

Ботоканова Б.А.

СУУ БАСЫМЫНЫН НЕГИЗИНДЕ ПАЙДА БОЛГОН АРКА ТИПТҮҮ ТУННЕЛДИН
АЙЛАНАСЫНДАГЫ ЧЫҢАЛУУ ТАЛААСЫНЫН ӨЗГӨРҮШҮ

Ботоканова Б.А.

ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ТУННЕЛЯ СО СВОДЧАТЫМ
СЕЧЕНИЕМ ОТ ДЕЙСТВИЯ НАПОРА ВОДЫ

B. Botokanova

VARIATIONS IN VOLTAGE FIELDS AROUND THE REDUCED-SECTION
TUNNEL FROM THE ACTION OF WATER PRESSURE

УДК: 622.861. (575.2)

Макалада басымдуу (басымсыз) туннелдердин чыңалуу талаасынын закон ченемдүүлүгү аныкталды. Башында тоолу рельеф массивдеринин чыңалуу абалынын, андан кийин туннелдин айланасындагы чыңалууга суу басымынын таасиринин математикалык модели түзүлгөн. Дайындалган тапшырмада туннелдин контуру бош жана суу басымынын аракетин P_0 болгондо, чалбыруучу конформдук аппараттын жардамы менен туннелдин чегиндеги күчтөрдүн эки шарты аткарылды. Эсептин жыйынтыгы MATHCAD программасынын жардамы менен ишке ашырылып, $\sigma_r(1, \theta)$, $\sigma_\theta(1, \theta)$, $\tau_{r\theta}(1, \theta)$ (МПа) чыңалуулардын мааниси таблица түрүндө берилди. Гидростатикалык басым туннелдин контуруна таасир эткенде, гидротехникалык туннелдин тегериндеги баардык чыңалуу компоненттеринин өзгөрүүлөрүнүн мыйзам ченемдүүлүктөрү изилденди. Иштин жыйынтыктары тоо кең казанактарынын жана басымдуу (басымсыз) туннелдердин туруктуулугун камсыз кылуу үчүн долбоорлук чечимдерди негиздөөдө колдонулат.

Негизги сөздөр: гидростатикалык басым, чыңалуу, чектеги шарттар, чагылдыруу функциясы, чоюлуу, кысылуу.

В данной статье определены закономерности изменения полей напряжений вокруг туннеля с учетом действия напора (без напора) воды. В начале построена математический модель напряженного состояния массивов горным рельефом, а затем задано влияние напора воды на распределения напряжений вокруг туннеля. Поставленная задача решена с применением аппарата конформного отображения и двух граничных условий, когда контур туннеля свободен, и действует напор P_0 . Результаты расчета получены с помощью программного обеспечения MATHCAD и числовые значения напряжений $\sigma_r(1, \theta)$, $\sigma_\theta(1, \theta)$, $\tau_{r\theta}(1, \theta)$ (МПа) приведены в таблице. Исследованы закономерности изменения всех компонентов напряжений вокруг гидротехнического туннеля, когда на контур туннеля действует гидростатический напор. Результаты работы применяются для обоснования проектных решений по обеспечению устойчивости горных выработок и напорных (безнапорных) туннелей.

Ключевые слова: гидростатический напор, напряжения, граничные условия, отображающая функция, математическая модель, растяжения, сжатия.

This article defines the patterns of change in stress fields around the tunnel, taking into account the action of the pressure (free-flow) of water. At the beginning, a mathematical model of the stress state of massifs with mountainous relief was built, and then the influence of water pressure on the stress distribution around the tunnel was set. The problem is solved using the conformal mapping apparatus and two boundary conditions when the tunnel contour is free and the pressure P_0 acts. The calculation results were obtained using the MATHCAD software and the numerical values of stresses $\sigma_r(1, \theta)$, $\sigma_\theta(1, \theta)$, $\tau_{r\theta}(1, \theta)$ (MPa) are given in the table. The regularities of the change in all stress components around the hydraulic tunnel, when the hydrostatic head acts on the tunnel contour, have been investigated. The results of the work are used to substantiate design solutions to ensure the stability of mine workings and pressure (gravity) tunnels.

