

УДК 625.12 : 624.131.5

А. Ж. ЖАУЛЫБАЕВА, А. Г. КАСЫМ, Н. М. МАХМЕТОВА, С. Е. БЕКЖАНОВА
Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева,
Алматы, Казахстан

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО – СЛАБОЕ ОСНОВАНИЕ»

На основе метода конечных элементов исследуется статическое напряженное состояние системы «земляное полотно – слабое основание» при воздействии постоянной поездной нагрузки с целью практической оценки его устойчивости. Многовариантные численные эксперименты позволили установить закономерности распределения напряжений в теле земляного полотна с учетом упругих характеристик слабого основания.

Ключевые слова: земляное полотно, слабое основание, конечноэлементное моделирование.

При правильном проектировании, тщательном исполнении и нормальной эксплуатации земляного полотна железной дороги можно обеспечить его устойчивость даже в самых сложных условиях. Нагрузка на основную площадку земляного полотна от подвижного состава передается через шпалы и балластный слой. Земляное полотно и его основание неоднородны по составу грунтов и пород, что усложняет аналитическое решение задачи о распределении напряжений в грунтах [1]. Поэтому для изучения статического напряженного состояния земляного полотна и его основания используется численный метод – метод конечных элементов (МКЭ) [2–3].

Рассматривается задача об определении напряжений в теле земляного полотна и слабого основания при статических нагрузках. Исходное напряженное состояние материала земляного полотна под действием собственного веса принимается нулевым, и исследуется поле напряжений, вызванное весом верхнего строения пути и поездной нагрузки.

Принимается, что земляное полотно состоит из неоднородных слоев грунта с различными плотностными и упругими характеристиками. Линейные размеры поперечного сечения земляного полотна несопоставимы с его протяженностью, поэтому в его центральном сечении выполняется условие плоской деформации [4].

Упругое состояние изотропного земляного полотна при отсутствии остаточной деформации в условиях плоской деформации описывается уравнениями обобщенного закона Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E}, & \varepsilon_y &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}, & \varepsilon_z &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где E, ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала соответственно; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – осевые компоненты тензора деформаций; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – осевые компоненты тензора напряжений; τ_{xy}, γ_{xy} – сдвиговое напряжение и сдвиговая деформация в плоскости xu соответственно.

Деформации элемента представляются вектором

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\},$$

где

$$\left\{ \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\}. \quad (2)$$

Здесь u, v – проекции смещений точек на оси x и y соответственно.

Матрица жесткости элемента определяется двойным интегралом в виде

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] |\det[J]| t \, d\xi \, d\eta, \quad (3)$$

где $[B], [D], [J]$ – соответственно матрица деформаций конечного элемента (градиентов функций формы), матрица упругих постоянных и матрица Якоби перехода от локальных координат к глобальным; t – толщина конечного элемента.

Интеграл (3) вычисляется численно с использованием квадратур Гаусса – Лежандра

$$[k] = t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_i H_j [B]^T [D] [B] |\det[J]|, \quad (4)$$

где $H_i, H_j, (i = 1, 2, 3)$ – весовые коэффициенты; n – количество точек интегрирования по направлениям ξ и η .

Матрица жесткости системы $[K]$, формируется путем суммирования матриц жесткости элементов

$$[K] = \sum_{i=1}^m [k_i], \quad (5)$$

где m – общее количество элементов.

Имея матрицу жесткости системы $[K]$, можно получить систему уравнений равновесия, связывающую узловые силы с узловыми перемещениями

$$[K] \{U\} = \{R\}, \quad (6)$$

где $\{U\}$ и $\{R\}$ – соответственно векторы перемещений и сил, действующих на узлы.

При решении уравнений равновесия (6) используется метод прямого решения – метод исключения по Гауссу [5–6]. Процесс исключения по Гауссу

сводится к приведению матрицы коэффициентов уравнений к верхней треугольной форме, из которой неизвестные перемещения $\{U\}$ могут быть найдены обратной подстановкой.

