

**Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика**

Баялиева Ж.А., кандидат технических наук, старший преподаватель

Ботоканова Б.А., старший преподаватель

(Кыргызский национальный аграрный университет (КНАУ) им. К.И. Скрябина)

Жумабаев Б., доктор технических наук, профессор Кыргызско-Российского славянского университета им. Б.Н. Ельцина

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО
И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАПОРНЫХ ТУННЕЛЕЙ
В МАССИВЕ ВБЛИЗИ РЕЧНОГО КАНЬОНА**

В статье дано закономерности распределения напряжений вокруг туннелей овальным или треугольными поперечными сечениями, когда туннель находится под напором воды и в зоне влияния речного каньона.

Ключевые слова: речной каньон, гравитация, тектоническое сжатие, гидростатический напор, деформация, напряжения, конформное отображение, упругость.

Bayaliev J.A.

Botokanova B.A.

Jumabaev B.

**MODELLING AND CALCULATION OF THE STRAINED
AND DEFORMED CONDITION OF PRESSURE HEAD TUNNELS
IN THE MASSIF NEAR THE RIVER CANYON**

The article gives the patterns of stress distribution around tunnels with oval or triangular cross sections, when the tunnel is under pressure of water and in the zone of influence of the river canyon.

Keywords: rechny canyon, gravitation, tectonic compression, hydrostatic pressure, deformation, tension, conformal display, elasticity.

Введение. Для расчета распределения напряжений вокруг напорных туннелей в горной местности [1], прежде всего, необходимо знать начальное напряженное состояние горного массива [2–6], при отсутствии туннеля. Это начальное напряженное состояние формируется при совместном действии гравитационных [7–11], сейсмических инерционных [2, 3, 11], горизонтальных тектонических сил [11, 13] и распределяется в зависимости от формы конкретного рельефа массива. Методом «разгрузки» измеренные величины начального напряженного состояния массивов в разных районах земной коры [5] указывают наличие в массиве, кроме напряжений от силы гравитации, так называемые «тектонические» напряжения, которые в большинстве случаев являются горизонтально сжимающими. Когда известно начальное напряженное состояние массива в центре воображаемого туннеля, то для оценки напряженного состояния массивов вокруг напорных туннелей необходимо дополнительно установить влияние образования туннеля на распределение напряжений вокруг туннелей и влияния гидростатического напора на перераспределения напряжений. Таким образом, методом Колосова-Мухелишвили [13] как при оценке напорного туннеля с эллиптическим (круглым) сечением

[14] будем моделировать и выполнять расчет напорных туннелей некоторых форм, находящихся вблизи речного каньона [7, 8, 11, 15, 16]. Следует отметить, что ранее в [15] исследователем Г. Нейбером исследована полуплоскость с вырезом при горизонтальном одноосном растяжении и сжатии, в работе [16] рассмотрено действие на контур каньона распределенной нагрузки с треугольной эпюрой. Каньон в поле сил гравитации изучен в работах [7, 8]. В отличие от работ [7, 8, 15, 16] ниже рассмотрены массивы каньона в поле действия объемных сил и горизонтального тектонического сжатия. В отличие от работ в [17] рассмотрены туннели в зоне каньона, где учитываются совместные действия силы гравитации, тектонического сжатия и гидростатического напора воды на контур туннелей с овальным, или треугольными сечениями. Используется передовая технология расчета и графического оформления результатов расчета полей напряжений и деформаций вокруг туннелей в MATCHAD [19].

Модель напряженного состояния массивов пород вокруг туннеля с овальным или треугольным сечением в зоне речного каньона в рамках метода [15] создается в виде суммы полей напряжений:

$$\sigma_x^0 = \sigma_x^n + \sigma_x^p + \sigma_x^m + \sigma_x'', \quad \sigma_y^0 = \sigma_y^n + \sigma_y^p + \sigma_y^m + \sigma_y'', \quad \tau_{xy}^0 = \tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m + \tau_{xy}''. \quad (1)$$

Первые компоненты в (1), интегралы от дифференциальных уравнений равновесия [2], представлены в виде:

$$\sigma_x^n = A_1 * y + T_x; \quad \sigma_y^n = A_2 y; \quad \tau_{xy}^n = A_3 y, \quad (2)$$

где $A_1 = \lambda * \gamma * (1 - k_c * \cos \delta)$; $A_2 = \gamma * (1 - k_c * \cos \delta)$; $A_3 = k_c * \gamma * \sin \delta$.

λ – коэффициент бокового распора горных пород;

γ – объемный вес горных пород;

k_c – коэффициент сейсмичности горного региона;

δ – направление действия сейсмической силы;

T_x – горизонтальная тектоническая сила.

Напряжения σ_x^p , σ_y^p , τ_{xy}^p – поля напряжений, которые характеризуют влияния рельефа горы [11], которые вместе с первым полем определяют начальное напряженное состояние массивов каньона без туннеля и имеют вид:

$$\sigma_x'' = \sigma_x^n + \sigma_x^p \quad \sigma_y'' = \sigma_y^n + \sigma_y^p \quad \tau_{xy}'' = \tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p. \quad (3)$$

Поля напряжений (3) на дневной поверхности массива каньона удовлетворяют граничным условиям:

$$(\sigma_x^p + \sigma_x^n + T_x) * \cos(n, x) + (\tau_{xy}^p + \tau_{xy}^n) \cos(n, y) = 0; \quad (4)$$

$$(\tau_{xy}^p + \tau_{xy}^n) \cos(n, x) + (\sigma_y^p + \sigma_y^n) \cos(n, y) = 0.$$

где n – направление внешней нормали в какой-либо точке контура.

