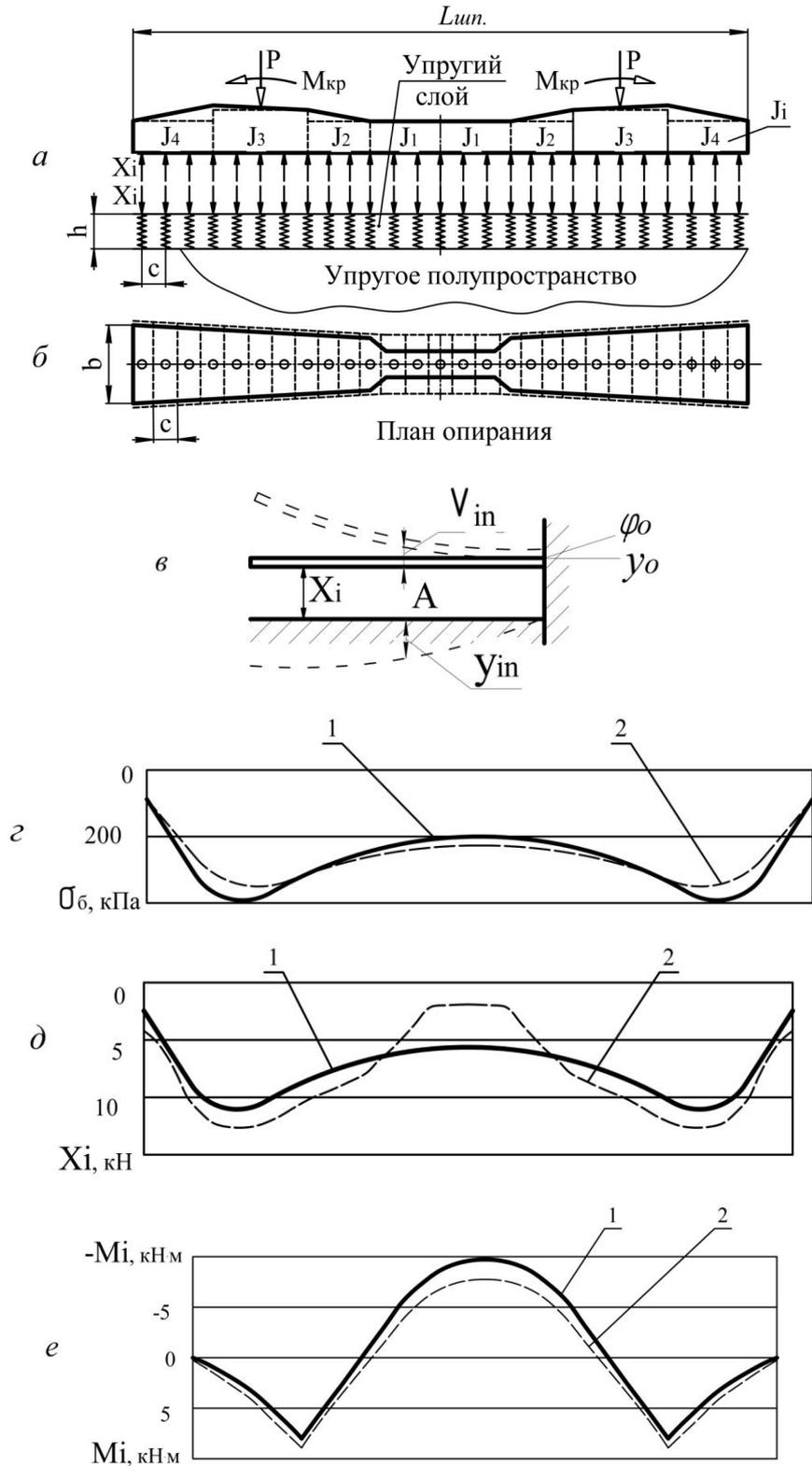
Не исследованы фактические условия опирания шпал на основание и их влияние на удельные между шпалой и основанием, а также реактивные силы напряженно-деформированное состояние рельсошпальной решетки и балластного слоя.

В данной работе изложены результаты исследований железобетонных шпал с переменной шириной площади опирания поперечного сечения, а также переменной упругости основания по их длине. Учет этих факторов позволит определить рациональные параметры формы железобетонных шпал с учетом неравномерной упругости подшпального основания в критических зонах концевых участков и средней части шпал, а также несовершенство конструкции рельсошпальной решетки. При этом, установлено, что упругость элементов рельсового пути неодинакова как вдоль и поперек рельсового пути, так и по обоим рельсовым нитям. Разность этих значений достигает около 200 %. Неравномерность упругости основания имеет место и вдоль шпал, что влияет на их прочность и работоспособность. Так уменьшение жесткости основания под концевыми участками шпал приводит к увеличению жесткости в средней части шпалы из-за его уплотнения, что приводит к трещинообразованию шпал в этом месте [3, 4].

Для улучшения работоспособности рельсошпальной решетки в работе изложены результаты исследований влияния рациональных параметров формы шпал и напряженного состояния в подшпальном основании на прочность и устойчивость шпал и подшпального основания.

Для проведения исследований на рис. 1, *а*, *б* приведена расчетная схема шпалы, где на рис 1, *а* показано переменное поперечное сечение вдоль шпалы, с переменным моментом инерции  $J_x$  каждого условного участка, а на рис. 1, *б* переменная ширина площади  $\hat{a}_\delta$  опирания шпалы на удельном участке *с*. В расчетной схеме введены следующие допущения и предпосылки: шпала рассматривается как балка конечной длины с переменным поперечным сечением условно разделенным на отдельные участки; шпала рассматривается разделенной на отдельные условные участки шириной *с* с усредненными характеристиками моментов инерции и ширины площади опирания *в*, а подшпальное основание – на отдельные участки *с* усредненными характеристиками жесткости и геометрическими размерами (ширина *в*, толщина *h*, длина *с*); нагрузка от подвижного состава на рельсы принимается статической и эквивалентной динамическим нагрузкам *P* и крутящим моментом  $\dot{I}_{\delta\delta}$  от действия горизонтальных сил подвижного состава, а система нагрузок рассматривается по принципу независимости действия сил; упругие свойства основания характеризуются пропорциональной зависимостью между нагрузкой и перемещением, а также имеют свойства упругого полупространства [5]; погонный вес условных дискретных участков шпал принимается сосредоточенным в местах условных опор; в пределах каждого участка действуют усредненные параметры моментов инерции и ширины площади опирания, а реакция основания считается равномерно

распределенной, где связь между основанием и шпалой осуществляется в отдельных точках, находящихся в центре площади опирания каждого участка.



а – расчетная схема шпал (вид сбоку); б – расчетная схема шпал (вид сверху); в – схема изгиба шпалы; г – эпюра напряжений в подшпальном основании; д – эпюра реактивного отпора основания; е – эпюра изгибающих моментов; 1 – шпала с постоянной шириной площади опирания; 2 – шпала с переменной шириной площади опирания

Рисунок 1 – К расчету шпал и подшпального основания

Таким образом осуществляется переход от расчета шпалы со сплошным опиранием на основание к расчету на отдельных упругих опорах.

