

УДК 551.24:551.4.035

**ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНОГО МАССИВА
В ОКРЕСТНОСТИ УСТУПА СКЛОНА ГОРЫ**

Б. Жумабаев, Ж.А. Баялиева

Приведены результаты исследования качественных законов деформированного состояния массива вблизи уступов склона горы в условиях раздельного и совместного действия гравитационных, горизонтальных тектонических сил и приложенных на контуре уступа склона горы внешних нагрузок.

Ключевые слова: уступы склона горы; гравитационная сила; тектоническое сжатие; математическое моделирование; деформация; поля напряжений; поверхностная нагрузка.

STRAIN STATE OF ROCK MASS IN THE VICINITY CONCEDED MOUNTAINSIDE

B. Jumabaev, J.A. Bayaliev

It is given the results of research quality laws strain state of benches near the mountainside in a separate and joint action of gravity, horizontal tectonic forces and applications on the circuit bench mountainside external loads.

Key words: benches mountainside; the gravitational force; tectonic compression; mathematical modeling; deformation; stress field; surface load.

Модель напряженного состояния уступа склона горы в работах [1–5] создана в виде суммы четырех полей напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x^n + \sigma_x + \sigma_x^T + \sigma_x^N, \\ \sigma_y &= \sigma_y^n + \sigma_y^C + \sigma_y^T + \sigma_y^N, \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^n + \tau_{xy} + \tau_{xy}^T + \tau_{xy}^N, \end{aligned} \quad (1)$$

где первые слагаемые с индексом “n” сверху для полуплоскости имеют вид:

$$\sigma_x^n = \lambda \cdot \rho_y \cdot y + T_x, \quad \sigma_y^n = \rho_y \cdot y, \quad \tau_{xy}^n = \rho_x \cdot y, \quad (2)$$

где $\rho_E = -\lambda \sin \delta$ – горизонтальная составляющая; $\rho_C = -\gamma(1 - A_A \sin \delta)$ – вертикальная составляющая объемной силы. Ось OX горизонтальная, OY – вертикальная. Объемный вес γ горных пород и ось OY направлены противоположно; y – глубина точки массива от дневной поверхности массива. Компоненты напряжений в (1) с индексами “T”, “N” сверху обозначают поля напряжений вблизи уступа склона горы, которые вычисляются с помощью комплексных потенциалов:

$$\begin{aligned} \Phi(\zeta) \cdot \omega'(\zeta) + G(\zeta) &= A(\zeta), \\ \Psi(\zeta) \cdot \omega'(\zeta) + \Phi(\zeta) \cdot \overline{\omega}(\zeta) + \\ + \Phi'(\zeta) \cdot \overline{\omega}'(\zeta) - G(\zeta) &= B(\zeta), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{где } A(\zeta) &= -\frac{1}{2\pi t} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(N+iT)\overline{\omega}'(t)}{t-\zeta} dt, \\ B(\zeta) &= -\frac{1}{2\pi t} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(N-iT)\omega'(t)}{t-\zeta} dt, \end{aligned} \quad (4)$$

N и T – нормальные и касательные составляющие внешних нагрузок, приложенных в произвольной точке контура $\zeta = t$ склона горы с уступами.

$$\begin{aligned} A(\xi, \eta) &= AG(\xi, \eta) + AT(\xi, \eta) + AN(\xi, \eta), \\ B(\xi, \eta) &= BG(\xi, \eta) + BT(\xi, \eta) + BN(\xi, \eta). \end{aligned} \quad (5)$$

В этом случае интегралы A(ζ) и B(ζ) в (4) вычислены от таких фиктивных нагрузок N и T, которые имеют вид

$$\begin{aligned} N^\pi + iT^\pi &= \frac{\sigma_x^\pi + \sigma_y^\pi}{2} + \frac{(\sigma_y^\pi - \sigma_x^\pi + 2i\tau_{xy})}{2} e^{2i\alpha}, \\ N^\pi - iT^\pi &= \frac{\sigma_x^\pi + \sigma_y^\pi}{2} + \frac{(\sigma_y^\pi - \sigma_x^\pi - 2i\tau_{xy})}{2} e^{-2i\alpha}. \end{aligned} \quad (6)$$

Вычисленные значения интегралов (4) от граничных условий (6) обозначены через AG(ζ) и BG(ζ), и записываются компактно в виде

$$AG(\zeta) = \left[\frac{T_3 \sum_{k=1}^n a_k}{(\zeta + t_{ok} - i)} \right] \times \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_j}{(\zeta + t_{ok} - i)^2} \right] +$$