Рельеф каньона в разрезе представляет полуплоскость с одним криволинейным вырезом. Для определения напряжений в (3) воспользуемся аппаратом конформного отображения с помощью функции:

$$z = \omega(\zeta); z = x + i * y; \zeta = \xi + i * \eta; i = \sqrt{-1}; \omega(\zeta) = a * \zeta + \omega_0(\zeta); \omega_0(\zeta) = a_1 / (\zeta - i). \quad (5)$$

Присвоив численные значения параметрам $a = 340$; $a_1 = -300$ м с помощью функции (5) построена форма выреза-каньона, представленная на рис. 1.

Интегрируя граничные условия (4) в преобразованной криволинейной системе координат в (5) определены функции [2]:

$$\Phi(\zeta) \cdot \omega'(\zeta) + G(\zeta) = B(\zeta) \quad G(\zeta) = -a_1 \overline{\Phi_1(i)} / [\zeta - i];$$

$$\Psi(\zeta) \cdot \omega'(\zeta) + \Phi(\zeta) \cdot \overline{\omega'(\zeta)} + \Phi'(\zeta) \cdot \overline{\omega(\zeta)} - \overline{G(\zeta)} = A(\zeta), \quad (6)$$

через которые выражается второе поле напряжений в (3) с помощью формул

$$\sigma_\xi + \sigma_\eta = 2(\Phi(\zeta) + \overline{\Phi(\zeta)}) \quad \sigma_\eta - \sigma_\xi + 2i\tau_{\xi\eta} = 2(\overline{\omega(\zeta)}\Phi(\zeta)' + \omega(\zeta)'\overline{\Psi(\zeta)}) / \overline{\omega(\zeta)'}. \quad (7)$$

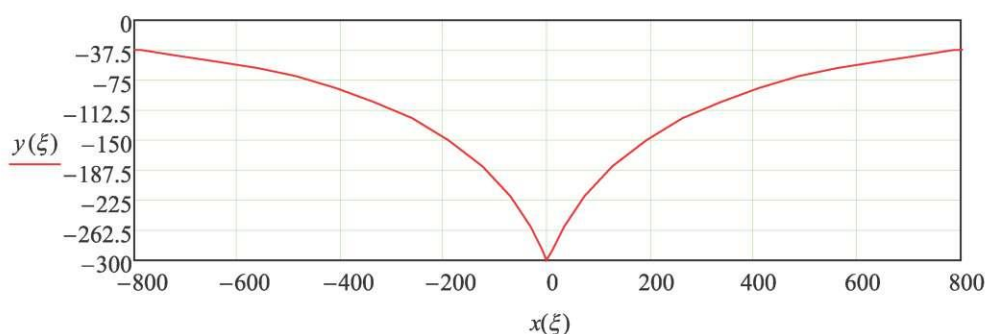


Рис. 1. Форма каньона

В (6) обозначены:

$$\begin{aligned}
 A(\xi, \eta) &= \omega_0(\xi, \eta) \left[T_5 + T_6 \omega_0'(\xi, \eta) \right] + T_3 C(\xi, \eta) + At(\xi, \eta) - T_6 S(\xi, \eta) \\
 B(\xi, \eta) &= T_3 \omega_0(\xi, \eta) \omega_0'(\xi, \eta) + T_2 \omega_0(\xi, \eta) + T_4 C(\xi, \eta) + Bt(\xi, \eta) - T_3 S(\xi, \eta) \\
 At(\xi, \eta) &= T_1 \omega_0'(\xi, \eta); \quad Bt(\xi, \eta) = -T_1 \omega_0'(\xi, \eta) \quad C(\xi, \eta) = C_1 / (\zeta - i) + C_2 / (\zeta + t_b - i)^2 \\
 S(\xi, \eta) &= S_1 / (\zeta(\xi, \eta) - i) + S_2 / [\zeta(\xi, \eta) - i]^2 + S_3 / (\zeta(\xi, \eta) + t_b - i) + S_4 / [\zeta(\xi, \eta) + t_b - i]^2; \\
 T_1 &= T_x / 2; T_2 = a(A_3 + iA_2) / 2; T_3 = i(A_1 + A_2) / 4; T_4 = -i(A_1 - A_2 + 2iA_3) / 4; \\
 T_5 &= a(-A_3 + iA_2) / 2; T_6 = -i(A_1 - A_2 - 2iA_3) / 4; \\
 \Omega_0 &= \omega_0(-i); \Omega_1 = \omega_0'(-i); C_1 = a_1 \overline{\Omega_1}; S_1 = -a_1 \overline{\Omega_1}; S_2 = -a_1 \overline{\Omega_0}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Выполнен расчет начального напряженного состояния каньона без туннеля в (3). Значения компонентов напряжений для контурных точек каньона приведены в табл. 1 соответствующими именами.

Распределение напряжений, которые вычислены относительно декартовых координат, представлены для каждого компонента напряжений на рис. 2. Принято $\lambda = 0,5$; $\gamma = 2.75 \cdot 10^{-2}$; $T_x = -20$ МПа.