Система, полученная в результате перечисленных допущений статически неопределима, ее решение производится смешанным способом. В расчетной схеме вводится условное замещение (рис. 1, в), а опорные пружины заменяются действием искомым реактивных сил  $X_i$ . Известными принимаются осадки  $y_0$  и угол поворота  $\varphi_0$  в месте условного замещения (рис. 1, в).

Для определения неизвестных в соответствии с расчетной схемой составляется система канонических уравнений и дополнительных уравнений равновесия (1).

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=n} \delta_{i,n} X_i - y_0 - \varphi_0 a_i + \Delta_{i,p} &= 0; \\ \sum_{i=1}^{i=n} X_i + \sum_{i=1}^{i=n} Q_i + \sum P_j &= 0; \\ \sum_{i=1}^{i=n} X_i a_i + \sum_{i=1}^{i=n} Q_i a_i + \sum_{j=1}^{j=f} M_{p,j} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_i$  – расстояние от условного защемления до необходимого сечения  $i$ , определяемое из выражения

$$a_i = \frac{l}{2} + (i+1)l \quad (2)$$

Здесь  $l$  – расстояние между условными опорами;  $i$  – порядковый номер опор;  $\delta_{i,n}$  – коэффициенты канонических уравнений, определяемые как сумма перемещений основания  $y_{i,n}$  и прогиба балки  $v_{i,n}$ :

$$\delta_{i,n} = y_{i,n} + v_{i,n} = \frac{1-\mu_0^2}{\pi E_0 c} \left[ F_{i,n} + \frac{\pi h_i}{\delta} \times \frac{1-2\mu_0^2}{1-\mu_0^2} \frac{E_0}{E_i} \right] + \int \frac{M_i M_n}{E I_i \alpha_i} dx, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент Пуассона для основания;  $E_0$  – модуль деформации полупространства (почва выработки);  $E_i$  – модуль деформации подрельсового основания под отдельной  $i$ -й опорой;  $F_{i,n}$  – функциональная зависимость перемещений поверхности полупространства;  $h_i$  – толщина упругого слоя под отдельной  $i$ -й опорой;  $M_i, M_n$  – изгибающие моменты от действия единичных нагрузок соответственно в точках  $i, n$ ; ( $I$  – момент инерции базисного сечения балки);  $\alpha_n$  – поправочный коэффициент, учитывающий переменный момент инерции балки,  $\alpha_n = \frac{I_i}{I}$ ;  $I_i$  – момент инерции отдельных участков;  $E$  – модуль деформации материала балки;  $Q$  – вес отдельного участка балки, отнесенный к отдельной условной ( $i$ -й) опоре;  $P_j$  – активная нагрузка;  $j$  – порядковый номер

активной нагрузки;  $n$  – количество условных опор (или участков);  $f$  – номер условной опоры, над которой располагается активная нагрузка;  $\Delta_{i,p}$  – свободные члены системы уравнения (1), определяемые из выражения

$$\Delta_{i,p} = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i v_{n,i} + \sum_{j=1}^{j=f} v_{n,f} P_j. \quad (4)$$

В результате решения системы уравнений определяются неизвестные усилия  $X_i$  в условных опорах, а также угол поворота  $\varphi_0$  и деформация  $y_0$  условного защемления.

Изгибающие моменты, действующие на расчетные элементы рельсового пути, можно определить по следующим формулам.

Изгибающий момент в сечении, где приложена внешняя нагрузка,

$$M_\alpha = \sum_{k=1}^{[\alpha]} (X_k + Q) [([\alpha] - k)l + \Delta_k] + \sum_z^a P_z [([\alpha] - [r])l - \Delta_\alpha + \Delta_z] \quad (5)$$

Здесь  $M_\alpha$  – изгибающий момент в сечении приложения внешней силы с номером  $\alpha$ ;  $a$  – количество внешних сил, приложенных слева от силы с номером;  $X_k$  – реактивная сила в  $k$ -й опоре;  $[\alpha]$  – номер внешней силы, в сечении которой определяется изгибающий момент;  $[r]$  – переменная, характеризующая количество сил, приложенных слева от исследуемой внешней силы;  $\Delta_r$  – расстояние от внешней силы  $P_r$  до ближайшей условной опоры слева;  $\Delta_l$  – расстояние от внешней силы  $P_\alpha$ , где определяется изгибающий момент до ближайшей опоры слева,  $l$  – расстояние между опорами.

При этом

$$[\alpha] = \left[ \frac{\alpha_{p,\alpha}}{l} + 0,5 \right], \quad (6)$$

где  $\alpha_{p,\alpha}$  – расстояние от точки условного замещения до силы с номером  $\alpha$ .

Изгибающий момент в сечении над условной  $i$ -й опорой

$$M_i = \sum_{k=1}^i (X_k + Q) - (i - k)l + \sum_{\alpha=1}^a P_\alpha [(i - [\alpha])l - \Delta_\alpha]. \quad (7)$$

При наличии известных значений внешней нагрузки и в результате определения реактивного отпора (нагрузки на отдельные элементы пути или отдельные участки основания) и изгибающих моментов в каждом расчетном сечении можно определить напряженно-деформированное состояние каждого элемента.

Изгибающие напряжения в элементах пути или переводов определяются по формуле

$$\sigma_{u,i} = \frac{M_i}{W_i} \quad \text{или} \quad \sigma_{u,\alpha} = \frac{M_\alpha}{W_\alpha}, \quad (8)$$

где  $M_i$ ,  $W_i$ ,  $M_\alpha$ ,  $W_\alpha$ , – соответственно изгибающий момент и момент сопротивления в расчетном сечении ( $i$  или  $\alpha$ ).

Контактные напряжения непосредственно между шпалами и балластом определяются выражением

$$\sigma_{\delta,i} = \frac{X_i}{\Omega_i}, \quad (9)$$

где  $X_i$  – сила, передаваемая от условного  $i$ -го участка подошвы шпалы на балласт;  $\Omega_i$  – площадь  $i$ -го участка подошвы шпалы.