На основе разработанного вычислительного алгоритма создан программный комплекс на языке ФОРТРАН для изучения статического напряженного состояния системы «земляное полотно – слабое основание».

В качестве расчетной модели принято земляное полотно на слабом основании в форме трапеции с наклоном боковых сторон в отношениях: $k_1 = 1:1,5$; $k_2 = 1:1,75$ и высотами $h_1 = 5,3$ м, $h_2 = 6,0$ м. Общая высота земляного полотна $h_{\text{сп}} = h_1 + h_2 = 11,3$ м, а с учетом высот дренирующего грунта и балластной призмы – 12,55 м. Земляное полотно железной дороги возведено на горизонтальной площадке. Основная площадка земляного полотна имеет ширину $b = 10,3$ м. Размер нижнего основания насыпи при принятых высотах и уклонах сторон составляет: $a = b + 2(k_1 \cdot h_1 + k_2 \cdot h_2) = 47,2$ м. Расчеты велись с учетом поездной нагрузки, передающейся от колеса на рельс, равной $P = 147$ кН.

При расчетах принято, что слабое основание и боковые стороны расчетной области жестко закреплены, т. е. в горизонтальном и вертикальном направлениях отсутствуют перемещения $U = V = 0$. Упругие характеристики грунта насыпи и основания, соответственно, равны: $E_1 = 80$ МПа, $\nu_1 = 0,3$; $E_2 = 20$ МПа, $\nu_2 = 0,4$. Расчетная область разбита на 371 изопараметрический четырехугольный квадратичный элемент с общим количеством узлов, равным 965. В пределах каждого элемента материал однороден.

Приведем некоторые результаты численного эксперимента по выявлению закономерностей распределения упругих статических напряжений и перемещений, возникающих в грунте системы «земляное полотно – слабое основание». На рисунках 1–4 представлены диаграммы изолиний напряжений σ_x и σ_y под действием заданной поездной нагрузки.

Анализ изолиний напряжений, приведенных на рисунках 1–4, показывает, что в примыкающем к нагрузке верхнем слое наблюдается концентрация напряжений до определенной глубины и деформирование основной площадки. Числовые величины, проставленные на изолиниях, соответствуют напряжениям в МПа.

Сравнительная оценка полученных результатов значений компонентов напряжений подтверждает влияние на напряженное состояние системы «земляное полотно – слабое основание» упругих характеристик слабого основания. Анализ полученных численных результатов позволяет сделать вывод о том, что резкое отличие в упругих характеристиках грунта слабого основания и вышележащего грунтового слоя приводит к концентрации напряжений.

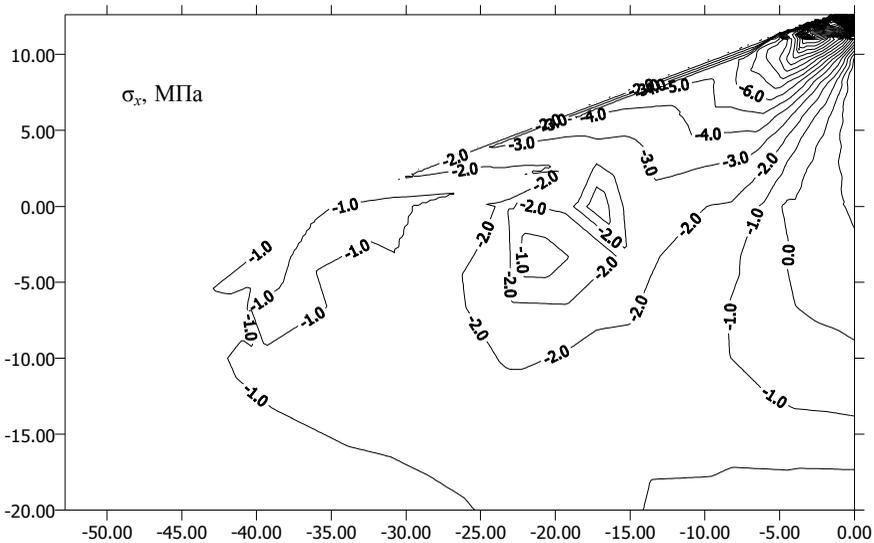


Рисунок 1 – Изолинии напряжений σ_x в теле земляного полотна и основания под действием поездной нагрузки при $E_1 = 80$ МПа, $\nu_1 = 0,3$; $E_2 = 80$ МПа, $\nu_2 = 0,3$

