

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 CONCEDING 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  $\gamma$  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

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

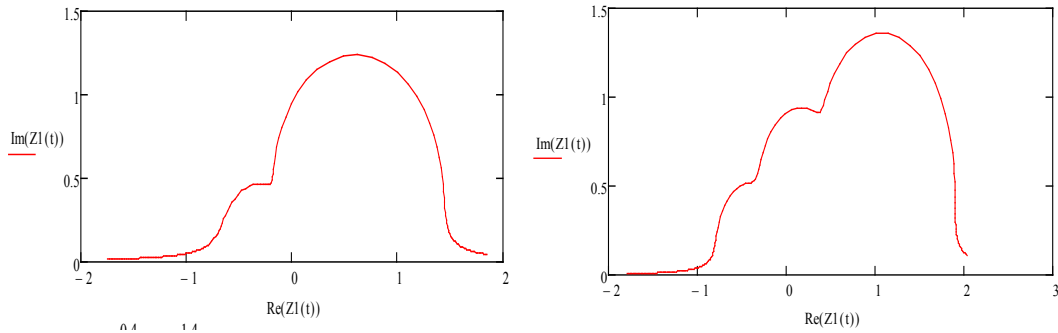


Рисунок 1 – Склон горы с одним и двумя уступами

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

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:

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

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

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

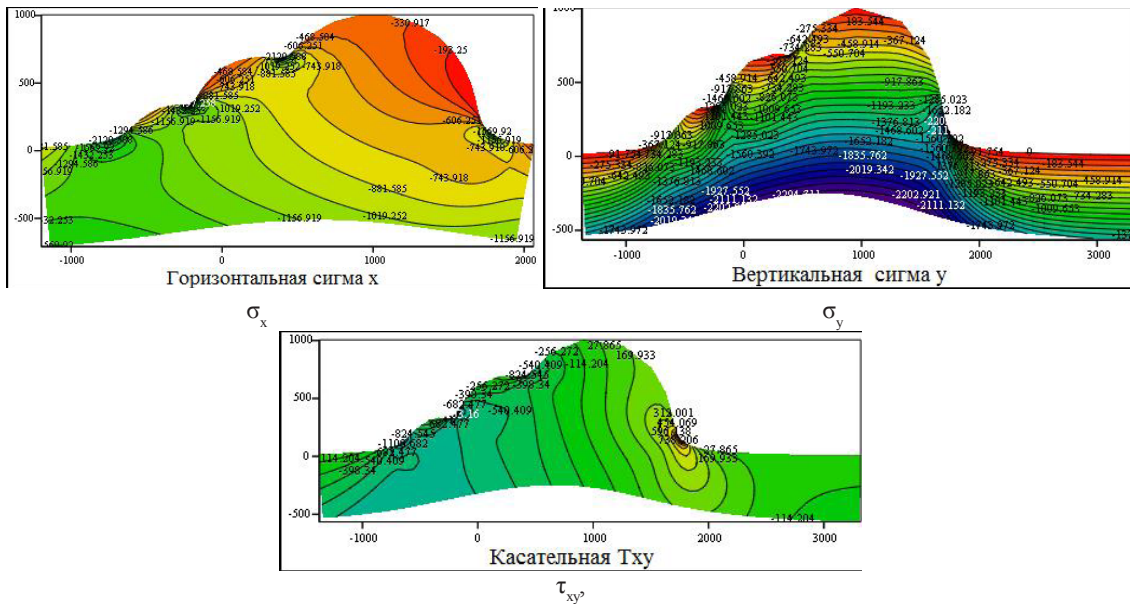
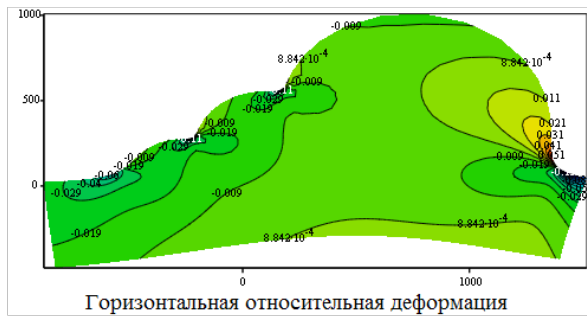
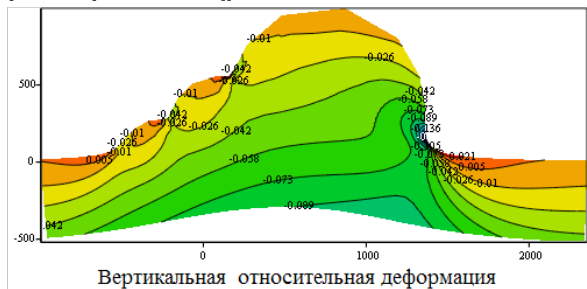


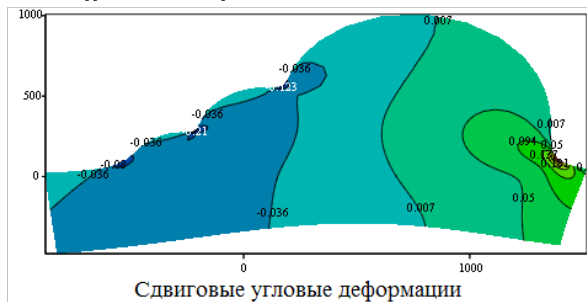
Рисунок 2 – Распределение напряжений в склоне горы с двумя уступами при действии силы гравитации