Key words: hydrostatic head, stresses, boundary conditions, mapping function, mathematical model, tension, compression.

Введение. Математическая модель напряженного состояния массивов пород вокруг туннеля со сводчатым поперечным сечением создается в виде суммы четырех полей напряжений, как в работе [8]:

$$\begin{aligned}\sigma_x^0 &= \sigma_x^n + \sigma_x^p + \sigma_x^m + \sigma_x^h \\ \sigma_y^0 &= \sigma_y^n + \sigma_y^p + \sigma_y^m + \sigma_y^h \\ \tau_{xy}^0 &= \tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m + \tau_{xy}^h\end{aligned}\quad (1)$$

Первое поле напряжений в (1), представлены в виде (2) [1, 4]:

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

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

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.

Второе поле напряжений в формуле (1) с верхним индексом « p » - обозначено влиянием формы рельефа горного массива, третье возникновение туннеля, а последнее с индексом « n » - результат действия напора воды P_0 .

Все слагаемые полей напряжений (1) определены ранее в работах авторов [7-9]. Поэтому здесь приводим только необходимые результаты [1, 7-9] без промежуточных выкладок.

Форма исследуемой области в плоскости XOY со сводчатым отверстием моделируется с помощью отображающей функции [1, 3, 4]:

$$z = \omega(\zeta); i = \sqrt{-1}; \zeta = \rho e^{i\theta}. \omega(\zeta) = e^{i\delta} R[\zeta + \omega_0(\zeta)]. \omega_0(\zeta) = \sum_{k=1}^4 \frac{d_k}{\zeta^k}; \quad (3)$$

Здесь $1 \leq \rho \leq \infty$ ось положительных чисел; $0 \leq \theta \leq 2\pi$ - в радианах.

R - коэффициент для изменения размеров отверстия; δ - параметр (в радианах) для установления ориентации оси симметрии отверстия относительно горизонтальной оси, d_1, d_2, d_3, d_4 - Параметры отображающей функции приведены в таблице 1.

Материалы, методы и результаты. В отображаемом центре туннеля действует суммарное от первых двух полей напряжений и принято, как в работе [5, 7, 8]:

$$S_x = -35 \text{ МПа}; S_y = -40 \text{ МПа}; S_{xy} = -45 \text{ МПа}; P = -45 \text{ МПа}.$$

Здесь, S_x, S_y - горизонтальная и вертикальная нормальная напряжения;
 S_{xy} - касательная компонента напряжений;
 P - гидростатический напор.

Таблица 1

Параметры отображающей функции

№	d_1	d_2	d_3	d_4	δ
$x^4 - y^4$	0,0893	0,0479	-0,1143	0,0373	90 градус

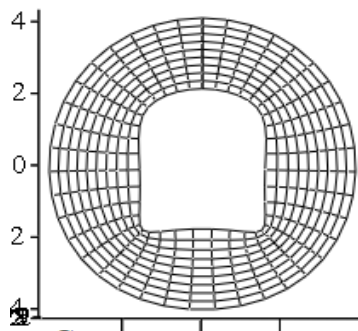


Рис. 1. Форма сечения туннеля сводчатая с развитыми вертикальными стенками.