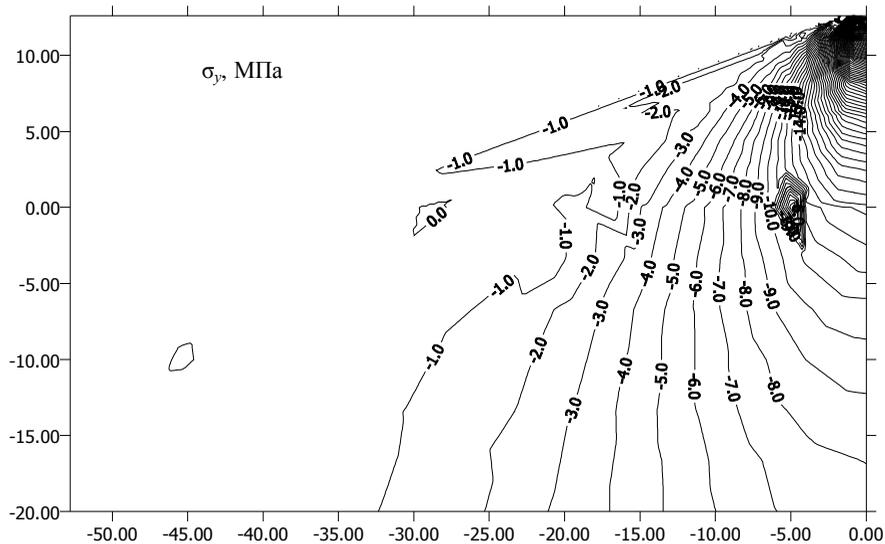


Рисунок 2 – Изолинии напряжений σ_y в теле земляного полотна и основания под действием поездной нагрузки при $E_1 = 80$ МПа, $\nu_1 = 0,3$; $E_2 = 80$ МПа, $\nu_2 = 0,3$

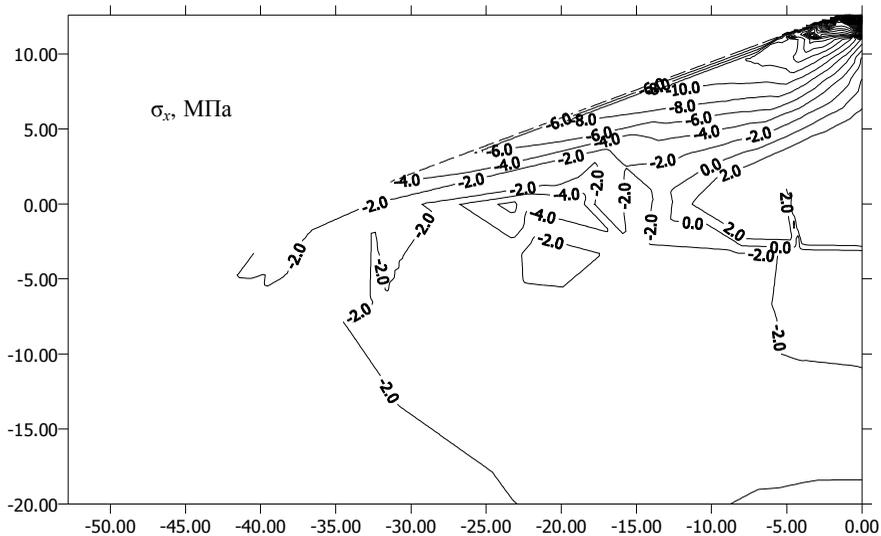


Рисунок 3 – Изолинии напряжений σ_x в теле земляного полотна и основания под действием поездной нагрузки при $E_1 = 80$ МПа, $\nu_1 = 0,3$; $E_2 = 20$ МПа, $\nu_2 = 0,4$

