

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ГОРНОМ МАССИВЕ

Б. А. Ботоканова

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

Аннотация: Проведен анализ распределения напряжений в области туннелей с трапециевидным сечением в зоне влияния горных склонов с использованием методики Колосово – Мусхелишвили. Разработана аналитическая модель, учитывающая различные факторы, такие как рельеф гор, расположение туннеля, гидростатическое давление, объемные и тектонические силы. Предложенный подход позволяет более точно определить напряженное состояние горных массивов вокруг туннелей и прогнозировать возможные деформации и разрушения. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и эксплуатации подземных сооружений, обеспечивая более надежную оценку безопасности и устойчивости горных пород.

Ключевые слова: склоны горы, горная выработка, напряжения, деформация, конформное отображение, давление, гидростатический напор

Для цитирования: Ботоканова Б. А. Исследование напряженного состояния пород вокруг гидротехнического туннеля, расположенного в горном массиве // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №4. С. 30-34. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_30_34.

STUDY OF THE STRESSED STATE OF ROCKS AROUND A HYDRAULIC TUNNEL LOCATED IN A MOUNTAIN MASSIF

B. A. Botokanova

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan

Abstract: This article analyzes the stress distribution in the area of tunnels with a trapezoidal cross-section in the zone of influence of mountain slopes, using the Kolosovo-Muskhelishvili method. An analytical model has been developed that takes into account various factors, such as mountain topography, tunnel location, hydrostatic pressure, volumetric and tectonic forces. The proposed approach makes it possible to more accurately determine the stressed state of rock masses around tunnels and predict possible deformations and destruction. The results obtained can be useful in the design and operation of underground structures, providing a more reliable assessment of the safety and stability of rocks.

Keywords: stress, deformation, conformal mapping, mountain slopes, mine workings, pressure, hydrostatic head

For citation: Botokanova B. A. Study of the stressed state of rocks around a hydraulic tunnel located in a mountain massif. Mine Surveying and Subsoil Use. 2024;(4):30-34. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_30_34.

Введение

В горных районах являются необходимыми исследования по обеспечению устойчивости горных пород вокруг подземных пространств, используемых для добычи полезных ископаемых или транспортировки гидроресурсов через туннели. Формирование напряженного состояния пород вокруг туннелей и выработок зависит от различных факторов, таких как склоны гор и впадин, действие силы гравитации, сейсмические и тектонические процессы, давление воды и внешние нагрузки [1, 2].

Поэтому оценка напряженного и деформированного состояния горных массивов вокруг выработок и туннелей с учетом этих факторов является ключевой задачей.

Традиционные методы оценки состояния горных массивов вокруг туннелей и выработок из-за различных факторов становятся дорогостоящими и неэффективными. Методы разгрузки, ультразвукового зондирования и фотоупругости не всегда способны учесть все влияющие факторы одновременно. Поэтому использование метода конечных разностей (МКР) или метода конечных элементов (МКЭ) при моделировании горных массивов вокруг туннелей представляет сложность из-за разных масштабов измерений. Для достижения точности и надежности моделирования необходимо проводить сопоставление результатов, полученных с помощью МКЭ и МКР, с данными, полученными другими методами [3, 4].

Цель исследования. Разработать аналитическую модель напряженно-деформированного состояния горных массивов вокруг туннелей и выработок, учитывающую различные факторы, такие как рельеф гор, расположение туннелей, воздействие гидростатического давления, объемные и тектонические силы. Создание такой модели позволит более точно оценить состояние горных пород и предсказать возможные деформации и разрушения вокруг туннеля.

Задачи исследований

После анализа начального состояния горного массива необходимо изучить влияние создания туннеля различной формы на исходное напряженное состояние массива. Затем после определения распределения напряжений вокруг туннеля требуется оценить воздействие давления воды, которое распределяется по закону Паскаля.

В работе задействованы такие методы, как:

- метод двумерной теории упругости,
- аппарата конформных отображений,
- метод Колосова – Мухелишвили,
- использование программного обеспечения MATHCAD,
- численный расчет и компьютерная графика на ПЭВМ.