Поле напряжений на контурных точках туннеля $\sigma_x^m, \sigma_y^m, \tau_{xy}^m$, удовлетворяет граничные условия [5, 6]:

$$\begin{aligned} (\sigma_x^p + \sigma_x^n + T_x + \sigma_x^m) \cdot (\cos n, x) + (\tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m) \cdot \cos(n, y) &= 0; \\ (\tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m) \cdot \cos(n, x) + (\sigma_y^n + \sigma_y^p + \sigma_y^m) \cdot \cos(n, y) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

При отображении типа (1) угол α между осями ox и касательной кривой ρ определяется формулой [5]:

$$e^{2i\alpha} = \zeta^2 \omega'(\zeta) / (\rho^2 \overline{\omega'(\zeta)}); e^{-2i\alpha} = \overline{\zeta}^2 \omega'(\zeta) / (\rho^2 \omega'(\zeta)) \quad (5)$$

Исходя из (4) для определения $\sigma_x^m, \sigma_y^m, \tau_{xy}^m$, отыскиваем функций $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ из условий:

$$\begin{aligned} [R\Gamma\sigma + \varphi(\sigma)] + [R\bar{\Gamma} + \overline{\varphi'(\sigma)}] \cdot [\omega(\sigma)/\overline{\omega'(\sigma)}] + [R\overline{\Gamma'\sigma} + \overline{\psi(\sigma)}] &= 0; \\ [\overline{R\Gamma\sigma} + \overline{\varphi(\sigma)}] + [R\Gamma + \varphi'(\sigma)] \cdot [\overline{\omega(\sigma)}/\omega'(\sigma)] + [R\Gamma'\sigma + \psi(\sigma)] &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь обозначено так же в [1]:

$$\Gamma = (S_x + S_y)/4; \Gamma' = (S_y - S_x + 2iS_{xy})/2; \bar{\Gamma} = (S_y - S_x - 2iS_{xy})/2; \quad (7)$$

Напряженные состояния полей напряжений S_x, S_y, S_{xy} в центре сводчатого отверстия, где размещено начало оси координат нового вспомогательного переменного $\zeta = \rho e^{i\theta}$. Функции $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ определены для внешности единичной окружности, где $\rho = 1$, контурные точки этой окружности обозначены $\zeta = \sigma = e^{i\theta}$ и $\bar{\zeta} = \bar{\sigma} = e^{-i\theta}$ [5-8].

Отношения $\omega(\sigma)/\overline{\omega'(\sigma)}$ и $\overline{\omega(\sigma)}/\omega'(\sigma)$ можно разложить на простые выражения:

$$\begin{aligned} \overline{\omega(\sigma)}/\omega'(\sigma) &= e^{-2i\delta} [b_2\sigma^2 + b_1\sigma + b_0 + f_1]; \\ f_1(\sigma) &= [q_2\sigma^2 + q_1\sigma + q_0]/[\sigma^3 - d_1\sigma - 2d_2]; \\ \omega(\sigma)/\overline{\omega'(\sigma)} &= e^{2i\delta} [b_2/\sigma^2 + b_1/\sigma + b_0 + f_2]; \\ f_2(\sigma) &= [q_2\sigma^3 + q_1\sigma^2 + q_0\sigma]/[1 - d_1\sigma^2 - 2d_2\sigma^3] \\ b_2=d_2; b_1=d_1; b_0=d_1d_2; q_0=2d_1d_2^2; q_1=2d_2b_1+d_1^2; q_2=1+2d_2b_2+d_1b_1; \end{aligned}$$

Интегралы Коши [3] для граничных условий определяем от искомым функций $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ [8]. Так как на контур туннеля действует гидростатический напор $(-P_0)$, надо рассмотреть следующую граничную задачу:

$$\begin{aligned} \varphi(\sigma) + \overline{\varphi'(\sigma)} \cdot [\omega(\sigma)/\overline{\omega'(\sigma)}] + \overline{\psi(\sigma)} &= -P_0R\omega(\sigma); \\ \overline{\varphi(\sigma)} + \varphi'(\sigma) \cdot [\overline{\omega(\sigma)}/\omega'(\sigma)] + \psi(\sigma) &= -P_0R\overline{\omega(\sigma)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Соотношения для определения функций $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ из граничных условий (8) запишем в виде суммы для постоянных коэффициентов;