Для расчета сжимающих напряжений в балласте или в почве выработок на определенном расстоянии от подошвы шпалы (бруса) использован метод угловых точек [6], согласно которому сжимающие напряжения при действии равномерно распределенной нагрузки можно определить по следующей формуле:

$$\sigma_{n,i} = \sigma'_{n,i} + \sum_{i=1}^{i=n} \sigma''_{n,i}, \quad (10)$$

где  $\sigma'_{n,i}$  – сжимающие напряжения под центром тяжести загруженного прямоугольника отдельного  $i$ -го участка

$$\sigma_{n,i} = \frac{2\sigma_{\delta,i}}{\pi} \left[ \frac{\hat{a}ch}{4D} \cdot \frac{\left(\frac{\hat{a}}{2}\right)^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2 + 2h^2}{D^2h^2 + \left(\frac{\hat{a}}{2}\right)^2 \left(\frac{c}{2}\right)^2} + \arcsin \left( \frac{\hat{a}c}{4\sqrt{\left(\frac{\hat{a}}{2}\right)^2 + h^2}} \right) \right], \quad (11)$$

$\hat{a}$  – ширина  $i$ -го участка шпалы (бруса);  $c$  – длина  $i$ -го участка шпалы (бруса);  $h$  – глубина балласта в расчетной точке под шпалой

$$D^2 = \left(\frac{\hat{a}}{2}\right)^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2 + h^2;$$

$\sigma''_{h,i}$  – сжимающие напряжения под угловыми точками  $i$ -го прямоугольника,

$$\sigma''_{h,i} = \frac{\sigma_{\delta,i}}{2\pi} \left[ \frac{\hat{a}ch}{D} \cdot \frac{\hat{a}^2 + c^2 + 2x^2}{D^2h^2 + \hat{a}^2c^2} + \arcsin \left( \frac{\hat{a}c}{\sqrt{\hat{a}^2 + h^2} \sqrt{c^2 + h^2}} \right) \right]. \quad (12)$$

По результатам расчетов, согласно формулам (11), (12) построена эпюра сжимающих напряжений в балластном слое (см. рис. 1, з).

Из представленных эпюр напряжений в подшпальном основании видно, что для шпал с постоянной шириной площади опирания напряжения в

подрельсовом сечении превышают напряжения по сравнению со шпалами с переменной шириной площади опирания. Установлено что переменная форма площади опирания приводит к перераспределению сжимающих напряжений в подшпальном основании. При этом напряжения под шпалой в средней части шпалы с постоянной шириной площади опирания несколько меньше напряжений по сравнению со шпалой с переменной площадью опирания, а напряжения в подрельсовой части для шпал с постоянной шириной площади опирания значительно превышают сжимающие напряжения по сравнению со шпалами с переменной шириной площади опирания.

В связи с отмеченным перераспределением напряжений в подшпальном основании при изменении формы площади опирания шпал, происходит и соответствующее перераспределение реакций основания вдоль шпалы. На рис 1, д показаны эпюры сил реактивного отпора вдоль шпал с разной шириной площади опирания. При этом величина реактивных сил в подрельсовом основании для шпал с переменной шириной площади опирания значительно больше по сравнению со шпалами с постоянной шириной площади опирания, а в средней части шпалы реактивные силы меньше для шпал с переменной шириной площади опирания по сравнению с реактивными силами для шпал с постоянной шириной площади опирания.

Анализ изменений реактивных сил для шпал с различной формой площади опирания показывает, что в дальнейшем такое перераспределение приводит к изменению изгибающих моментов, действующих на шпалу.

На рис 1, е показано, что изгибающие моменты в средней части шпал с постоянной шириной площади опирания имеют значительно больший изгибающий момент по сравнению со шпалой с переменной шириной площади опирания.

В связи с изложенным качественным и количественным анализом, для подготовки исходных технических требований на создание шпал, необходимо рекомендовать шпалы с сужением в средней части и расширением в сторону подрельсовых частей и концов шпал.

Определение устойчивости отдельных частиц балласта против перемещения или выдавливания можно рассматривать как соотношение действующих на отдельную частицу сил и сил сопротивления ее перемещению.

В качестве действующих сил предполагаются касательные напряжения  $\tau_i$ , вызываемые нагрузкой от шпалы. В качестве сил сопротивления  $c_{\delta\delta,i}$  применяются силы трения между частицами балласта.

Касательные напряжения в подшпальном основании согласно формуле Бусинеска–Фламана [6] определяются из выражения

$$\tau_i = \sum \frac{3}{2} \frac{X_i y_i h_i^2}{\pi R^2}, \quad (13)$$

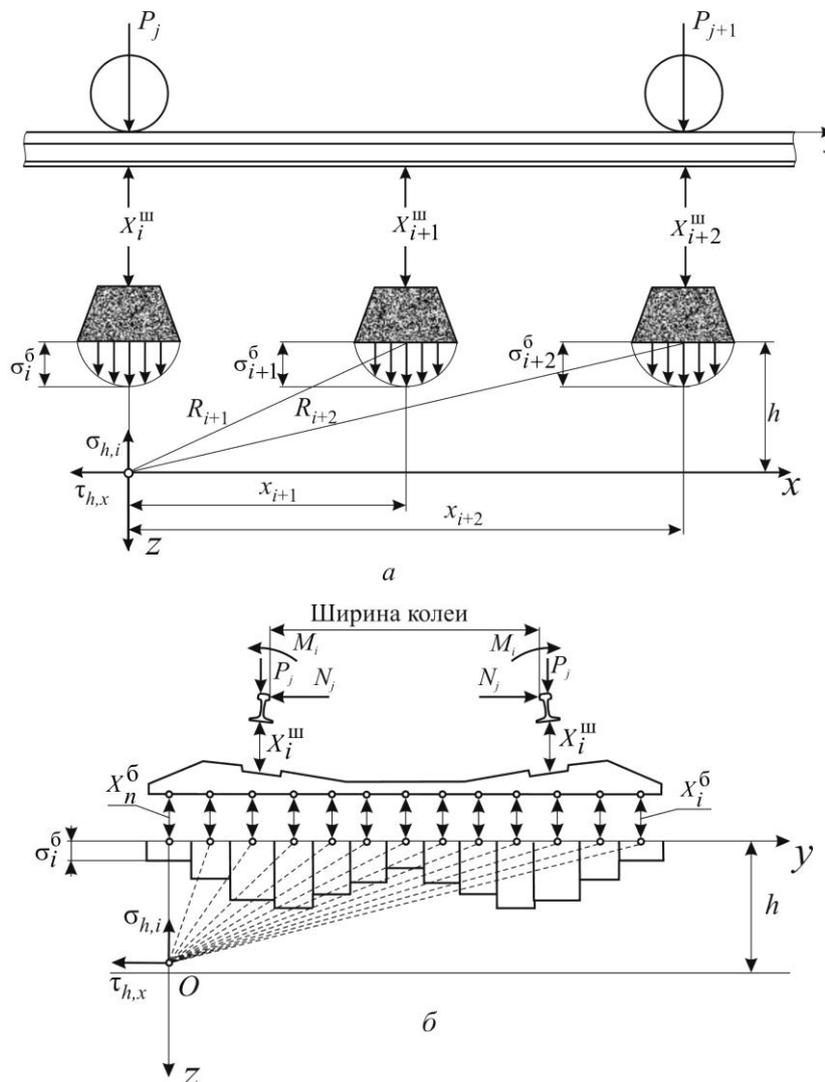
где  $y_i$ ,  $h_i$  – соответственно расстояние по горизонтали и глубина от места приложения силы до точки, в которой определяется напряжение;  $R$  –

радиальное расстояние от места приложения силы до точки, в которой определяется напряжение.