Результаты исследований

В рамках метода Колосова–Мухелишвили [4] и с использованием программного комплекса MATHCAD было проведено исследование начального напряженно-деформированного состояния массивов одиночной горы. Рельеф горы в разрезе имеет форму полуплоскости с одним криволинейным выступом, где левый склон практически перпендикулярен к основанию. Для анализа напряжений используется метод конформного отображения с использованием функции, описанной в работе [6–8], которая моделирует форму горы (рис. 1).

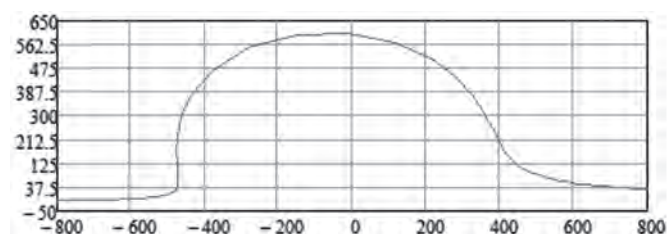


Рис. 1. Форма горы с вертикальным склоном (м)
Fig. 1. Mountain shape with vertical slope (m)

Результаты расчета напряжений в начальном состоянии горы с вертикальным склоном представлены в таблице 1, и

эти данные относятся к зоне сопряжения склона горы с его основанием [8, 9].

Из таблицы 1 видно в контурных точках склона горы при $N = T = 0$ выполняется с высокой точностью, где величина погрешности не более 10^{-15} ; наибольшее значение главной нормальной компоненты напряжений $\sigma_2 = 81,5$ МПа.

Исходя из закономерностей в распределении напряжений в зоне соединения борта склона горы с его основанием, мы принимаем поле напряжений для более точной интерпретации будущих модельных представлений об образовании туннеля.

Математическая модель напряженного состояния пород в окрестностях туннеля с трапециевидным сечением на склоне горы представляет собой объединение полей напряжений [10, 11]:

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

Предложенный метод анализа напряжений вокруг туннеля в горных массивах основан на суммировании трех компонентов полей напряжений.

Первый компонент включает в себя влияние силы гравитации и горизонтального тектонического сжатия, выраженное через интегрирование уравнений равновесия.

Второй компонент учитывает воздействие формы горного рельефа на распределение напряжений.

Третий компонент связан с влиянием напора воды на распределение напряжений при строительстве туннеля в горных породах.

Для решения задачи используется математический аппарат двумерной теории упругости, который позволяет с помощью конформных отображений перевести полубесконечную область на полуплоскость и отобразить отверстия на внешность единичного круга. Результаты исследований, описанные автором, были подробно изложены и опубликованы в соответствующих работах [10, 11].

Сумма первых трех полей напряжений в контурных точках туннеля напряженное состояние (1) массивов соответствует следующим граничным условиям [9, 10, 11]:

$$\begin{aligned}(\sigma_x^p + \sigma_x^n + T_x + \sigma_x^m) \cdot (\cos n, x) + (\tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m) \cdot (\cos n, y) &= 0 \\ (\tau_{xy}^n + \tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m) \cdot (\cos n, y) + (\sigma_x^p + \sigma_x^n + \sigma_x^m) \cdot (\cos n, x) &= 0.\end{aligned}\quad (2)$$

Вычисленные значения компонент в центре воображаемого туннеля обозначены через S_x, S_y, S_{xy} . Поэтому поле на-

Таблица 1 / Table 1

Значение напряжений на склоне горы / Importance of stresses on the mountain slope

0	t	x (м)	y(м)	σ_1 (МПа)	σ_2 (МПа)	N (МПа)	T (МПа)	T _{max} (МПа)
1	-5	-621,2	-5,8	0	-33,7	$2,1 \cdot 10^{-15}$	$2,4 \cdot 10^{-15}$	-33,4
2	-4	-550	0	0	-46,3	0	0	-43
3	-3	-495	15	0	-81,5	$7,1 \cdot 10^{-15}$	$3,6 \cdot 10^{-15}$	-22,5
4	-1	-470	60	$3,6 \cdot 10^{-15}$	-32,7	$6,4 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-14}$	-32,4
5	0	-475	225	0	-2,3	0	0	-2,2
6	1	-150	600	$2,2 \cdot 10^{-15}$	-0,5	$2,2 \cdot 10^{-15}$	0	-0,4
7	2	325	375	$4,6 \cdot 10^{-15}$	-1,9	$4,4 \cdot 10^{-15}$	$2,1 \cdot 10^{-15}$	-0,5
8	3	410	180	$4,4 \cdot 10^{-15}$	-13,8	$4,4 \cdot 10^{-15}$	$4,4 \cdot 10^{-15}$	-5,9
9	4	495	105	0	-34,9	0	$3,1 \cdot 10^{-15}$	-1,9
10	5	532,4	70,6	0	-35	0	0	-22,3

пряжений об образовании туннеля $\sigma_x^m, \sigma_y^m, \tau_{xy}^m$ будем искать из граничного условия (2).