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{Re^{i\delta}(S_x+S_y)}{2}; \quad N_2 = \frac{Re^{-i\delta}(S_x+S_y+2iS_{xy})}{2}; \quad N_3 = \bar{N}_1; N_4 = \bar{N}_2; \\ N_1 &= -37,5i; N_2 = 45 + 2,5i; N_3 = 37,5i; N_4 = 45 - 2,5i; \\ a_{01} &= -N_1d_1 - N_2; a_{02} = -N_1d_2; a_{11} = e^{i\delta} P_0Rd_1; a_{12} = e^{i\delta}; \\ b_{01} &= -N_4d_1 - N_3; b_{02} = -N_4d_2; P_0Rd_2; b_{11} = P_0R e^{-i\delta}; \\ sb_1 &= b_{01} + b_{11}; sb_2 = b_{02}; ca_1 = a_{01} + a_{11}; ca_2 = a_{02} + a_{12}; \end{aligned}$$

Интегралы типа Коши от граничных условий имеет вид [1, 4-8]:

$$\begin{aligned} \varphi(\zeta) &= A_0(\zeta); \quad \varphi'(\zeta) \cdot [\overline{\omega(\zeta)}/\omega'(\zeta)] + \psi(\zeta) = B_0(\zeta); \\ A_0(\zeta) &= \sum_{k=1}^2 C_k \zeta^{-k}; \quad B_0(\zeta) = \sum_{k=1}^2 sb_k \zeta^{-k}; \end{aligned} \quad (9)$$

Для выражений в отношениях $\omega(\sigma)/\overline{\omega'(\sigma)}$ и $\overline{\omega(\sigma)}/\omega'(\sigma)$ вводим новые обозначения [5, 8]:

$$\begin{aligned} bp_0 &= b_0 e^{2i\delta}; bp_1 = b_1 e^{2i\delta}; bp_2 = b_2 e^{2i\delta}; bp_3 = b_3 e^{2i\delta}; bp_4 = b_4 e^{2i\delta}; \\ bp_5 &= b_5 e^{2i\delta}; qp_0 = q_0 e^{-2i\delta}; qp_1 = q_1 e^{-2i\delta}; qp_2 = q_2 e^{-2i\delta}; qp_3 = q_3 e^{-2i\delta}; qp_4 = q_4 e^{-2i\delta}; qp_5 = q_5 e^{-2i\delta}; \end{aligned}$$

Исходя из вышеизложенного, будем решать систему уравнения двумя способами: векторной алгебры и методом Гаусса с помощью пакета программы MATHCAD [2].

Результат решения системы выделено в MR: $MR = M^{-1} \cdot MO$

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ КЫРГЫЗСТАНА, № 5, 2021

Соотношения для функций [5, 7]:

$$R_0(\rho, \theta) = \left(\frac{r_1}{\zeta(\rho, \theta)} + \frac{r_2}{\zeta(\rho, \theta)^2} + \frac{r_3}{\zeta(\rho, \theta)^3} + \frac{r_4}{\zeta(\rho, \theta)^4} \right) \cdot e^{-2 \cdot i \cdot \delta};$$

$$Q(\rho, \theta) = q_5 \cdot \zeta(\rho, \theta)^5 + q_4 \cdot \zeta(\rho, \theta)^4 + q_3 \cdot \zeta(\rho, \theta)^3 + q_2 \cdot \zeta(\rho, \theta)^2 + q_1 \cdot \zeta(\rho, \theta) + q_0;$$

$$f(\rho, \theta) = \left(b_1 \cdot \zeta(\rho, \theta) + b_0 + \frac{Q(\rho, \theta)}{\omega_d(\rho, \theta)} \right) \cdot e^{-2 \cdot i \cdot \delta}; \quad \Phi(\rho, \theta) = \frac{\phi_{p1}(\rho, \theta)}{\omega_{p1}(\rho, \theta)};$$