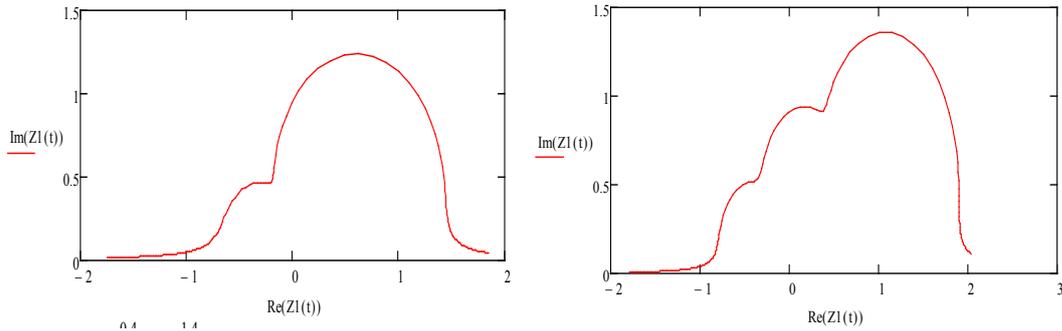


Рисунок 1 – Склон горы с одним и двумя уступами

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{j=1}^n a_j \left[\frac{(a - T_{1j})(A_3 + iA_2)}{2(\zeta + t_{0j} - i)} + \frac{T_3 T_{2j}}{(\zeta + t_{0j} - i)^2} \right], \\
 BG(\zeta) &= \left[\frac{\bar{T}_4 \sum_{r=k=1}^n a_k}{(\zeta + t_{ok} - i)} \right] \times \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_j}{(\zeta + t_{0j} - i)^2} \right] + \\
 & + \sum_{j=1}^n a_j \left[\frac{(a - T_{1j})(A_3 + iA_2)}{2(\zeta + t_{0j} - i)} + \frac{T_3 T_{2j}}{(\zeta + t_{0j} - i)^2} \right]. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Действие горизонтальной тектонической силы T_x приводит к распределению напряжений $\sigma_x^T, \sigma_y^T, \tau_{xy}^T$, которые удовлетворяют граничным условиям:

$$N^n + iT^n = -\frac{T_x}{2} [1 - e^{2i\alpha}], \quad N^n - iT^n = -\frac{T_x}{2} [1 - e^{-2i\alpha}], \quad (8)$$

Вычисленные по (7) интегралы имеют вид:

$$\begin{aligned}
 AT(\zeta) &= T_1 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n a_j}{(\zeta + t_{0j} - i)^2}, \quad BT(\zeta) = -T_1 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n a_j}{(\zeta + t_{0j} - i)^2}, \\
 T_1 &= \frac{T_\infty}{2}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Интегралы (4) от поверхностных нагрузок N обозначены через $AN(\zeta)$ и $BN(\zeta)$, и принимают следующий вид:

$$AN(\zeta) = \frac{P_0}{2\pi i} \left\{ \ln \frac{t_2 - \zeta}{t_1 - \zeta} + \frac{\bar{a}_1 T_{11}}{(\zeta + i)^2} + \frac{\bar{a}_1 T_{12}}{\zeta + i} + \frac{\bar{b}_1 I_{22}}{(\zeta + t_b + i)} + \frac{\bar{b}_1 I_{21}}{(\zeta + t_b + i)^2} \right\}$$