Таблица 1
Значения компонентов напряжений на контуре каньона

0	1	2	3	4	5	6	7	
0	x	y	$\text{cig } x$	$\text{cig } y$	t_{xy}	N	T	$T_{\max}$
1	-5	$-1.6 \cdot 10^3$	-11.5	$1.8 \cdot 10^{-15}$	-18.3	0	0	-18.3
2	-4	$-1.3 \cdot 10^3$	-17.6	$1.8 \cdot 10^{-15}$	-17.5	$1.8 \cdot 10^{-15}$	0	-17.5
3	-3	-930	-30	0	-16.2	$1.5 \cdot 10^{-15}$	0	-16
4	-2	-560	-60	0	-13.8	0	0	-13
5	-1	-190	-150	0	-10.9	0	0	-4.9
6	0	0	-300	$1.8 \cdot 10^{-13}$	-431	$1.8 \cdot 10^{-13}$	0	-431
7	1	190	-150	0	-10.9	0	0	-4.9
8	2	560	-60	0	-13.8	0	0	-13
9	3	930	-30	0	-16.2	$1.5 \cdot 10^{-15}$	0	-16
10	4	$1.3 \cdot 10^3$	-17.6	$1.8 \cdot 10^{-15}$	-17.5	$1.8 \cdot 10^{-15}$	0	-17.5

Наибольшее значение вертикального нормального напряжения имеет место в зоне сопряжения борта каньона с его основанием и равно $-86,2$ МПа. Горизонтальная нормальная компонента в этой же зоне наибольшая и равна $-390,2$ МПа. Максимальная касательная напряжения в этой зоне равна $29,4$ МПа. По мере удаления от зоны основания 30–50 метров все компоненты напряжений быстро уменьшаются. Например: горизонтальная компонента не более -59 МПа; вертикальная компонента не более -20 МПа; касательная компонента не более 15 МПа. Для дальнейших разработок для начального напряженного состояния каньона вводим обозна-

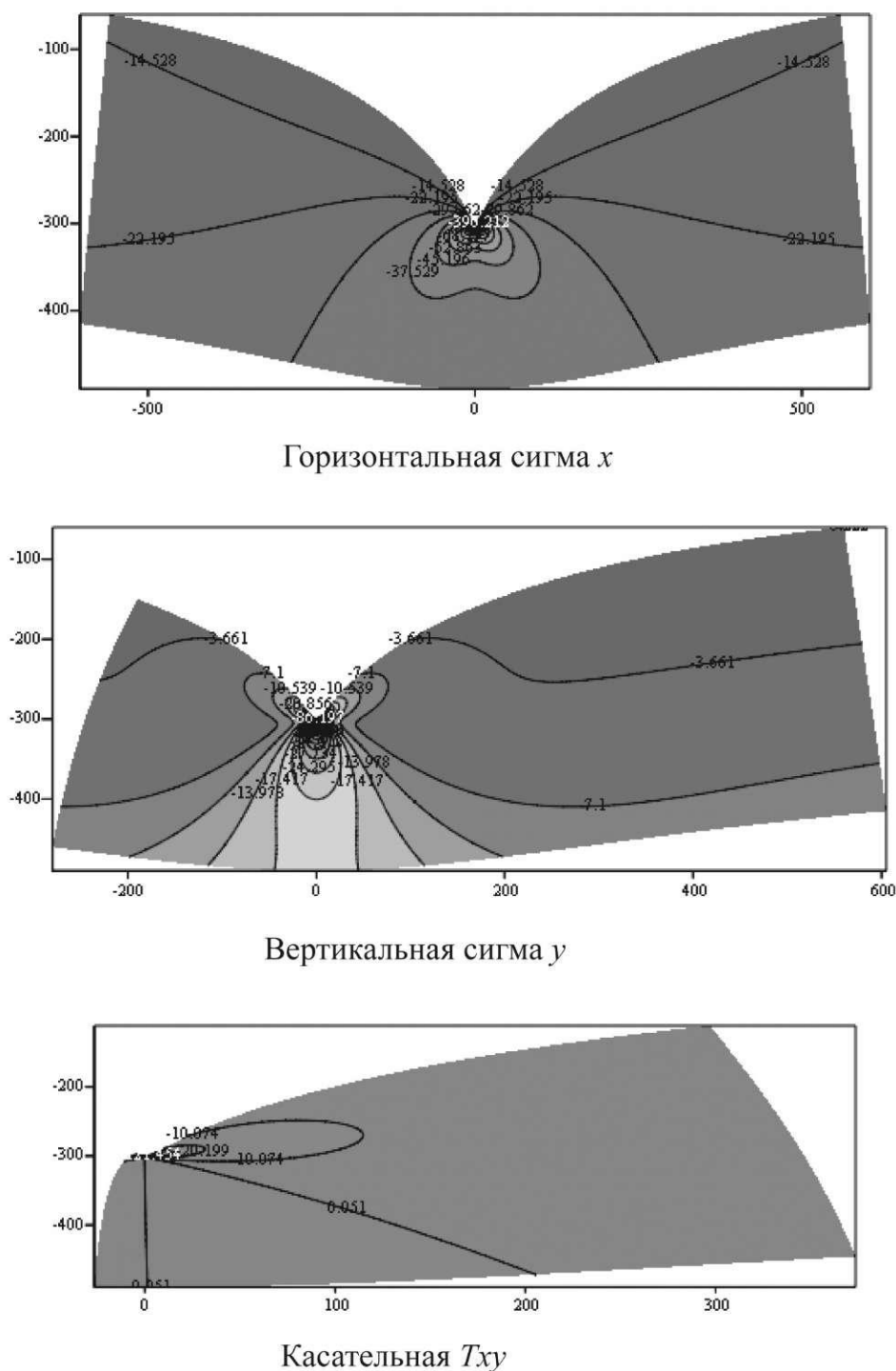


Рис. 2. Распределение напряжений в массивах каньона

чения: S_x – горизонтальная, S_y – вертикальная, S_{xy} – касательная компоненты напряжений. Кроме того, предположим, что центр тоннеля расположен вне зоны концентрации напряжений каньона.