$$\Phi_p = \frac{(\phi_{p2}(\rho, \theta) \cdot \omega_{01}(\rho, \theta) - \omega_{02}(\rho, \theta) \cdot \phi_{p1}(\rho, \theta))}{(\omega_{01}(\rho, \theta))^2}$$

$$\Psi(\rho, \theta) = B_0(\rho, \theta) + R_0(\rho, \theta) - f(\rho, \theta) \cdot \omega f(\rho, \theta).$$

$$\sigma_\theta(\rho, \theta) = \sigma_{\theta b}(\rho, \theta) + \sigma_{\theta bn}(\rho, \theta), \quad \sigma_\rho(\rho, \theta) = \sigma_{\rho bn}(\rho, \theta) + \sigma_{bb}(\rho, \theta),$$

$$\tau_{\rho\theta}(\rho, \theta) = \tau_{\rho\theta b}(\rho, \theta) + \tau_{\rho\theta bn}(\rho, \theta).$$

$$Y_2(\rho, \theta) = Im(\omega(\rho, \theta)), \quad X_2(\rho, \theta) = Re(\omega(\rho, \theta)). \quad k = 0 \dots 72, \quad \theta = 0, \dots, \frac{\pi}{36} \dots 2 \cdot \pi$$

Таблица 2

Контурные значения напряжений туннеля без напора

$\sigma_\rho(1, \theta)$	$\sigma_\theta(1, \theta)$	$\tau_{\rho\theta}(1, \theta)$
$-7.105 \cdot 10^{-15}$	-64.208	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
$-3.553 \cdot 10^{-15}$	-93.285	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
0	-122.930	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
$-2.487 \cdot 10^{-14}$	-153.261	$7.816 \cdot 10^{-14}$
$-2.096 \cdot 10^{-13}$	-184.745	$-4.974 \cdot 10^{-14}$
$5.329 \cdot 10^{-14}$	-217.980	$1.421 \cdot 10^{-14}$
$-7.105 \cdot 10^{-15}$	-253.116	$-4.974 \cdot 10^{-14}$
$1.421 \cdot 10^{-13}$	-288.710	$-1.243 \cdot 10^{-13}$
$-2.345 \cdot 10^{-13}$	-320.020	$-2.487 \cdot 10^{-14}$
$-9.237 \cdot 10^{-14}$	-337.934	$-1.821 \cdot 10^{-14}$
$-8.527 \cdot 10^{-14}$	-331.938	$-3.553 \cdot 10^{-15}$
$-4.334 \cdot 10^{-13}$	-298.647	$-2.629 \cdot 10^{-13}$
$-7.105 \cdot 10^{-15}$	-247.181	$-7.105 \cdot 10^{-15}$
$1.066 \cdot 10^{-13}$	-192.339	$2.842 \cdot 10^{-14}$
$-2.132 \cdot 10^{-14}$	-144.419	$-4.263 \cdot 10^{-14}$
$-3.553 \cdot 10^{-14}$	-106.741	$-7.105 \cdot 10^{-15}$
0	-78.492	$-4.263 \cdot 10^{-14}$
$3.553 \cdot 10^{-14}$	-57.541	$1.424 \cdot 10^{-14}$

Суммы первых трех полей напряжений в системе криволинейных координат, где для контурных точек туннеля при $\rho = 1$, и $P_0 = 0$, представлены в таблице 2 для компонента напряжений.

Рассмотрим, где на контур туннеля действует напор и $P_0 = -45$ МПа. Результаты расчета напряжений от действия напора воды на контур туннеля представлены в таб.3. Решая идентичную задачу в (3) определены $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$.