Влияние туннеля $\sigma_x^T, \sigma_y^T, \tau_{xy}^T$ устанавливается путем решения граничной задачи для плоскости xoy с отверстием, форма которой моделируется с помощью отображающей функции [11]:

$$z = \omega(\zeta); z = x + i \cdot y; i = \sqrt{-1}; \zeta = \rho e^{i\theta}; \omega(\zeta) = e^{i\delta} R[\zeta + \omega_0(\zeta)]; \omega_0(\zeta) = \sum_{k=1}^5 \frac{d_k}{\zeta^k}. \quad (3)$$

где $1 \leq \rho \leq \infty$ – 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.

Параметры отображающей функции d_1, d_2, d_3, d_4 определяем путем вариации их значений в таблице 2, и можно моделировать в разных трапециевидных форм поперечных сечений туннелей в частности (рис. 2).

Таблица 2 / Table 2

Параметры отображающей функции / Display feature settings

№	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	δ
x4-y4	-0,021	0,102	-0,150	-0,026	0,002	900

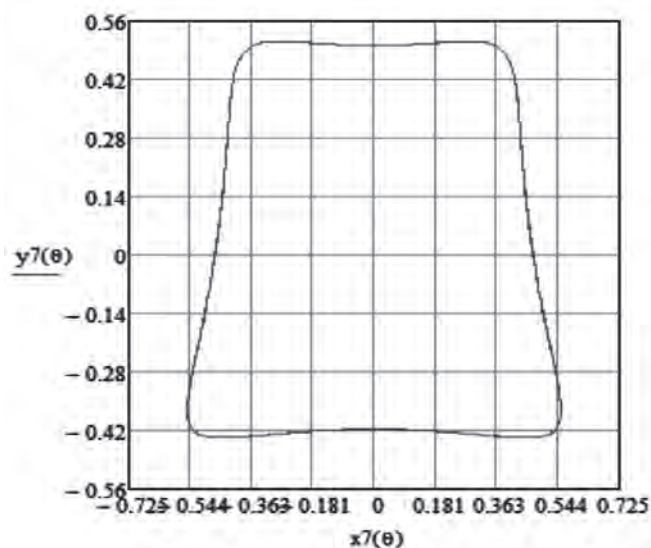


Рис. 2. Трапециевидное однопутевое сечение туннеля
Fig. 2. Trapezoidal single track tunnel section

Поле напряжений от влияния возникновения туннеля напряжений в массиве склона горы $\sigma_p, \sigma_\theta, \tau_{p,\theta}$, где начальное напряженное состояние в точке возникновения туннеля характеризуется компонентами S_x, S_y, S_{xy} , и будет определено из граничных условий (2). Условие (2) в преобразованной плоскости новых переменных (3) принимают вид [10, 11]:

$$\begin{aligned} [R\Gamma\sigma + \phi(\sigma)] + [R\bar{\Gamma} + \bar{\phi}'(\sigma)] \cdot \left[\frac{\omega(\sigma)}{\omega'(\sigma)} \right] + [R\Gamma'\sigma + \bar{\psi}(\sigma)] &= 0; \\ [R\bar{\Gamma}\sigma + \bar{\phi}(\sigma)] + [R\Gamma + \phi'(\sigma)] \cdot \left[\frac{\omega(\sigma)}{\omega'(\sigma)} \right] + [R\Gamma'\sigma + \psi(\sigma)] &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Интегралы типа Коши от заданных граничных условий (4) определяют искомые функций $\phi(\zeta), \psi(\zeta)$ в зависимости от конкретной формы сечения туннеля.