Для определения третьего и четвертого поле напряжений в (1) используем отображения внешности отверстия на внешность единичного

$$z = \omega(\zeta); z = x + iy; \omega(\zeta) = e^{i\delta} R [\zeta + \omega_0(\zeta)]; \omega_0(\zeta) = \sum_{k=1}^3 d_k / \zeta^k; \zeta = \rho e^{i\theta}; i = \sqrt{-1}. \quad (9)$$

Здесь $0 \leq \rho \leq \infty$ – ось положительных чисел; $0 \leq \theta \leq 2\pi$ – полярный угол в радианах, R – коэффициент для задания масштаба отверстия; δ – параметр (в радианах) для установления ориентации оси симметрии отверстия относительно горизонтальной оси. Вариация параметров отображающей функции d_1, d_2, d_3 допускает моделировать различные формы сечений туннелей (см. табл. 2).

Сумма первых трех полей напряжений в контурных точках туннеля удовлетворяют граничным условиям:

$$\begin{aligned} (\sigma_x^p + \sigma_x^n + T_x + \sigma_x^m) \cos(n, x) + (\tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m) \cos(n, y) &= 0; \\ (\tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m) \cos(n, x) + (\sigma_y^n + \sigma_y^p + \sigma_y^m) \cos(n, y) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Таблица 2
Константы отображающей функции (8)

№	d_1	d_2	d_3	δ
x_1-y_1	0,4706	0	0,3012	0
x_2-y_2	0,3012	0	-0,0494	0
x_3-y_3	-0,4296	0,2721	0,0588	90 градус
x_4-y_4	-0,3333	0,2033	0,0492	90 градус

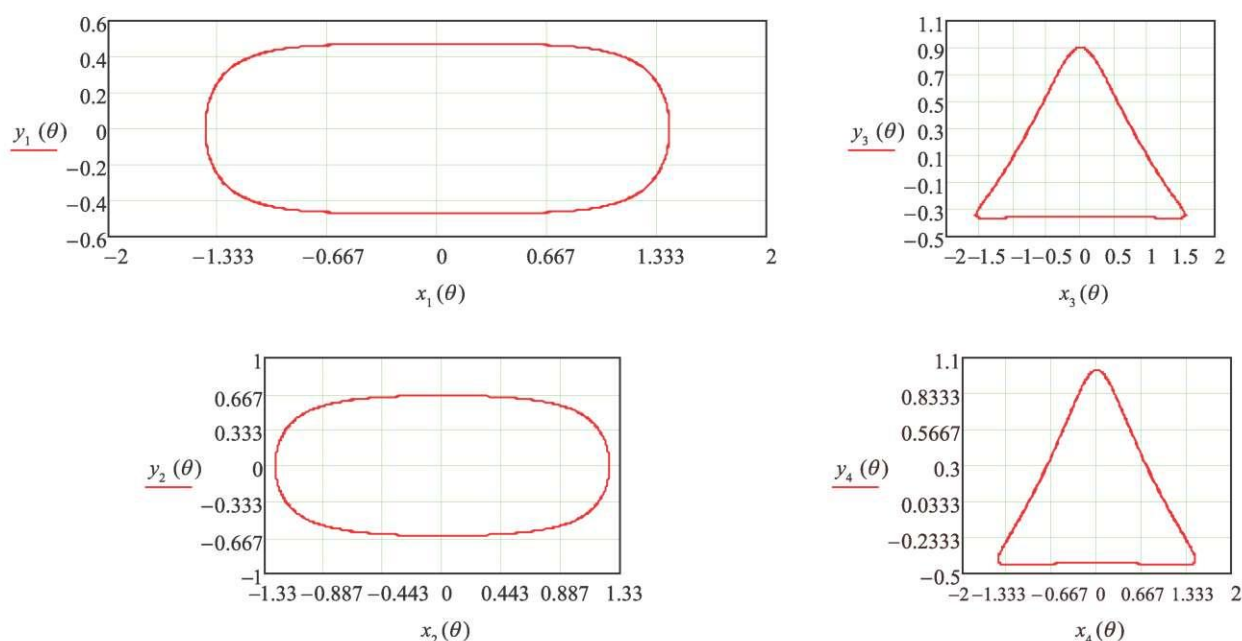


Рис. 3. Формы поперечных сечений туннелей

При отображении выражения (9) угол α между направлениями оси Ox и касательной кривой ρ определяется формулой

$$e^{2i\alpha} = \zeta^2 \omega'(\zeta) / (\rho^2 \overline{\omega'(\zeta)}) \quad e^{-2i\alpha} = \bar{\zeta}^2 \overline{\omega'(\zeta)} / (\rho^2 \omega'(\zeta)). \quad (11)$$

Условие (9) в преобразованной плоскости (см. рис. 4) новых переменных (9) и (11) принимает вид [15]:

$$\begin{aligned} [R\Gamma\sigma + \varphi(\sigma)] + [R\bar{\Gamma} + \overline{\varphi'(\sigma)}] * [\omega(\sigma) / \overline{\omega'(\sigma)}] + [R\Gamma'\sigma + \overline{\psi(\sigma)}] &= 0; \\ [\overline{R\Gamma\sigma + \varphi(\sigma)}] + [R\Gamma + \varphi'(\sigma)] * [\overline{\omega(\sigma)} / \omega'(\sigma)] + [R\Gamma'\sigma + \psi(\sigma)] &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь обозначено так же в [15]:

$$\Gamma = (S_x + S_y) / 4; \quad \Gamma' = (S_y - S_x + 2iS_{xy}) / 2; \quad \bar{\Gamma}' = (S_y - S_x - 2iS_{xy}) / 2.$$