Таблица 3

Изменения поле напряжения на контуре туннеля с напором

$\sigma_\rho(1, \theta)$	$\sigma_\theta(1, \theta)$	$\tau_{\rho\theta}(1, \theta)$
-45	-20.656	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
-45	-49.419	$-3.553 \cdot 10^{-15}$
-45	-78.043	$-3.553 \cdot 10^{-15}$
-45	-106.427	$8.527 \cdot 10^{-14}$
-45	-134.737	$-3.553 \cdot 10^{-14}$
-45	-163.281	$6.395 \cdot 10^{-14}$
-45	-192.110	$-4.974 \cdot 10^{-14}$
-45	-220.192	$-6.750 \cdot 10^{-14}$
-45	-244.221	$-1.776 \cdot 10^{-14}$
-45	-257.921	$-4.263 \cdot 10^{-14}$
-45	-254.203	$4.619 \cdot 10^{-14}$
-45	-231.110	$-1.457 \cdot 10^{-13}$
-45	-195.359	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
-45	-157.371	0
-45	-124.216	$-2.842 \cdot 10^{-14}$
-45	-98.035	$1.421 \cdot 10^{-14}$
-45	-78.107	$1.421 \cdot 10^{-14}$
-45	-62.810	$-7.105 \cdot 10^{-15}$
-45	-50.517	$-1.421 \cdot 10^{-14}$

Массивы поверхностей напряжений в декартовых координатах запишем в виде:

$$\sigma_x(\rho, \theta) = \frac{\sigma_{xy}(\rho, \theta) - \sigma_{xy}(\rho, \theta)}{2}; \quad \sigma_y(\rho, \theta) = \frac{\sigma_{xy}(\rho, \theta) + \sigma_{xy}(\rho, \theta)}{2}; \quad \tau_{xy}(\rho, \theta) = \frac{Im S_{xy}(\rho, \theta)}{2};$$

$$\sigma_{xy}(\rho, \theta) = \sigma_2(\rho, \theta) + \sigma_1(\rho, \theta), \quad \sigma_{xy}(\rho, \theta) = Re(S_{xy}(\rho, \theta))$$

$$s_{xy}(\rho, \theta) = (\sigma_\theta(\rho, \theta) - \sigma_\rho(\rho, \theta) + 2 \cdot i \cdot \tau_{\rho\theta}(\rho, \theta)) \cdot \frac{\rho^2}{\zeta(\rho, \theta)^2} \cdot \frac{\overline{\omega_{p1}(\rho, \theta)}}{\omega_{p1}(\rho, \theta)}; \quad \varepsilon_x(\rho, \theta) = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x(\rho, \theta) - \nu \cdot \sigma_y(\rho, \theta));$$

$$\varepsilon_y(\rho, \theta) = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y(\rho, \theta) - \nu \cdot \sigma_x(\rho, \theta)); \quad \gamma_{xy}(\rho, \theta) = \frac{1}{G} \cdot \tau_{xy}(\rho, \theta), \quad k = 0 \dots 190, \quad \theta_k = (k - 1) \cdot \frac{\pi}{18}$$

Вычисленные расчёты горизонтальных и вертикальных напряжений, когда на контур действует напор, сведутся в таблице 4.

Таблица 4

Значения контурных напряжений

θ	$\sigma_\rho(1, \theta)$	$\sigma_\theta(1, \theta)$	$\tau_{\rho\theta}(1, \theta)$
-10	-45	36.253	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
0	-45	-20.656	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
10	-45	-78.043	$-3.553 \cdot 10^{-15}$
20	-45	-134.737	$-3.553 \cdot 10^{-15}$
30	-45	-192.110	$-4.974 \cdot 10^{-14}$
40	-45	-244.221	$-1.776 \cdot 10^{-14}$
50	-45	-254.203	$4.619 \cdot 10^{-14}$
60	-45	-195.359	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
70	-45	-124.216	$-2.842 \cdot 10^{-14}$
80	-45	-78.107	$1.421 \cdot 10^{-14}$
90	-45	-50.517	$-1.421 \cdot 10^{-14}$
100	-45	-29.370	$4.263 \cdot 10^{-14}$
110	-45	-3.036	$-2.842 \cdot 10^{-14}$
120	-45	52.441	$1.279 \cdot 10^{-14}$
130	-45	228.969	$4.263 \cdot 10^{-14}$
140	-45	444.763	$1.705 \cdot 10^{-13}$
150	-45	131.076	$5.542 \cdot 10^{-13}$
160	-45	19.174	$5.684 \cdot 10^{-14}$
170	-45	-16.894	$2.132 \cdot 10^{-14}$
180	-45	-34.666	$-1.421 \cdot 10^{-14}$