Силы трения между частицами балласта на единицу площади в подшпальном основании определяются согласно известному выражению

$$c_{mp,i} = \sigma_{n,i} f_{mp} \cdot \quad (14)$$

Сжимающие  $\sigma_{z,i}$  и касательные  $\tau_{z,y}$  напряжения в основании на глубине  $h_i$  вдоль оси  $z$ , а также по продольной  $x$  и поперечной  $y$  осям элементов верхнего строения пути (рис. 2) можно найти с использованием непосредственного алгебраического суммирования напряжений, возникающих от воздействия нагрузок  $\tilde{O}_3^\sigma$ ,  $\tilde{O}_3^s$ , или напряжений  $\sigma_i^a$ , передаваемых от отдельных условных участков разбивки вдоль продольной и поперечной осей.



$a$  – продольное направление;  $b$  – поперечное направление

Рисунок 2 – Расчетная схема для определения напряженного состояния в подшпальном основании

Система координат  $\hat{I}_{\bar{o}yz}$  принята с учетом совмещения плоскости  $O_{xy}$  с плоскостью рельсового пути, располагаемого в горизонтальном или наклонном положении продольной оси  $x$ , устанавливаемом величиной угла наклона  $\alpha$  к горизонту.

Рассмотрим напряженное состояние в упругом весомом массиве (основание), ограниченном сверху плоскостью  $O_{xy}$  и бесконечно простирающемся в остальных направлениях (упругое полупространство), с возможностью создания ограниченной области  $V$  в пределах допустимой точности исследований.

Схемы для определения составляющих напряжений в весомом основании при горизонтальном расположении плоскости пути ( $O_{xy}$ ) и при наклонном представлены на рис. 3.

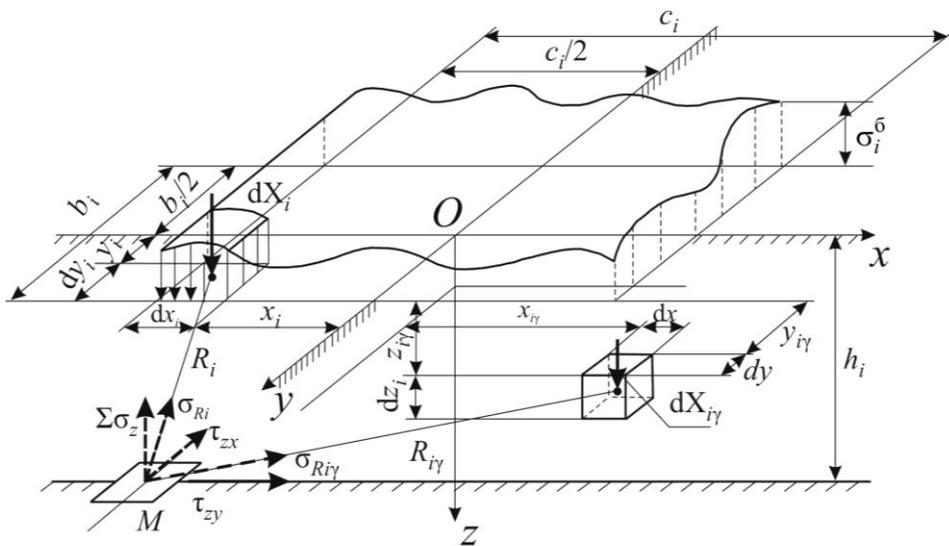


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения сжимающих и касательных напряжений в основании при условии горизонтального положения рельсового пути

Нагрузку  $\tilde{O}_3^{\bar{o}}$ ,  $\tilde{O}_3^{\bar{\sigma}}$  или  $\sigma_i^{\bar{a}}$  от рельсового пути, с некоторой интенсивностью  $\sigma_3^{\bar{a}} = f \cdot (x, y)$ , установленной согласно расчетным схемам, приведенным на рис. 1 представим распределенной на поверхности  $O_{xy}$  по некоторой прямоугольной условной площадке длиной  $c_3$  и шириной  $b_i$  (рис. 3). Допустим, что на площадке с размерами  $dx, dy$  действует известная нагрузка интенсивностью  $d\sigma_3^{\bar{a}}$ , эквивалентная сосредоточенной силе  $dX_i$ , направленной перпендикулярно к плоскости  $O_{xy}$ , т.е. к плоскости рельсового пути.

Нагрузочная площадка с размерами  $dx, dy$  привязана осевыми координатами  $x_i$  и  $y_i$ . Точка  $M$  в основании, где определяются составляющие напряжения, имеет осевые  $x, y, z$  и полярные координаты  $R_i$  и  $\beta_i$ , где

$R_i^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2$ . Предполагается, что напряжение в основании  $\sigma_{R,i}$  в точке  $M$ , возникшее от действия условной силы  $dX_i$ , направлено вдоль полярного радиуса  $R_i$ . Составляющие этого напряжения расположены в направлении осей  $Ox, Oy, Oz$  (рис. 3).

Весомое основание с отдельным объемом  $dV_i$  и размерами  $dx, dy, dz$ , в которых установлена сосредоточенная вертикальная гравитационная сила  $dX_{iy} = \gamma_i dx dy dz$ , где  $\gamma_i$  – объемный вес основания. Отдельный объем  $dV_i$  привяжем осевыми координатами  $x_{iy}, y_{iy}, z_{iy}$ . Точка  $M$  в основании, где определяются напряжения от действия уставной сосредоточенной силы  $dX_{iy}$  имеет осевые  $x, y, z$  и полярные координаты  $R_{iy}$  и  $\beta_{iy}$ , где  $R_{iy}^2 = (x - x_{iy})^2 + (y - y_{iy})^2 + (z - z_{iy})^2$ .

Предполагается, что напряжение  $\sigma_{R_{iy}}$  в точке  $M$ , возникшее от действия условной силы  $dX_{iy}$ , направлено вдоль полярного радиуса  $R_{iy}$ . Составляющие этого напряжения, расположенные в направлении осей  $Ox; Oy; Oz$  (рис. 3), объединяются с напряжениями от действия внешней нагрузки  $dX_i$ . Таким образом формируются составляющие сжимающие  $\sigma_z(x, y, z, \gamma)$  и касательные  $\tau_{zy}(x; y; z; \gamma)$ ,  $\tau_{zx}(\bar{o}, \acute{o}, z, \gamma)$  напряжения в основании (рис. 3).