Эти обозначения введены в [13] для обозначения однородного начального напряженного состояния S_x, S_y, S_{xy} в центре отверстия, где размещено начало оси координат нового вспомогательного переменного $\zeta = \rho e^{i\theta}$. Функция $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ определена для внешности единичной окружности, где $\rho=1$ контурные точки этой окружности обозначены $\zeta = \sigma = e^{i\theta}$ и $\bar{\zeta} = \bar{\sigma} = e^{-i\theta}$.

Граничные значения функций $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ представляются в виде:

$$\varphi(\sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} R_k \sigma^{-k}; \quad \psi(\sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} r_k \sigma^{-k}; \quad \varphi'(\sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} -k R_k \sigma^{-k-1}.$$

Отношения $\omega(\sigma) / \overline{\omega'(\sigma)}$ и $\overline{\omega(\sigma)} / \omega'(\sigma)$ разлагаются на простые выражения (полином + правильная дробь):

$$\overline{\omega(\sigma)} / \omega'(\sigma) = e^{-2i\delta} [b_3 \sigma^3 + b_2 \sigma^2 + b_1 \sigma + b_0 + f_1]; \quad \omega(\sigma) / \overline{\omega'(\sigma)} = e^{2i\delta} [b_3 / \sigma^3 + b_2 / \sigma^2 + b_1 / \sigma + b_0 + f_2]$$

$$f_1(\sigma) = [q_3 \sigma^3 + q_2 \sigma^2 + q_1 \sigma + q_0] / [\sigma^4 - d_1 \sigma^2 - 2d_2 \sigma - 3d_3];$$

$$f_2(\sigma) = [q_3 \sigma + q_2 \sigma^2 + q_1 \sigma^3 + q_0 \sigma^4] / [1 - d_1 \sigma^2 - 2d_2 \sigma^3 - 3d_3 \sigma^4];$$

$$b_3 = d_3; \quad b_2 = d_2; \quad b_1 = d_1 + d_1 d_3; \quad b_0 = 2d_2 b_3 + d_1 b_2;$$

$$q_0 = 3d_3 b_0; \quad q_1 = 3d_3 b_1 + 2d_2 b_0; \quad q_2 = 3d_3 b_2 + 2d_2 b_1 + d_1 b_0; \quad q_3 = 1 + 3d_3 b_3 + 2d_2 b_2 + d_1 b_1.$$

Интегралы типа Коши от заданных граничных условий (11) определяют искомые функции $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$. Когда на контур туннеля действует гидростатический напор $(-P_0)$ необходимо решать граничные задачи по определению функций $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ из условий:

$$\begin{aligned} \varphi(\sigma) + \overline{\varphi'(\sigma)} * [\overline{\omega(\sigma)} / \omega'(\sigma)] + \overline{\psi(\sigma)} &= -P_0 R \omega(\sigma); \\ \overline{\varphi(\sigma)} + \varphi'(\sigma) * [\omega(\sigma) / \overline{\omega'(\sigma)}] + \psi(\sigma) &= -P_0 \overline{R \omega(\sigma)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Соотношения для определения функций $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ из граничных условий (11) и (12) идентичны и поэтому рационально их объединение в виде суммы для постоянных коэффициентов явно заданных в (11) и (12).

$$N_1 = R e^{i\delta} (S_x + S_y) / 4; \quad N_2 = R e^{-i\delta} (S_y - S_x - 2iS_{xy}) / 2; \quad N_3 = \bar{N}_1; \quad N_4 = \bar{N}_2;$$

$$a_{01} = -N_1 d_1 - N_3; \quad a_{02} = -N_1 d_2; \quad a_{03} = -N_1 d_3; \quad b_{01} = -N_4 d_1 - N_2; \quad b_{02} = -N_4 d_2; \quad b_{03} = -N_4 d_3;$$

$$a_{11} = e^{i\delta} P_0 R d_1; \quad a_{12} = e^{i\delta} P_0 R d_2; \quad a_{13} = e^{i\delta} P_0 R d_3; \quad b_{11} = P_0 R e^{-i\delta}; \quad sb_1 = b_{01} + b_{11};$$

$$sb_2 = b_{02}; \quad sb_3 = b_{03}; \quad ca_1 = a_{01} + a_{11}; \quad ca_2 = a_{02} + a_{12}; \quad ca_3 = a_{03} + a_{13}.$$

Интегралы типа Коши от граничных условий в (11) и (12) имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi(\zeta) + G(\zeta) &= A_0(\zeta); \quad \varphi'(\zeta) * [\overline{\omega(\zeta)} / \omega'(\zeta)] + \overline{\psi(\zeta)} - \bar{G}(\zeta) = B_0(\zeta); \\ G(\zeta) &= [b_3 \bar{R}_1] e^{2i\delta} \zeta^{-1}; \quad A_0(\zeta) = \sum_{k=1}^3 ca_k \zeta^{-k}; \quad B_0(\zeta) = \sum_{k=1}^3 sb_k \zeta^{-k}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для разложения в отношениях $co(c_2)/co'(c_2)$ и $co\{o\}/co'(c_2)$ вводим новые обозначения: $bpO=b_0e^{2iS}$; $bpl=b_xe^{2iS}$; $bp2=b_2e^{2iS}$; $bp3=b_3e^{2iS}$; $qpO=q_0e^{2iS}$; $qpl=q_xe^{2iS}$; $qp2=q_2e^{2iS}$; $qp3=q_3e^{2iS}$.