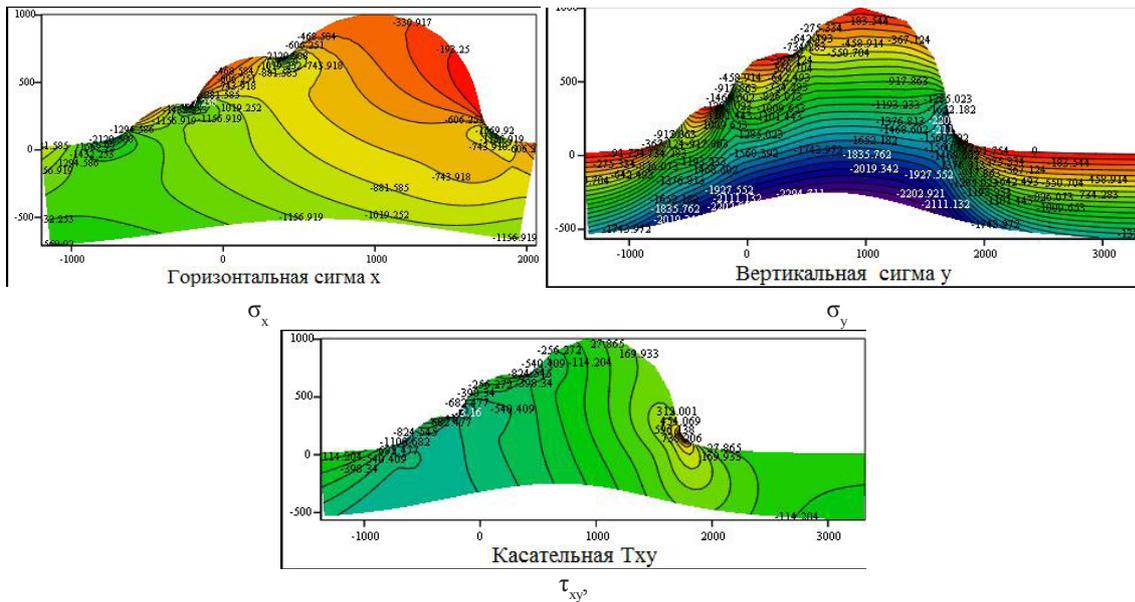
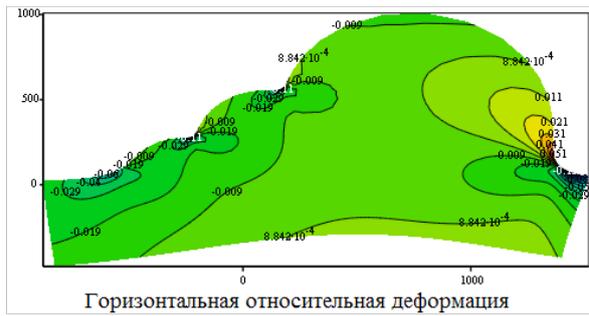
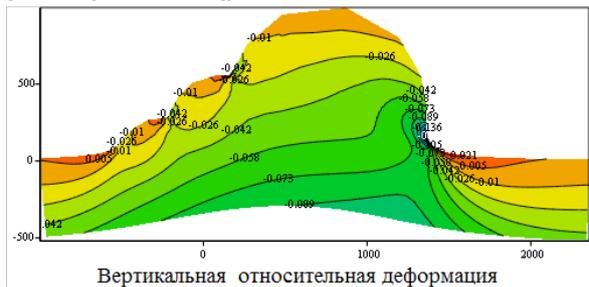


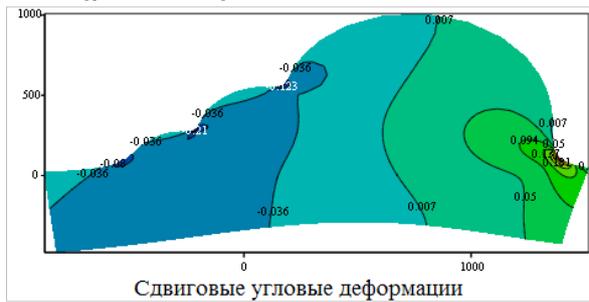
Рисунок 2 – Распределение напряжений в склоне горы с двумя уступами при действии силы гравитации



(CreateMesh(fx, -5, 9, 0, -4, 76, 36))



CreateMesh(fy, -6, 16, 0, -4, 56, 36)



CreateMesh(fxy, -5, 9, 0, -4, 76, 36)

Рисунок 3 – Распределения деформаций при действии силы гравитации

$$BN(\zeta) = \frac{P_0}{2\pi i} \left\{ \ell n \frac{t_2 - \zeta}{t_1 - \zeta} + \frac{a_1 T_{11}}{(\zeta - i)^2} + \frac{a_1 T_{12}}{\zeta - i} + \frac{b_1 I_{22}}{(\zeta + t_b - i)^2} + \frac{b_1 I_{21}}{(\zeta + t_b - i)} \right\} \quad (10)$$

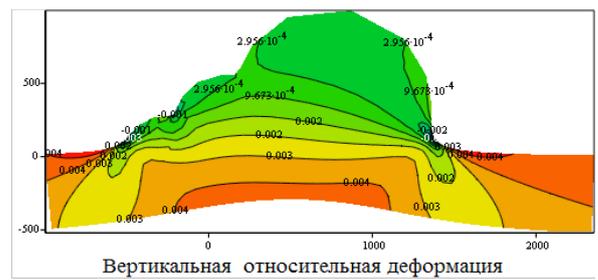
Для моделирования уступов склона горы использована отображающая функция типа

$$Z = \omega(\zeta) = \alpha\zeta + \sum_{k=1}^m \frac{a_k}{\zeta + t_{0k} - i}, \quad (11)$$