Для определения составляющих напряжений в любой точке основания с координатами  $(x, y, z, \gamma)$  используем основные формулы Буссинеска и Фламана, которые в рассматриваемых случаях будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_z = & \frac{3}{2\pi} \int_{-b_3/2}^{b_3/2} \int_{-c_3/2}^{c_3/2} \frac{\sigma_i^6 dx dy z^3}{\left[ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z^2 \right]^{5/2}} + \\
 & + \frac{3 \sin \alpha}{2\pi} \int_{-x_3}^{x_3} \int_{-y_3}^{y_3} \int_0^{h_3} \frac{\gamma_i dx dy dz (z - z_{iy})^3}{\left[ (x - x_{iy})^2 + (y - y_{iy})^2 + (z - z_{iy})^2 \right]^{5/2}} \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{xy} = & \frac{3}{2\pi} \int_{-b_3/2}^{b_3/2} \int_{-c_3/2}^{c_3/2} \frac{\sigma_i^6 dx dy (y - y_i) z^2}{\left[ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z^2 \right]^{5/2}} + \\
 & + \frac{3 \sin \alpha}{2\pi} \int_{-x_3}^{x_3} \int_{-y_3}^{y_3} \int_0^{h_3} \frac{\gamma_i dx dy dz (y - y_{iy})(z - z_{iy})^2}{\left[ (x - x_{iy})^2 + (y - y_{iy})^2 + (z - z_{iy})^2 \right]^{5/2}} + \gamma_i h_i \cos \alpha; \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{zx} = & \frac{3}{2\pi} \int_{-b_3/2}^{b_3/2} \int_{-c_3/2}^{c_3/2} \frac{\sigma_i^6 dx dy (x - x_i) z^2}{\left[ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z^2 \right]^{5/2}} + \\ & + \frac{3 \sin \alpha}{2\pi} \int_{-x_3}^{x_3} \int_{-y_3}^{y_3} \int_0^{h_3} \frac{\gamma_i dx dy dz (x - x_{iy})(z - z_{iy})^2}{\left[ (x - x_{iy})^2 + (y - y_{iy})^2 + (z - z_{iy})^2 \right]^{5/2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Решение уравнений (15 и 17) в пределах требуемой точности возможно приближенными методами с преобразованием внешней распределенной нагрузки  $\sigma_i^a$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) на дискретных условных участках с приведенными силами  $\tilde{O}_i^\theta$ ,  $\tilde{O}_i^\sigma$  и т. д., а массива основания – на дискретные условные объемы ( $i = 1, 2, \dots, k$  – число объемов, включая области, расположенные за пределами нагруженной площадки) с приведенными гравитационными силами  $X_{iy}$  (см. рис. 3).

В упрощенной форме уравнения сложного напряженного состояния в подшпальном основании будут иметь следующий вид:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{3}{2} \frac{\tilde{O}_i h_i^3}{\pi R_i^5} + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{3 \tilde{O}_{iy} (h_i/2)^3}{2\pi R_{iy}^5}; \quad (18)$$

$$\tau_{zy} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{3}{2} \frac{\tilde{O}_i y_i h_i^2}{\pi R_i^5} + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{3}{2} \frac{\tilde{O}_{iy} y_{iy} (h_i/2)^3}{\pi R_{iy}^5} + \gamma_i h_i \operatorname{ctg} \alpha; \quad (19)$$

$$\tau_{zx} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{3}{2} \frac{\tilde{O}_i x_i h_i}{\pi R_i^5} + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{3}{2} \frac{\tilde{O}_{iy} x_{iy} (h_i/2)^3}{\pi R_{iy}^5}, \quad (20)$$

где  $h_i$ ,  $y_i$ ,  $x_i$  – соответственно расстояния по осям  $z$ ,  $y$ ,  $x$  от места приложения отдельной силы  $X_i$  до точки, в которой определяются напряжения;  $R_i$  – радикальное расстояние от места приложения силы  $X_i$  до точки, в которой определяются напряжения;  $R_{iy}$  – радиальное расстояние от центров масс условных частей основания до точки, в которой определяются напряжения.

Касательным напряжением  $\tau_{zy}, \tau_{zx}$  противодействуют удельные силы трения между частицами основания ( $\tilde{n}_{об.i}$ ), отнесенные к единице площади. Эти удельные силы трения на определенной глубине  $h_i$  можно определить как произведение сжимающих напряжений на данной глубине  $\sigma_{zi}$  и коэффициентов трения  $f_{об}$ :

$$c_{TP,i} = \sigma_{zi} \cdot f_{TP}. \quad (21)$$

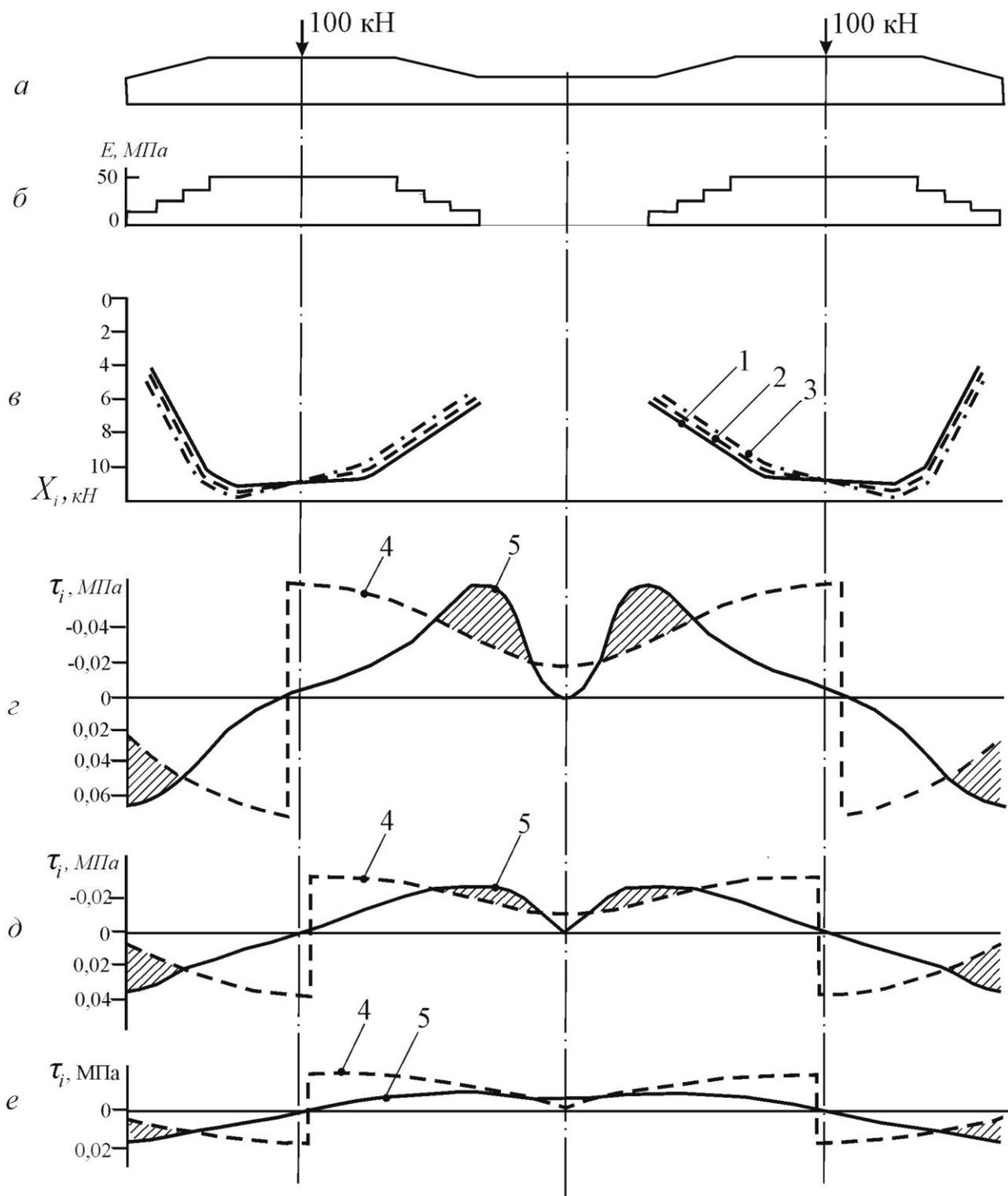
Коэффициент трения  $f_{об}$  можно определить в соответствии с углом внутреннего трения для основания под шпалами (брусьями), который может быть принят в пределах  $15-35^\circ$ . На уменьшение величины угла внутреннего трения в основании могут влиять засоренность, влажность, обводненность и структура основания, а также динамическое воздействие подвижных единиц.