Когда на контур туннеля действует гидростатический напор воды $P_0 = -10$ МПа, мы решаем третью граничную

задачу и определяем функции $\phi(\zeta), \psi(\zeta)$ из следующих условий [10, 11]:

$$\begin{aligned} \phi(\sigma) + \bar{\phi}'(\sigma) \left[\frac{\omega(\sigma)}{\omega'(\sigma)} \right] + \bar{\psi}(\sigma) &= -P_0 R \omega(\sigma); \\ \bar{\phi}(\sigma) + \phi'(\sigma) \cdot \left[\frac{\omega(\sigma)}{\omega'(\sigma)} \right] + \psi(\sigma) &= -P_0 R \bar{\omega}(\sigma). \end{aligned} \quad (5)$$

Для нахождения функций $\phi(\zeta), \psi(\zeta)$ из граничных условий (4) и (5) мы выразим их в виде суммы постоянных коэффициентов, определенных в уравнениях (4) и (5).

$$\begin{aligned} N_1 &= R e^{-i\delta} \left(\frac{S_x + S_y}{4} \right); N_2 = R e^{-i\delta} \left(\frac{S_x - S_y + 2iS_{xy}}{2} \right); \\ N_3 &= \bar{N}_1, N_4 = N_3. \end{aligned}$$

Интегралы типа Коши от граничных условий в (4) и (5) представим в виде

$$\begin{aligned} \phi(\zeta) + G(\zeta) &= A_0(\zeta); \\ \phi'(\zeta) \cdot \left[\frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \right] + \psi(\zeta) - \bar{G}(\zeta) &= B_0(\zeta); \\ G(\zeta) &= [b_3 \bar{R}_1 - 2b_4 \bar{R}_2]^{2i\delta} \zeta^{-1} + [b_4 \bar{R}_1]^{2i\delta} \zeta^{-2}; \\ A_0(\zeta) &= \sum_{k=1}^5 c a_k \zeta^{-k}; B_0(\zeta) = \sum_{k=1}^5 s b_k \zeta^{-k} \end{aligned} \quad (6)$$

Вычисляем распределения напряжений (1) для каждого компонента напряжений $\sigma_p, \sigma_\theta, \tau_{p,\theta}$ в системе криволинейных координат. Результаты представлены в таблице 3 при $P_0 = 0$, в таблице 4 при $P_0 = -10$ МПа.

Для выполнения дальнейших расчетов принимаем

$$S_x = -20 \text{ МПа}; S_y = -15 \text{ МПа}; S_{xy} = -15 \text{ МПа}.$$

Таблица 3 / Table 3

Контурные значения напряжений / $P_0 = 0$ /
Circuit values of voltage capital P base index 0 is 0

θ (град)	σ_p (МПа)	σ_θ (МПа)	$\tau_{p,\theta}$ (МПа)
10	$5,329 \cdot 10^{-15}$	-21,973	$-1,776 \cdot 10^{-15}$
20	$1,599 \cdot 10^{-14}$	-25,058	$5,329 \cdot 10^{-15}$
30	$8,882 \cdot 10^{-15}$	-29,879	$7,105 \cdot 10^{-15}$
40	$-1,776 \cdot 10^{-15}$	-37,464	$5,329 \cdot 10^{-15}$
50	$2,132 \cdot 10^{-14}$	-49,732	$8,882 \cdot 10^{-15}$
60	$4,263 \cdot 10^{-14}$	-40,140	$3,553 \cdot 10^{-15}$
70	$-2,132 \cdot 10^{-14}$	-103,698	$6,395 \cdot 10^{-14}$
80	$-1,421 \cdot 10^{-14}$	-149,07	$1,590 \cdot 10^{-13}$
90	$2,185 \cdot 10^{-13}$	-172,33	$6,106 \cdot 10^{-14}$
100	$8,171 \cdot 10^{-14}$	-139,598	$-1,279 \cdot 10^{-13}$
110	$-3,730 \cdot 10^{-14}$	-91,794	$-8,527 \cdot 10^{-14}$
120	0,000	-58,979	$-6,217 \cdot 10^{-14}$
130	$3,197 \cdot 10^{-14}$	-39,742	$-1,954 \cdot 10^{-14}$
140	$2,132 \cdot 10^{-14}$	-28,416	$1,243 \cdot 10^{-14}$
150	$3,553 \cdot 10^{-15}$	-21,464	$1,066 \cdot 10^{-14}$
160	$7,105 \cdot 10^{-15}$	-17,006	$3,553 \cdot 10^{-15}$
170	$7,105 \cdot 10^{-15}$	-14,048	$1,243 \cdot 10^{-14}$
180	$7,105 \cdot 10^{-15}$	-12,044	$3,553 \cdot 10^{-15}$