Первое уравнение (14) содержит полюс первого порядка от интеграла второго слагаемого граничного условия в (14). Пока их обозначим через R , R_i ; Для определения их значений приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях переменного S^1 правых и левых частей первого уравнения будем иметь одно уравнение. Добавим к ним сопряженное уравнение и получим систему из двух уравнений. Для выполнения расчетов начальное напряженное состояние принято $S_x = -59$ МПа; $S_y = -20$ МПа; $S_{xy} = -10$ МПа. Коэффициенты системы имеют вид:

Система уравнений решена методом векторной алгебры, которая в пакете программ Mathcad [19] оформлена как простая вычисляемая функция. Результат решения системы выделен отдельно $MR=M\sim MO$;

$$MR = \begin{matrix} 18.062+ 12.32Li \\ 18.062- 12.32i \end{matrix}$$

Первое уравнение после объединение коэффициентов при одинаковых степенях переменной Z^k ($k=1, 2, 3$) принимает вид:
 $\wedge(O^{\wedge}q/r'+Q/r'+Q/r^3,$

$$R_0(\zeta) = (r_1/\zeta^1 + r_2/\zeta^2)e^{-2i\delta}; r_1 = 3C_3 b_3 + 2C_2 b_2; r_2 = 3C_3 b_2;$$

$$\omega d(\zeta) = (\zeta^4 - d_1\zeta^2 - 2d_2\zeta - 3d_3); \omega' d(\zeta) = 4\zeta^3 - 2d_1\zeta - 2d_2;$$

$$Q(\zeta) = q_3\zeta^3 + q_2\zeta^2 + q_1\zeta + q_0; Q'(\zeta) = 3q_3\zeta^2 + 2q_2\zeta + q_1;$$

$$f(\zeta) = (b_1\zeta + b_0 + Q(\zeta)/\omega d(\zeta))e^{2i\delta}; f'(\zeta) = (b_1 + (Q'(\zeta)*\omega d(\zeta) - Q(\zeta)*\omega' d(\zeta))/\omega d(\zeta)^2)e^{2i\delta};$$

$$\Phi(\zeta) = \varphi'(\zeta)/\omega'(\zeta);$$

$$\begin{aligned} \forall(0 = e_0IO + UQ - f(0 * <pW; yXO = e_0'IO + (O - PC) * <p'IO - f(0 * \\ \psi(0 = \psi_0IcoIII \end{aligned}$$

Таблица
3

$O_p(1, \varphi)$	$Трв(^{1, B})$	$a_s(1, \varphi)$
-2.84-10 ⁿ¹⁴	8.882-10 ⁻¹⁵	-243.385
-4.974-10 ⁿ¹⁴	-3.73-10 ⁿ¹⁴	-254.971
2.132-10 ⁿ¹⁴	2.043-10 ⁿ¹⁴	-264.289
-9.237-10 ⁿ¹⁴	-1.12810 ⁻¹³	-268.089
-1.10110 ⁻¹³	5.507-10 ⁿ¹⁴	-260.994
-7.461-10 ⁿ¹⁴	-3.553-10 ⁿ¹⁴	-238.005
-9.948-10 ⁿ¹⁴	-7.105-10 ⁿ¹⁴	-199.199
-2.132-10 ⁿ¹⁴	5.100-10 ⁿ¹⁴	-151.878
9.948-10 ⁿ¹⁴	-3.553-10 ⁿ¹⁴	-106.031
-7.105-10 ⁿ¹⁴	3.553-10 ⁿ¹⁴	-68.153
-1.421-10 ⁿ¹⁴	-2.132-10 ⁿ¹⁴	-39.798
7.105-10 ⁿ¹⁵	4.086-10 ⁿ¹⁴	-19.652
0	1.954-10 ⁿ¹⁴	-5.628
-7.105-10 ⁿ¹⁵	5.329-10 ⁻¹⁴	4.141
-2.132-10 ⁿ¹⁴	2.132-10 ⁻¹⁴	11.052

Таблица 4

Напряжения на контуре туннеля с напором

$\sigma_p(1, \theta)$	$\tau_{p\theta}(1, \theta)$	$\sigma_\theta(1, \theta)$
-50	$1.776 \cdot 10^{-15}$	-117.424
-50	$4.441 \cdot 10^{-15}$	-127.744
-50	$1.865 \cdot 10^{-14}$	-133.884
-50	$-4.441 \cdot 10^{-14}$	-134.604
-50	$5.507 \cdot 10^{-14}$	-128.007
-50	$-7.105 \cdot 10^{-15}$	-113.026
-50	$-3.553 \cdot 10^{-14}$	-91.461
-50	$-1.421 \cdot 10^{-14}$	-68.058
-50	$3.553 \cdot 10^{-14}$	-47.609
-50	$2.132 \cdot 10^{-14}$	-32.353
-50	$1.066 \cdot 10^{-14}$	-22.085
-50	$2.309 \cdot 10^{-14}$	-15.556
-50	$1.776 \cdot 10^{-14}$	-11.466
-50	$7.10 \cdot 10^{-14}$	-8.822
-50	$3.553 \cdot 10^{-15}$	-6.944

Сумма первых трех полей напряжений в системе криволинейных координатах, где для контурных точек туннеля $\rho=1$, представлены в виде табл. 3, для каждого компонента напряжений. Отсюда видно, что граничные условия (10) для туннеля без напора выполняются с высокой точностью. Погрешность не более 10^{-14} .