Сравнение эпюр касательных (сдвигающих) напряжений и удельных сил трения в основании позволяет осуществлять оценку устойчивости частиц от смещения. На участках, где удельные силы трения превышают касательные (сдвигающие) напряжения, имеет место состояние устойчивости частиц от смещения. На участках, на которых касательные сдвигающие напряжения превышают удельные силы трения, происходит потеря устойчивости частиц основания, а следовательно, и перемещение этих частиц с последующим изменением качества связей между ними. При этом в основании происходит перераспределение величин плотности и жесткости, что вызывает дальнейшее изменение значений напряжений между зонами с устойчивым основанием ( $\tau_{zx} \leq c_{об}^3; \tau_{zy} \leq c_{об}^3$ ) и зонами, где имеются неустойчивые переходные процессы ( $\tau_{zx} > c_{об}^3; \tau_{zy} > c_{об}^3$ ).

Используя реактивный отпор (рис. 1) как внешнюю нагрузку для подшпального основания, определим осевые касательные напряжения  $\tau_{zy}, \tau_{zx}$ , на глубине  $h_i$ , а также удельные силы трения между частицами основания  $\tilde{n}_{об,i}$ . На рис. 4 и 5 показаны полученные эпюры касательных напряжений (кривая 4) и удельных сил трения (кривая 5) в дискретной среде соответственно для полного и частичного опирания шпал на основание.

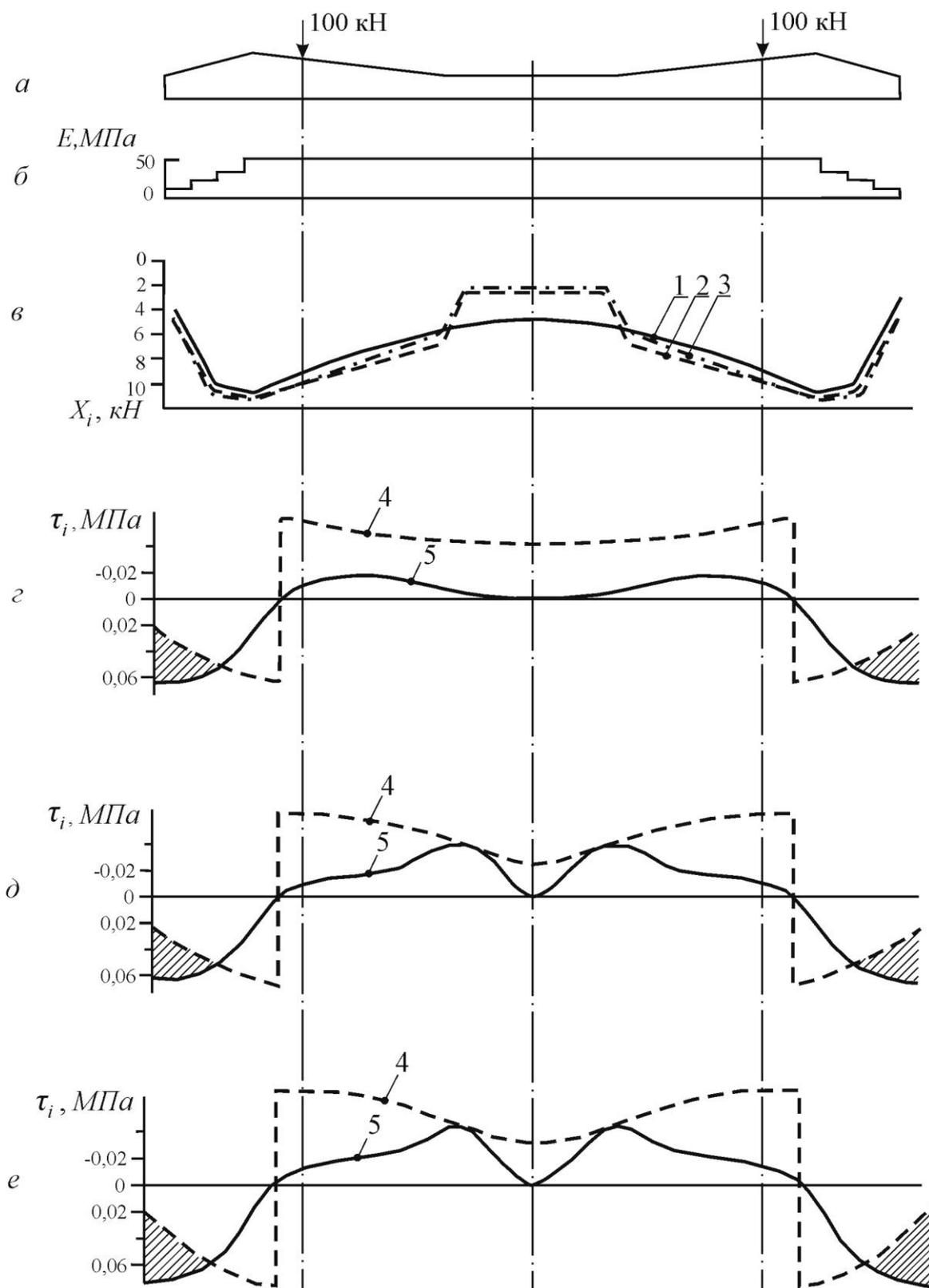
На рис. 4 и рис. 5 показаны эпюры нагрузок на основание, взятые из рис. 1. На рис. 4, г, д, е и рис. 5, г, д, е представлены эпюры для горизонтальных плоскостей, расположенных под шпалой на глубине  $h_i$ , равной соответственно 20, 45 и 60 см, показаны эпюры для конструкций шпал, которые отмечены на рис. 4, в и 5, в позициями 1, 2, 3. Угол внутреннего трения для подшпального основания принят равным  $15^\circ$ , а коэффициент трения соответственно 0,27. Эти данные соответствуют свойствам основания при воздействии вибрационной нагрузки, а также учитывают обводненность и засорение пылеватыми частицами. Допуская, что касательные напряжения в основании являются удельными сдвигающими силами, а удельные силы трения – такими же силами, препятствующими перемещению, можно определить стабильность частиц балласта в основании.