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ КЫРГЫЗСТАНА, № 5, 2021

Изменения суммарного поле напряжений в (1) приведено на рис. 2 (слева), вычисленные по закону Гука [1], $E = 1.71 \cdot 10^4$, $\nu = 0,3$,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)};$$

Суммарные относительные деформации ε_x , ε_y , γ_{xy} приведены на рис. 2 (справа).

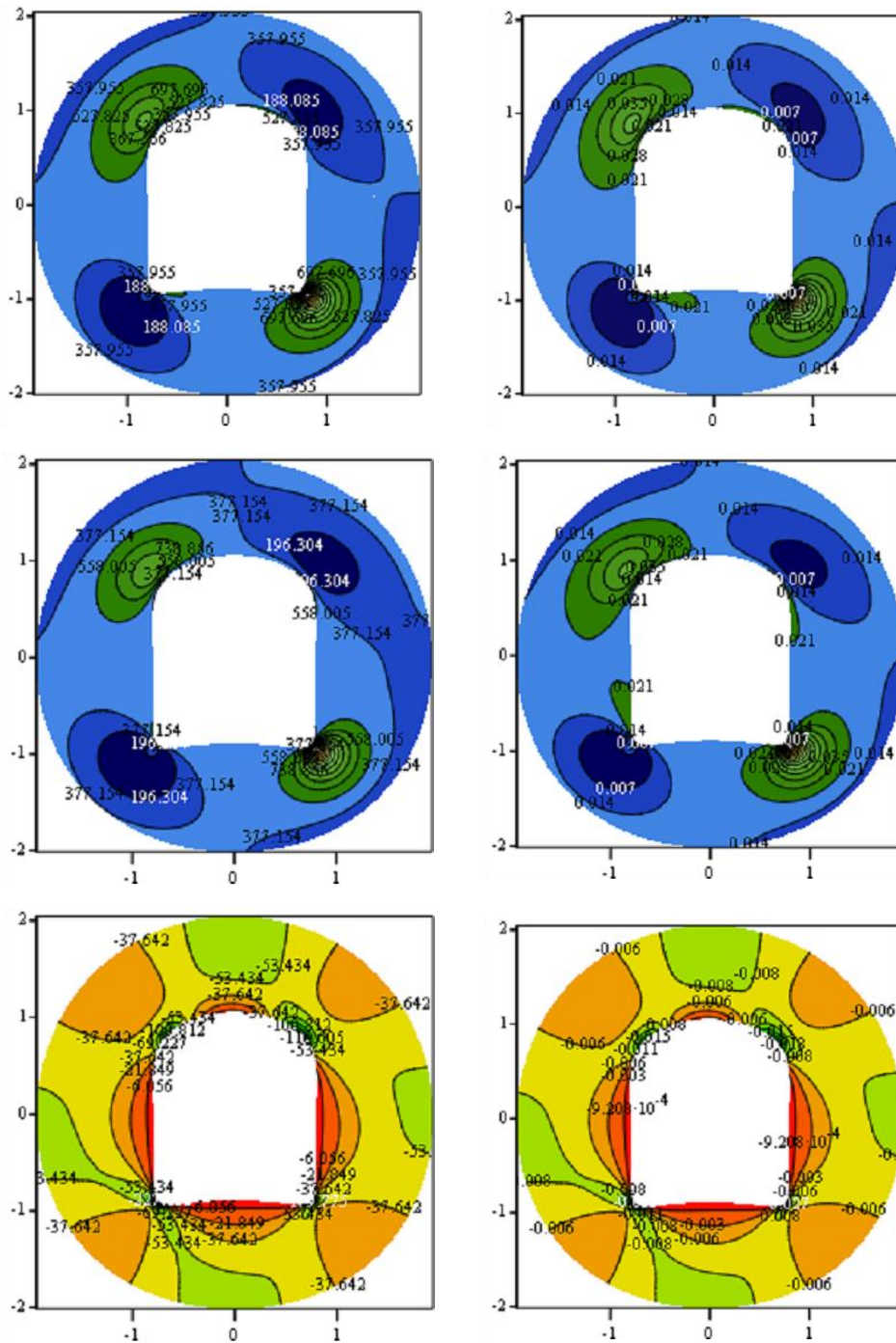


Рис. 2. Изолинии поле напряжений (слева), относительные деформации вокруг туннеля от действия напора воды (справа).

Выводы. Создана математическая модель напряженного и деформированного состояния туннеля со сводчатым сечением при напоре $P_0 = -45$ МПа. Модель пригодна для изучения и оценки состояний транспортных туннелей и горных выработок.

В кровле туннеля происходят сжатия: максимальное значения - 254.882 МПа, а минимальное значение - 3.0 Мпа. На подошве туннеля происходят растяжения, где максимальное значение равно 444 МПа, минимальное значение составляет 19 МПа.

Граничные условия (4) для напорного (безнапорного) туннеля в созданных моделях достигаются с высокой точностью, погрешность составляет не более 10^{-15} .

Математическая модель одновременно учитывает совместные влияния на напряженное и деформированное состояние таких факторов, как рельеф гор, гравитационных, тектонических сил и гидростатического напора.

Литература:

1. Жумабаев Б. Распределение напряжений в массивах пород с гористым рельефом / Жумабаев Б. - Фрунзе, 1988. - 190 с.
2. Кирьянов Д. MATCAD №14 в подлиннике. / Кирьянов Д. - СПб., БВХ-Петербург, 2007.-704с.
3. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. / Мусхелишвили Н.И. - М.: Наука, 1966. - 707 с.
4. Ботоканова Б.А. Напряженно-деформированное состояние пород вокруг напорных гидротехнических тоннелей. Материалы 2-й межд. конф., посвящ. 20-летию образования КРСУ им. первого президента РФ Б.Н.Ельцина и 100-летию Я.В.Быкова / Б.А.Ботоканова, Б.Жумабаев. // Вестник КРСУ. - Том 1. - Бишкек, 2013. – С. 181-186.
5. Ботоканова Б.А. Моделирование и расчет напряженного и деформированного состояния напорных туннелей в массиве вблизи речного каньона. / Баялиева Ж.А., Ботоканова Б.А., Жумабаев Б. / Естественные и технические науки. г. Москва. 2018. №5(119). - С. 108-118.
6. Ботоканова Б.А. Математическое моделирование напряженного и деформированного состояния вокруг напорного туннеля, расположенного в зоне межгорной впадины. [Текст] / Баялиева Ж.А., Ботоканова Б.А., Жумабаев Б. // Вестник Забайкальского государственного университета. г. Чита. 2018. - Т. 24. №7. - С. 4-17.
7. Ботоканова Б.А. Моделирование и прогноз напряженного и деформированного состояния напорного туннеля треугольным сечением. [Текст] / Ботоканова Б.А., Жумабаев Б. // Вестник. Науки и образования. г. Москва. 2018. Т. 2. № 6(42). с. 88-97.
8. Ботоканова Б.А. Расчет напряжений и деформаций массивов вокруг напорного туннеля трапециевидным сечением. / Ботоканова Б.А., Жумабаев Б. / European Journal of Technical and Natural Sciences. Vienna. 2018. - № 3. - С.16-27.
9. Ботоканова Б.А. О концентрации напряжений вокруг туннелей с типовыми поперечными сечениями. / Ботоканова Б.А. // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. - Бишкек, 2018. №9 С. 13-33.