При действии напора $P=-50$ МПа на контуре туннеля вычисленные значения компонентов напряжений приведены в табл. 4.

Результаты расчета напряжений до и после действия напора на контур туннеля представлены на рис. 4. На рис. 5 представлены изолинии компонентов относительных деформаций вокруг туннеля, которые имеет место до и после действия напора.

Выводы. Таким образом созданная модель напряженного и деформированного состояния напорных туннелей пригоден и для оценки состояний вокруг горных выработок, приняв напор $P=0$.

Состояния массивов вокруг туннелей и выработок в условиях действия только силы гравитации математически описано с помощью созданной модели, если примем в нем $T_x=0$.

Промежуточный результат в (3) для каньона при действии силы гравитации без учета тектонической силы изучен в [7, 8], а действие только горизонтальной силы исследовано Г. Нейбером [15].

Таким образом, ранее выполненные в работах [10, 20] некоторые результаты исследования для выработок расположенных в весоной полуплоскости, вновь вытекают из построенной модели (1), при случае, когда в модели влияние рельефа (второе поле напряжений) отсутствует.

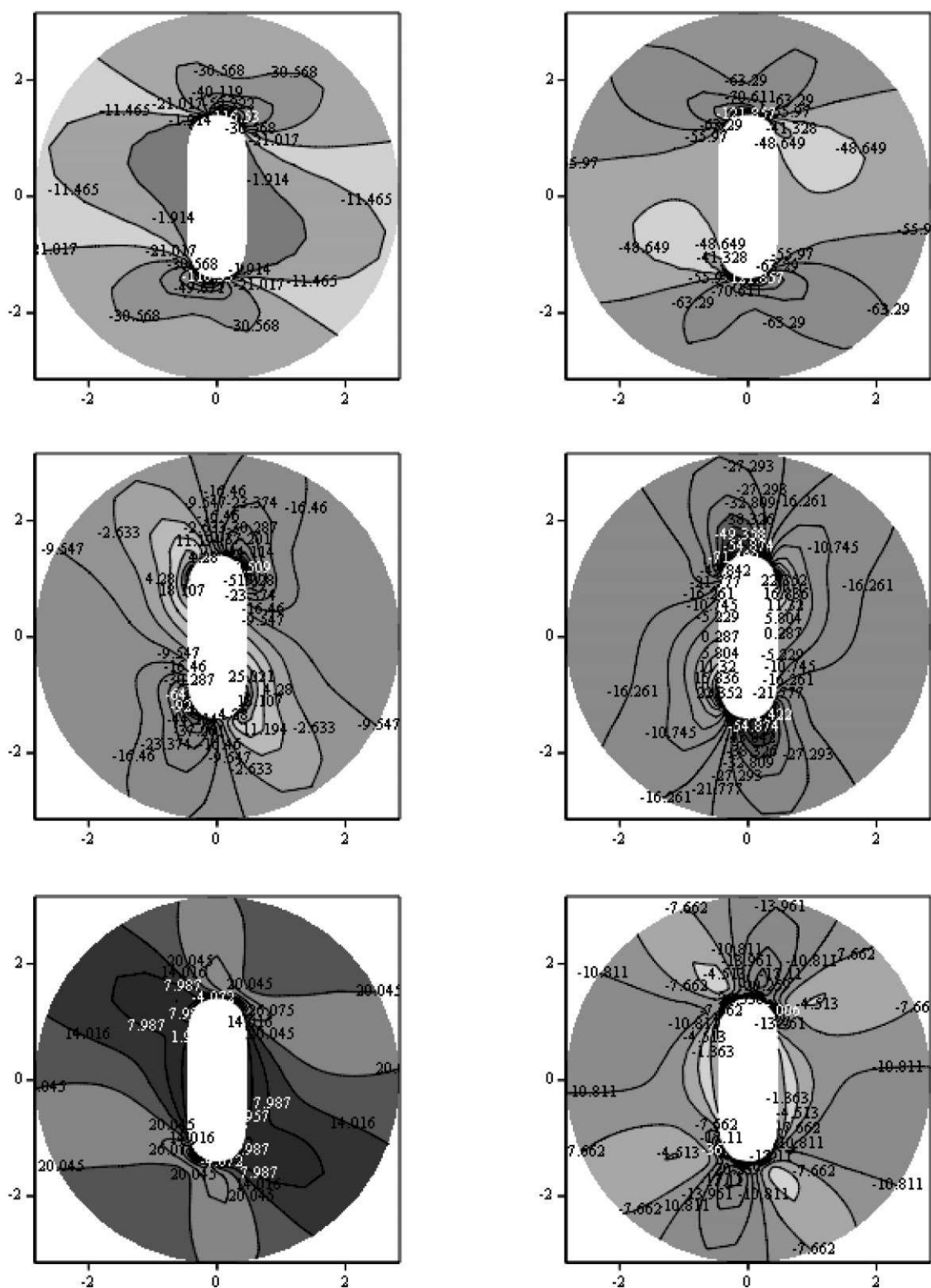
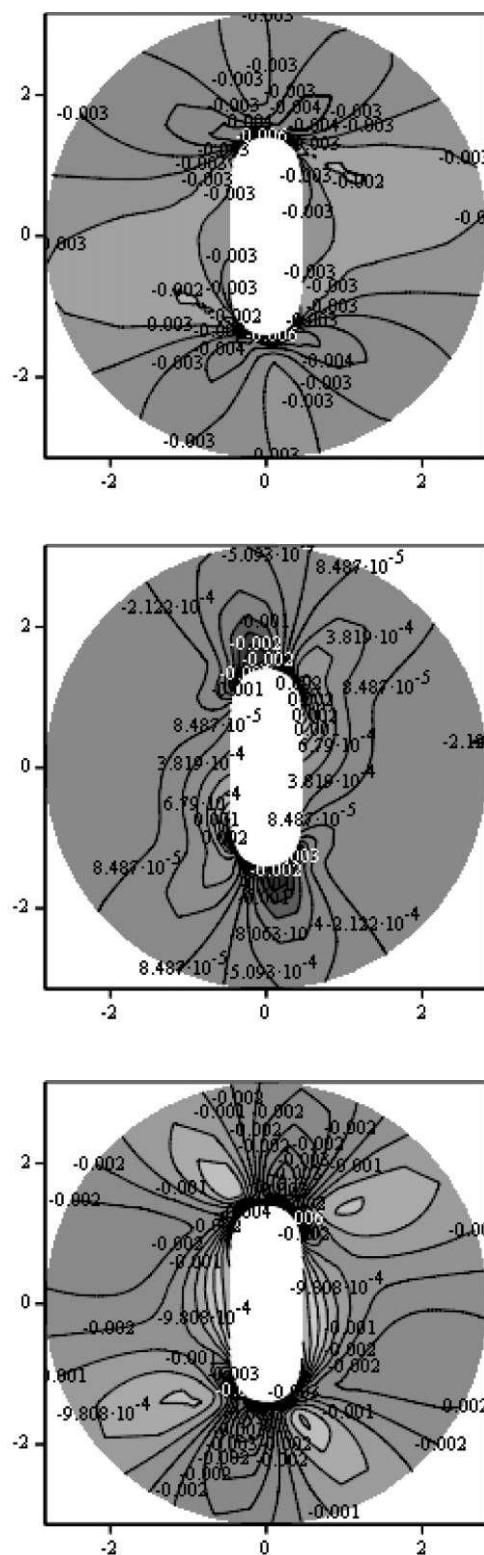