Таблица 4 / Table 4

Контурные значения напряжений $P_0 = -10$ МПа
Circuit values of voltages capital P bottom index 0 is minus 10, MPa

θ (град)	σ_p (МПа)	σ_θ (МПа)	$\tau_{p\theta}$ (МПа)
10	-10	-22,861	0
20	-10	-25,660	$1,066 \cdot 10^{-14}$
30	-10	-29,556	$8,882 \cdot 10^{-15}$
40	-10	-35,350	$-1,776 \cdot 10^{-15}$
50	-10	-44,457	$3,197 \cdot 10^{-14}$
60	-10	-59,404	$7,105 \cdot 10^{-15}$
70	-10	-83,819	$3,197 \cdot 10^{-14}$
80	-10	116,698	$1,519 \cdot 10^{-13}$
90	-10	133,437	$7,794 \cdot 10^{-14}$
100	-10	-109,597	$-8,171 \cdot 10^{-14}$
110	-10	-74,909	$-7,638 \cdot 10^{-14}$
120	-10	-51,102	$-4,263 \cdot 10^{-14}$
130	-10	-37,111	$-1,776 \cdot 10^{-15}$
140	-10	-28,812	$-1,776 \cdot 10^{-15}$
150	-10	-23,630	$7,105 \cdot 10^{-15}$
160	-10	-20,189	$3,553 \cdot 10^{-15}$
170	-10	-15,860	$7,105 \cdot 10^{-15}$
180	-10	-14,253	$5,329 \cdot 10^{-15}$

Из трех компонентов напряжений только одна (окружающая компонента) отличается от нуля, в то время как нормальная и касательная компоненты в большинстве точек близки к нулю. Результаты расчетов представлены на рисунке 3 (см. цветную вклейку на стр. 44) в виде изолиний распределения напряжений для напорных и безнапорных туннелей с трапециевидным сечением.

Концентрация напряжений вокруг трапециевидного сечения безнапорного $P_0 = 0$ туннеля (рис. 2), на своде имеется сжатие, а на подошве туннеля вызывает небольшие сжатия – растяжения [11-14].

Пределы прочности на сжатие наиболее распространенных горных пород, по СНиП [14], $\sigma_{сж}$ – среднее значение прочности на одноосное сжатие составляет: гранит – 200 МПа, кварцит – 220 МПа, песчаник – 115 МПа.

Коэффициент запаса устойчивости вокруг туннеля определяется по формуле

$$n = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_\theta}$$

Вычисленные значения коэффициента запаса устойчивости вокруг туннеля с различными сечениями для предела прочности на сжатие для разновидностей крепких скальных горных пород представлены в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

Расчет коэффициента запаса устойчивости приконтурного массива для безнапорных туннелей в зависимости от прочности горных пород
Calculation of the stability factor of the tachyderm mass for free tunnels depending on rock strength

Сечение туннеля	Максимальное напряжение на контуре туннеля σ_θ , МПа	Коэффициент запаса устойчивости, n		
		Кварцит $\sigma_{сж} = 220$ МПа	Гранит $\sigma_{сж} = 200$ МПа	Песчаник $\sigma_{сж} = 115$ МПа
Трапециевидное	-172,333	1,3	1,2	0,67

В результате выявлено, что наиболее устойчивое состояние приконтурного массива характерно для туннелей со трапециевидным сечением, когда на контуре туннеля отсутствует напор.

Выбор методов крепления туннелей основывается на коэффициенте запаса устойчивости, когда коэффициент устойчивости $n \leq 1$, состояние приконтурного массива вокруг туннеля неустойчивое и требуется крепление, при коэффициенте устойчивости $n > 1$ состояние приконтурного массива вокруг туннеля устойчивое, т. е. крепление не требуется.