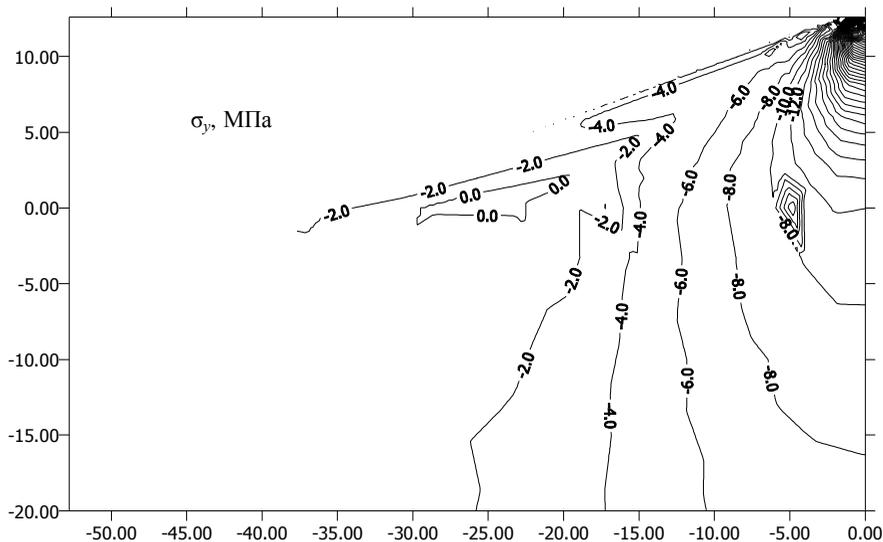


Рисунок 4 – Изолинии напряжений σ_y земляного полотна и слабого основания под действием поездной нагрузки при $E_1 = 80$ МПа, $\nu_1 = 0,3$; $E_2 = 20$ МПа, $\nu_2 = 0,4$

Для усиления верхней части земляного полотна предлагается использовать геотекстиль [7], который значительно увеличивает несущую способность грунтов. Его рационально укладывать на таких участках пути, основания которых сложены из недостаточно прочных грунтов, а также имеющих различную жесткость верхнего строения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Смолин, Ю. П.** Динамическое воздействие поездов на земляное полотно / Ю. П. Смолин // Известия Транссиба. – 2013. – № 1(13). – С. 94–100.

2 **Омаров, А. Д.** Исследование напряженно-деформированного состояния железнодорожных насыпей на наклонном основании / А. Д. Омаров // Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных сооружений : межвузовский сборник научных трудов. – 2014. – Вып. 2. – С. 3–9.

3 **Омаров, А. Д.** Исследование устойчивости железнодорожных насыпей на горизонтальном основании / А. Д. Омаров // Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных сооружений : межвузовский сборник научных трудов. – 2015. – Вып. 3. – С. 12–22.

4 **Безухов, Н. М.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. М. Безухов. – М. : Высшая школа, 1969. – 512 с.

5 **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

6 **Бате, К.** Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.

7 **Güler, E.** Evaluation of the Geosynthetic Reinforcement on Railroad Subgrade / E. Güler, S. K. Khosrowshahi // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – P. 721–728.

*A. Zh. ZHAULYBAYEVA, A. G. KASYM, N. M. MAKHMETOVA,
S. E. BEKZHANOVA*

Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan

CALCULATION OF STATIC STRESSED STATE OF THE "EARTH BED – WEAK BASE" SYSTEM

On the basis of the finite element method, there is investigated the static stressed state of the "earth bed – weak base" system under the influence of a constant train load with a view to practical evaluation of its stability. Multivariate numerical experiments made it possible to establish the regularities of stresses distribution in the earth bed body considering the elastic characteristics of the weak base.

Получено 13.02.2018