Рис. 4. Изолинии распределения напряжений вокруг туннеля до (слева) и после действия напора (справа)



117

ЛИТЕРАТУРА

1. Рельеф горных стран. – М.: Мысль, 1968. – 184 с.
2. Гуттенберг Б., Рихтер Ч. Сейсмичность земли. – М.: Иностранная литература, 1948. – С. 160.
3. СНиП-7-81. Строительные нормы и правила: Нормы проектирования: Строительство в сейсмических районах. – М.: Строиздат, 1982. – 49 с.
4. Айтматов И.Т. Геомеханика рудных месторождений Средней Азии. – Фрунзе, 1984. – 246 с.
5. Крупеников Г.А., Филатов Н.А., Амушин Б.З., Барковский В.М. Распределение напряжений в породных массивах. – М.: Недра, 1972. – 144 с.
6. Hast N. Stress Fields Fracture System and the Mechanism for Movements in Greiss Area of the Mont Blanc Massif. – *Roch Mechanica Supplementum*. 1980. 9. – P. 3–10.
7. Ахнателов Д.М. Исследование напряженного состояния массивов горных пород в поле гравитации: Автореф. дис. канд. техн. наук – М., 1972. – 23 с.
8. Тер-Мартirosян З.Г., Ахнателов Д.М. Напряженное состояние горных массивов в поле гравитации. /ДАН СССР, 1976. Т. 220, № 2. – С. 311–314.
9. Гольдштейн Р.В., Калинин Э.В. Опыт применения аналитического метода для оценки напряженного состояния массива горных пород в бортах и основании глубоких речных долин. – Вестник МГУ, серия «Геология», № 5. – С. 54–65.
10. Динник А.Н. и др. Распределение напряжений вокруг подземных выработок. / Труды совещания по управлению горным давлением. М.: Изд-во АН СССР, 1938. – С. 7–55.
11. Жумабаев Б. Распределение напряжений в массивах пород с гористым рельефом. – Фрунзе: Илим, 1988. – 190 с.
12. Jumbayev B.J., Ismailova K.D. Durability of Dams and Protection of Land Stock from Mud-Torrents and Floods in Mountain Regions. / *Proceedings of the 7th International Symposium High Mountain Remote Sensing Cartography*. Institute for Cartography, Dresden University of Technology, Germany, 2004.
13. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
14. Жумабаев Б., Аманалиев А.А., Ботоканова Б.А. Распределение напряжений вокруг напорного туннеля с эллиптическим (круглым) поперечным сечением. // *Современные проблемы механики сплошных сред*. Вып. 13. Бишкек, 2011. – С. 330–338.
15. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М.–Л.: ОГИЗ, 1947. – С. 204.
16. Гольдин А.Л. Напряженно-деформированное состояние упругой полуплоскостей с вырезом под действием гидростатической нагрузки. // *Известия ВНИИГ*, 1969. Т. 91. – С. 239–301.
17. Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Масаков Ж.К. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоистом массиве. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 212 с.
18. Авершин С.Г., Балалаева С.А., Груздев В.Н. Распределение напряжений вокруг горных выработок. – Фрунзе: Илим, 1971. – 130 с.
19. Кирьянов Д. Mathcad 14 в подлиннике. – СПб.: БВХ-Петербург, 2007. – 704 с.
20. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1982. – 272 с.