Из рис. 4 следует, что при опирании шпал только подрельсовыми частями сдвигающие силы и силы сопротивления под средней частью шпал распределяются таким образом, что до глубины 60 см от подошвы шпалы сдвигающие силы превосходят силы сопротивления. Под концами шпалы наблюдается аналогичное состояние, но в этом случае сдвигающие силы превосходят силы сопротивления и на глубине 60 см под шпалой.



*a* – вид шпалы сбоку; *б* – модуль упругости основания; *в* – нагрузка на основание; *г, д, е* – эпюры касательных напряжений (линия 4) и удерживающих сил трения (линия 5) на глубине соответственно 30, 45 и 60 см. Зоны неустойчивого состояния основания заштрихованы

Рисунок 4 – Эпюры удельных сдвигающих и удерживающих сил в основании при опирании шпал подрельсовыми частями



*a* – вид шпалы сбоку; *б* – модуль упругости основания; *в* – нагрузка на основание; *г*, *д*, *е* – эпюры касательных напряжений (линия 4) и удерживающих сил трения (линия 5) на глубине соответственно 20, 45 и 60 см. Зоны неустойчивого состояния основания заштрихованы

Рисунок 5 – Эпюры удельных сдвигающих и удерживающих сил в основании при опирании шпал по всей длине

В местах, где удельные сдвигающие силы превосходят удельные силы сопротивления, наблюдается сдвиг частиц в подшпальном основании. В результате перемещения частиц под воздействием нагрузки, вызванной действием ходовой части подвижного состава, происходит перераспределение плотности и жесткости основания как по длине шпалы, так и по глубине основания, что в свою очередь приводит к постепенному переходу от опирания шпал подрельсовыми частями к опиранию по всей длине с уменьшением плотности и жесткости основания под концевыми участками шпал. Это явление подтверждено эксплуатационными наблюдениями, согласно которым после прохождения 20 млн тонно-километров брутто груза в год канавка, устроенная в балласте под средними участками шпал, уже через два года эксплуатации заполняется балластом, поэтому описание осуществлялось по всей длине.

При опирании шпал на балласт по всей длине (рис. 5) удельные силы сопротивления под серединой шпалы превосходят удельные сдвигающие силы и продольный сдвиг частиц под средней частью шпал исключается. Под концами шпал при полном опирании так же, как в случае опирания подрельсовыми частями, удельные сдвигающие силы имеют большие значения, чем удельные силы сопротивления. Следовательно, в этих местах при балластном слое из сыпучих материалов трудно обеспечить стабильность подшпального основания.

В связи с постоянно изменяющимися условиями перемещения части балласта под шпалами происходит опирание шпал на основание по всей длине с тенденцией увеличения плотности и жесткости под средней подрельсовой частью шпал и уменьшения плотности и жесткости основания под их концевыми участками. Поэтому в расчетах шпал и основания необходимо предусмотреть пониженную плотность и жесткость балласта под концами шпал на протяжении около 25 см и увеличенную – в подрельсовых и среднем участках. При полном опирании шпал с ослабленным опиранием концевых участков, когда балласт обеспечивает ослабленное реактивное ее сопротивление, появляются значительные изгибающие моменты в средней части шпал, которые приводят к образованию трещин в этих местах. На обследуемом участке замечены шпалы с трещинами в верхнем поясе. Анализ силового и напряженно-деформированного состояний рельсового пути, и в особенности шпал и основания, показал, что расчет рациональной конструкции необходимо осуществлять с учетом совместной работы всех ее элементов. При этом отмечено, что один из возможных вариантов уменьшения изгибающего момента в средней части при нестабильном состоянии основания заключается в усовершенствовании формы площади опирания шпалы, а другой – в учете ослабленного опирания шпал на концевых участках с возможной компенсацией этого явления увеличением длины шпал.

Улучшение устойчивости частиц основания можно достигнуть также посредством ввода дополнительно к силам сопротивления от удельного трения

$\tilde{n}_{об.і}$  еще и удельных сил сцепления  $c_{НО.3}$ , образованных посредством уплотнения земляного полотна и балластного слоя.

На улучшение устойчивости частиц основания положительно будет влиять также увеличение бровки балластной призмы и ее уплотнение, так как будет увеличен пригруз с наружной стороны торца шпалы и уменьшено выдавливание частиц балласта из-под концевых участков шпал.

Представленная часть результатов расчетов позволяет оценить напряженно-деформированное состояние железобетонных шпал и основания при их взаимодействии, а также определить рациональные параметры и характеристики рассматриваемых элементов рельсового пути с максимальным приближением к эксплуатационным условиям их работы.

Таким образом, установлено, что переменная форма площади опирания шпал позволяет произвести перераспределение давления на основание и уменьшить величину изгибающего момента в 1,3–1,6 раза. При этом в концевых участках шпал балластный слой находится в неустойчивом положении, поскольку касательные напряжения превышают силы сопротивления перемещению.

#### **Выводы.**

1. Установлены зоны неустойчивого положения основания под шпалами при опирании подрельсовыми частями и непрерывном опирании шпал на основание. Получено, что неустойчивое положение основания образовывается из-за превышения удельных касательных напряжений над удельными напряжениями сопротивления сдвигу, состоящими из удельного трения и удельного сцепления между частицами в основании.

2. Установлено, что потеря устойчивости частиц балласта вызывает их перемещение в сторону действия сдвигающих удельных напряжений. В этих зонах происходит снижение плотности и жесткости подшпального основания. Это приводит к постепенному перераспределению реактивного отпора основания вдоль шпалы и в зависимости от этого перераспределения происходит изменение изгибающих моментов, действующих на шпалу.

3. Установлено, что при опирании шпал только подрельсовыми частями сдвигающие напряжения и силы, а также напряжения и силы сопротивления сдвигу под средней частью шпал распределяются таким образом, что до глубины 60 см от подошвы шпалы сдвигающие силы превосходят силы сопротивления. Это явление приводит к смещению частиц балласта под среднюю часть шпалы, уплотнению балласта и к опиранию шпал средней частью с возможным трещинообразованием. В концевых участках шпал имеет место также потеря устойчивости балласта.

4. Дана оценка напряженно-деформированного состояния железобетонных шпал и основания при их взаимодействии, а также определены рациональные параметры и характеристики элементов рельсового пути включительно шпалы и подшпальное основание с максимальным приближением к эксплуатационным условиям их работы.