(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

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

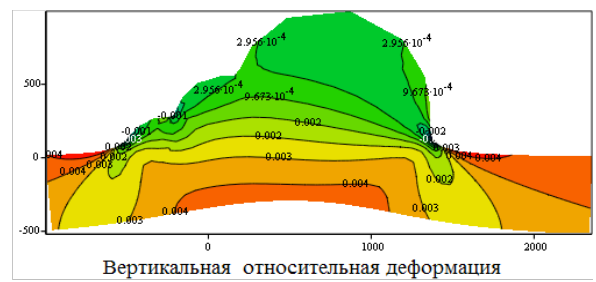
Для моделирования уступов склона горы использована отображающая функция типа

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

где  $m$  – количество выступов на границе полуплоскости  $y \leq 0$ ;  $\alpha$  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)

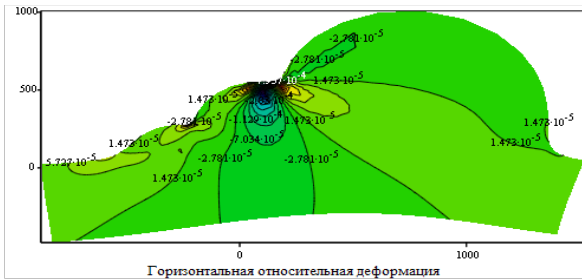


CreateMesh(fxy, -5, 9, 0, -4, 76, 36)

Рисунок 4 – Распределение деформаций под действием тектонической силы

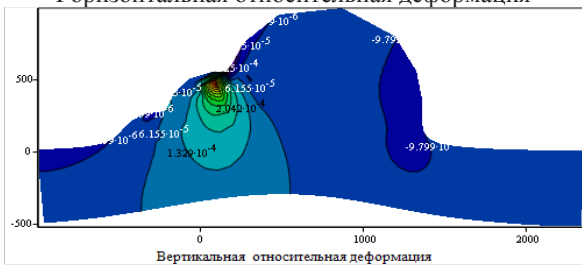
На рисунке 1, а, б представлены одно- и двух-ступенные склоны горы, когда в (1)  $m = 2$  и  $m = 3$ , и использованы графические операторы MATCAD.

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



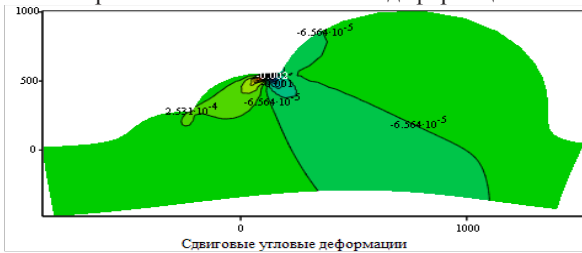
(CreateMesh(fx, -5, 9, 0, -4, 76, 36))

Горизонтальная относительная деформация



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

Вертикальная относительная деформация



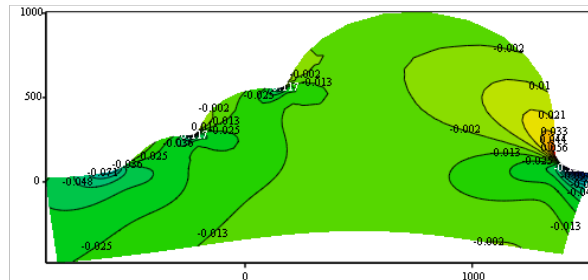
CreateMesh(fxy, -5, 9, 0, -4, 76, 36)

Сдвиговые угловые деформации

Рисунок 5 – Распределения деформаций при действии вертикальной внешней нагрузки

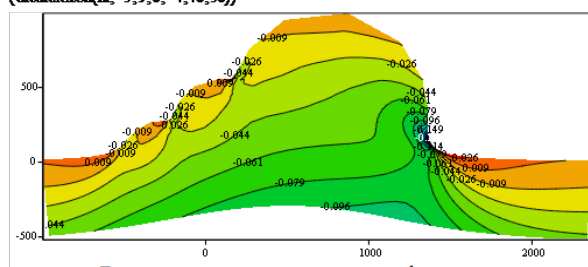
расчета принимаем следующие параметры: модуль Юнга равен  $E = 2.2 \cdot 10^4$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0.3$ ; боковой распор горных пород  $\lambda = 0.4$ ; тектоническое сжатие  $T_x = -50$  МПа; вертикальная внешняя нагрузка  $N = -200$  МПа. Используем закон Гука в следующем виде:

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



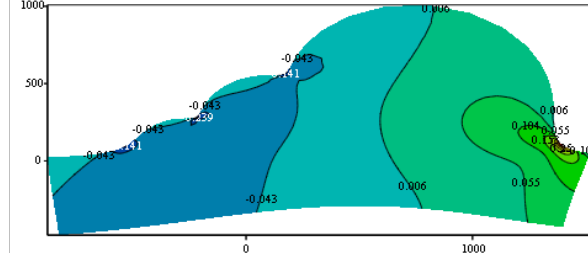
(CreateMesh(fx, -5, 9, 0, -4, 76, 36))

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.