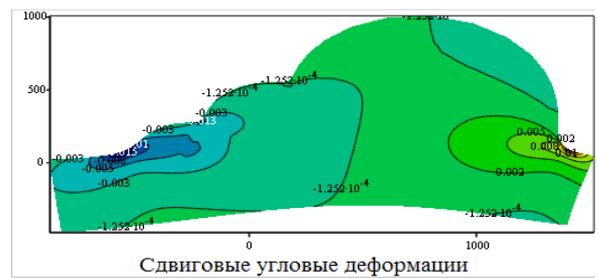
где m – количество выступов на границе полуплоскости $y \leq 0$; α и $t_{ок}$ – действительные постоянные, a_k – комплексные постоянные.



(CreateMesh(fx, -5, 9, 0, -4, 76, 36))



CreateMesh(fy, -6, 16, 0, -4, 56, 36)

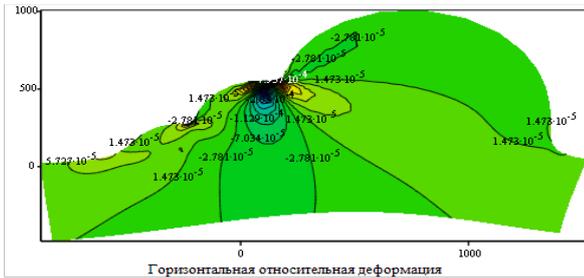


CreateMesh(fxy, -5, 9, 0, -4, 76, 36)

Рисунок 4 – Распределение деформаций под действием тектонической силы

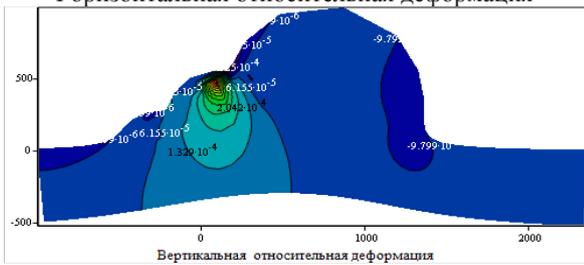
На рисунке 1, а, б представлены одно- и двух-ступенные склоны горы, когда в (1) $m = 2$ и $m = 3$, и использованы графические операторы MATCAD.

В качестве примера выполнен расчет для склона горы с двумя уступами в условиях действия только силы гравитации. На рисунке 2 представлены результаты напряжений, когда склон горы имеет два выступа и высоту $H = 1000$ м. Величина тектонической силы заранее неизвестна и задается условно. Вертикальные усилия N , приложенные на поверхности уступа на конечном отрезке, изменяются в широких пределах. Если в уступе расположена полоса дороги, то величина веса нагруженного транспорта или состава вагона служат величиной N . Поэтому при расчете деформированного состояния вблизи уступов склона горы задан условные величины нагрузок и гипотетические деформационные упругие свойства массива. Для



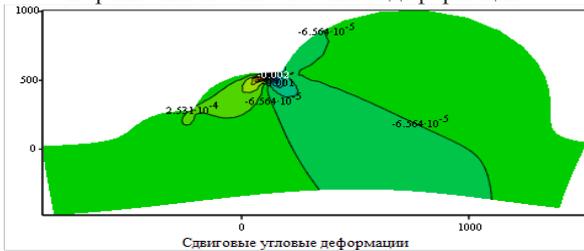
(CreateMesh(fx, -5, 9, 0, -4, 76, 36))

Горизонтальная относительная деформация



CreateMesh(fy, -6, 16, 0, -4, 56, 36)

Вертикальная относительная деформация



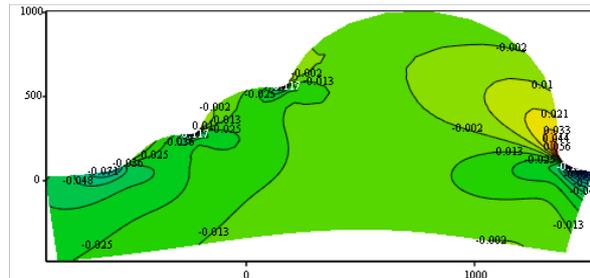
CreateMesh(fxy, -5, 9, 0, -4, 76, 36)