5. Установлено, что переменная форма площади опирания шпал позволяет произвести перераспределение давления на основание и уменьшить величину изгибающего момента в 1,3–1,6 раза. При этом в концевых участках шпал балластный слой находится в неустойчивом положении, поскольку касательные напряжения превышают силы сопротивления перемещению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов М.П., Глотов П.В., Скородумов Г.Е. и др. Устройство и содержание пути узкой колеи / Под редакцией проф. М.П. Смирнова. М.: Транспорт, 1975. 296 с.
2. Вериго М.Ф., Крепкогорский С.С. Общие предпосылки для корректировки правил расчета железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил. Тр. ВНИИ ж. – д. трансп. 1972. Вып. 466, С. 4–50.
3. Говоруха В.В. Совершенствование рельсового пути и стрелочных переводов подземного транспорта. / Уголь Украины. 2013. № 3. С. 44-49.
4. Новиков Е.Е., Земляной Е.Ф., Говоруха В.В. и др. Динамика и прочность шахтных транспортных сосудов. Киев: Наук. Думка, 1983. 152 с.
5. Горбунов-Пасадов М.И., Маликов Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании / 3-е изд. Перераб. и доп. М: Стройиздат, 1984. 679 с.
6. Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник для вузов ж.д. трансп., М.: Транспорт, 1981. 320 с.

#### REFERENCES

1. Smirnov, M.P., Glotov, P.V., Skorodumov, G.E. [and others] (1975), *Ustroystvo i soderzhanie puti uzkoj kolei* [Narrow gauge track structure and maintenance], Transport, Moscow, SU.
2. Verigo, M.F. and Krepkogorskiy, S.S. (1972), "General prerequisites for adjusting the rules for calculating railway track strength and proposals for changing these rules", *Tr. VNI zh. – d. Transp*, no. 466, pp. 4–50.
3. Govorukha, V.V. (2013), "Improvement of the track and turnouts of underground transport", *Coal of Ukraine*, no. 3, pp.44–49.
4. Novikov, E.E., Zemlyanoy, E.F., Govorukha, V.V. [and others] (1983), in *Dinamika i prochnost shakhtnykh transportnykh sosudov* [Dynamics and strength of mine transport vessels], Naukova Dumka, Kyiv, SU.
5. Gorbunov-Pasadov, M.I., Malikov, T.A. and Solomin, V.I. (1984), *Raschet konstruktsiy na uprugom osnovanii* [Structural analysis on an elastic foundation], Stroyizdat, Moscow, SU.
6. Goldshteyn, M.N., Tsarkov, A.A. and Cherkasov, I.I. (1981), *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti: Uchebnik dlya vuzov zh.d. transp.* [Soil mechanics, foundations and foundations: Textbook for higher educational institutions of railway transport], Transport. Moscow, SU.

#### Об авторах

**Говоруха Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Говоруха Андрей Владимирович**, магистр, инженер отдела геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Кизилов Валентин Кондратьевич**, магистр, главный технолог отдела геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Собко Тамара Петровна**, магистр, главный конструктор отдела геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Семидетная Людмила Павловна**, магистр, ведущий инженер отдела геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

#### About the authors:

**Hovorukha Volodymyr Vasyliyovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Principal Researcher in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnipro, Ukraine, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Hovorukha Andrii Volodymyrovych**, Master of Science, Engineer in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnipro, Ukraine, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Kizilov Valentyn Kindratovich**, Master of Science, Chief Technologist in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnipro, Ukraine, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Sobko Tamara Petrivna**, Master of Science, Chief Designer in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnipro, Ukraine, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Semiditna Liudmyla Pavlivna**, Master of Science, Lead Engineer in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnipro, Ukraine, [igtm.rail.trans@gmail.com](mailto:igtm.rail.trans@gmail.com).

**Анотація.** У статті розглянута актуальна задача напруженого стану підшпальної основи і шпал рейкової колії з урахуванням питомих нормальних і питомих дотичних напружень при змінних умовах обпирання шпал на основу. Методологія роботи спрямована на визначення взаємного впливу нормальних (стискаючих) і дотичних (зсувних питомих напруг на формування стійкості від зсуву окремих частин основи і встановлення зон стійкості і зон зсуву часток підшпальної основи при різних умовах обпирання шпал на основу. Встановлено зони нестійкого становища баластної основи під шпалами при обпиранні підрейковими частинами і безперервному обпиранні шпал на основу. Отримано, що нестійке становище основи утворюється через перевищення питомих дотичних напружень над питомими напруженнями опору зрушенню що складаються з питомого тертя і питомого зчеплення між частинами в основі. Встановлено, що втрата стійкості частин баласту викликає їх переміщення в бік дії зсувних питомих напруг. У цих зонах відбувається зниження щільності і жорсткості підшпальної основи. Це призводить до поступового перерозподілу реактивного опору основи вздовж шпали і в залежності від цього перерозподілу виникає змінення і згинальних моментів, що діють на шпалу. Встановлено, що при закріпленні шпал тільки підрейковими частинами зсувні напруги і сили, а також напруги і сили опору зсуву під середньою частиною шпал розподіляються таким чином, що до глибини 60 см від підшви шпали зсувні сили перевершують сили опору. Це явище призводить до того зміщення чапсток баласту під середню частину шпали, ущільненню баласту і до того, що шпали спираються середньою частиною з можливим утворення тріщин. В кінцевих ділянках шпал має місце також втрата стійкості баласту. Дано рекомендації щодо підвищення показників стійкості підшпальної основи і міцності шпал. Отримані результати роботи передбачено застосовувати на гірському, промисловому і залізничному рейковому транспорті.

**Ключові слова.** рейкова колія, шпали, підшпальна основа, напруга, стійкість

**Annotation.** The live problem of the stress state of the sleeper base and rail sleepers is considered in the article with taking into account specific normal and specific shear stresses under variable conditions of the sleepers resting on the base. The methodology is aimed at the determination of the mutual influence of normal (compressive) and tangential (shear) specific stresses on formation of stability due to the displacement of individual parts of the base. Stability zones and shear zones of the sleeper base parts are also determined by the authors at different conditions of the sleeper resting on the base. Further, zones with insecure position of the base under the sleepers are found when they and their under-rail parts continuously rest on the base. It is stated that insecure position of the base is formed when specific shear stresses excess specific stresses of shear resistance, which consists of specific friction and specific cohesion between the parts in the base. It is also established that loss of stability of the ballast particles causes their displacement in the direction of the action of specific shear stresses. In these zones, density and rigidity of the sleeper base decreases leading to a gradual redistribution of reactive resistance of the base along the sleeper, and, depending on this redistribution, a change in the bending moments acting on the sleeper occurs. It is found that when the sleepers rest only by their under-rail parts, shear stresses and forces, as well as stresses and shear resistance forces under the middle part of the sleepers are distributed in such a way that shear forces exceed resistance forces up to the depth of 60 cm from the sleepers sole. This phenomenon leads to the displacement of ballast particles under the middle part of the sleeper, consolidation of the ballast and resting of the sleepers by their middle part with possible cracks formation. In the end sections of the sleepers, there is also a loss of ballast stability. Recommendations for improving stability indicators of the sleeper base and strength of the sleepers are given. The obtained results of the study can be used for the mine, industrial and railway transport.

**Keywords:** railway track, rail sleepers, sleeper base, stresses, stability

*Стаття надійшла до редакції 10.08. 2020*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук М.С. Четвериком*