Сдвиговые угловые деформации

Рисунок 5 – Распределения деформаций при действии вертикальной внешней нагрузки

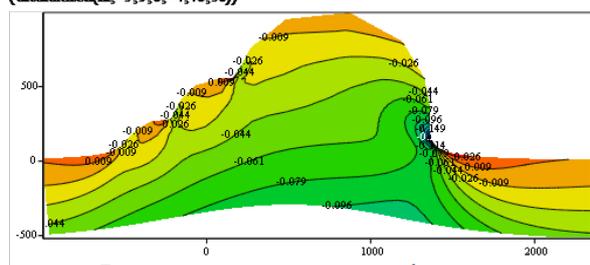
расчета принимаем следующие параметры: модуль Юнга равен $E = 2.2 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$; боковой распор горных пород $\lambda = 0.4$; тектоническое сжатие $T_x = -50$ МПа; вертикальная внешняя нагрузка $N = -200$ МПа. Используем закон Гука в следующем виде:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy}(x, y) &:= \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{2.2 \cdot 10^4} \cdot \tau_{xy}(x, y), \\ \epsilon_x(x, y) &:= \frac{1}{2.2 \cdot 10^4} \cdot (\sigma_x(x, y) - \nu \cdot \sigma_y(x, y)), \\ \epsilon_y(x, y) &:= \frac{1}{2.2 \cdot 10^4} \cdot (\sigma_y(x, y) - \nu \cdot \sigma_x(x, y)). \end{aligned} \quad (12)$$



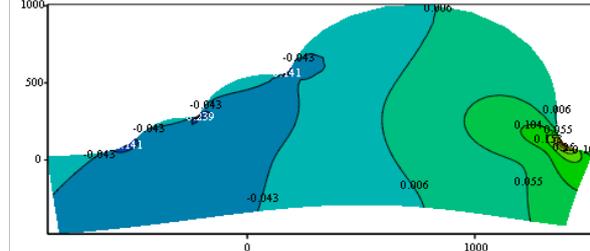
(CreateMesh(fx, -5, 9, 0, -4, 76, 36))

Горизонтальная относительная деформация



CreateMesh(fy, -6, 16, 0, -4, 56, 36)

Вертикальная относительная деформация



CreateMesh(fxy, -5, 9, 0, -4, 76, 36)

Рисунок 6 – Распределения деформаций при совместном действии нагрузок

$$\begin{aligned} f_x(\xi, \eta) &:= \begin{pmatrix} X(\xi, \eta) \\ Y(\xi, \eta) \\ \epsilon_x(\xi, \eta) \end{pmatrix} & f_y(\xi, \eta) &:= \begin{pmatrix} X(\xi, \eta) \\ Y(\xi, \eta) \\ \epsilon_y(\xi, \eta) \end{pmatrix} \\ f_{xy}(\xi, \eta) &:= \begin{pmatrix} X(\xi, \eta) \\ Y(\xi, \eta) \\ \gamma_{xy}(\xi, \eta) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

На рисунках 3–6 показаны изолинии распределения деформаций в условиях раздельного и совместного действия гравитационных, горизонтальных тектонических сил и приложенных на контуре уступа склона горы внешних нагрузок.

Литература

1. Жумабаев Б., Баялиева Ж.А. Начальное напряженное состояние массивов пород у основания дорог, расположенных в склоне гор / Б. Жумабаев, Ж.А. Баялиева // Матер. межд. конф., посв. 70-летн. юбилею дважды героя соц. труда А. Таштанбекова // Вестник КАУ. 2008. № 3 (11). С. 357–361.
2. Жумабаев Б., Баялиева Ж.А. Методика расчета напряженно-деформированного состояния массивов у основания дорог, расположенных на горном склоне / Б. Жумабаев, Ж.А. Баялиева // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2008. № 14. С. 206–210.
3. Жумабаев Б., Баялиева Ж.А. Концентрация напряжений вблизи уступов, расположенных в склоне гор / Б. Жумабаев, Ж.А. Баялиева // Научн. ж. Казахского Нац. аграрн. ун-та. 2011. № 1(049). С. 139–144.
4. Жумабаев Б., Баялиева Ж.А., Исмаилова К.Д. Напряженное состояние у оснований дорог, расположенных в склоне гор / Б. Жумабаев, Ж.А. Баялиева, К.Д. Исмаилова // Современные проблемы механики сплошных сред: матер. межд. конф. “Проблемы геомеханики и освоения недр”. Бишкек, 2011. № 13. С. 300–309.
5. Жумабаев Б., Баялиева Ж.А. Напряженное состояние склона с уступами от действия распределенной на уступах нагрузки / Б. Жумабаев, Ж.А. Баялиева // Матер. IV межд. науч. конф. “Актуальные проблемы механики и машиностроения”. Алматы, 2014. С. 142–159.