Заключение

В статье приведены результаты исследования напряженного состояния массивов вокруг напорного и безнапорного туннеля с трапециевидным сечением.

Установлено, что напор воды вызывает растяжение в контурных точках туннеля и сжатие в направлении, перпендикулярном к контуру.

3. Разработанная математическая модель напряженного состояния напорных и безнапорных туннелей с типовыми сечениями может быть использована для оценки состояния вокруг транспортных туннелей и горных выработок с аналогичными профилями.

4. Расчеты напряжений и их графическое представление выполнены в новой программной среде MATHCAD [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклашов, И. В. Геомеханика. Том 1. Основы геомеханики / И. В. Баклашов. – М.: Изд. МГГУ, 2004. – 207 с.
2. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock mechanics for underground mining. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.
3. Абдылдаев, Э. К. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород вблизи выработок / Э. К. Абдылдаев. – Фрунзе: Илим, 1990. – 162 с.
4. Мухелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
5. Ержанов, Ж. С. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоистом массиве / Ж. С. Ержанов, Ш. М. Айтиев, Ж. К. Масанов. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 206 с.
6. Ходасевич Г. Б. Напряженное состояние массива пород в окрестности выработки, пройденной в горном склоне: автореферат дис... канд. техн. наук / Г.Б. Ходасевич. - Бишкек, 1994. - 17 с.
7. Аманалиев, А. А. Напряженно-деформированное состояние пород вокруг подземных выработок, пройденных в слоистом массиве горной местности: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. А. Аманалиев. – Бишкек, 1997. – 17 с.
8. Жумабаев, Б. Математическое моделирование напряженного состояния массивов склонов гор / Б. Жумабаев // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. – Т. 17, № 5. – С. 25-30.
9. Assessment of the Strain-Stress Distribution in the Vicinity Conceding Mountainside's Scarp Using Mathematical Modeling / J. A. Baialieva, K. J. Ismailova, K. K. Abdygaziev [et al.] // Sustainable Development Risks and Risk Management. – 2023. – P. 375-380. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34256-1_65

10. Botokanova, B. A. B. Zhumabaev Calculation of stresses and deformations of arrays around a pressure tunnel with a trapezoidal section // European Journal of. Technical and Natural Sciences. – 2018. – № 3. – P. 16–27.

11. Ботоканова, Б. А. Методика математического моделирования напряженного состояния вокруг напорного туннеля, расположенного в горном массиве / Б. А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Естественные и технические науки. – 2018. – № 8 (122). – С. 235–243.

12. Hast, N. Stress Fields, Fracture Systems and the Mechanism for Movements in the Gneiss-Granite Area of the Mont Blanc Massif / N. Hast // Tectonic Stresses in the Alpine-Mediterranean Region. Conference paper. – 1980. – Vol 9. – P. 1-13.

13. Hoek, E. Hoek-Brown criterion – 2002 edition / E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum // In Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada: NARMS-TAC. – 2002. – Vol. 1. – P. 267-273.

14. СНиП-7-81. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Строительство в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1982. – 49 с.

15. Кирьянов, Д. В. MATCAD 14 / Д. В. Кирьянов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2007. – 685 с.

REFERENCES

1. Baklashov IV. Geomechanics. Volume 1. Fundamentals of Geomechanics. Moscow, 2004 (In Russ.).
2. Brady BHG., Brown ET. Rock mechanics for underground mining. Dordrecht, 2006.
3. Abdylaliev EK. Stress-strain state of a rock mass near workings. Frunze, 1990 (In Russ.).
4. Muskhelishvili NI. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. Moscow, 1966 (In Russ.).
5. Yerzhanov ZhS, Aitaliev ShM, Masanov ZhK. Seismic stress state of underground structures in an anisotropic layered massif. Alma-Ata, 1980 (In Russ.).
6. Khodasevich GB. The stressed state of the rock mass in the vicinity of the workings passed in the mountain slope: abstract of the dissertation... Candidate of Technical Sciences. – Bishkek, 1994. – 17 p.
7. Amanaliev AA. The stress-strain state of rocks around underground workings passed in a layered massif of mountainous terrain. Bishkek, 1997 (In Russ.).
8. Zhumabaev B. Mathematical modeling of the stressed state of mountain slope arrays // Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University. 2017;17(5):25-30 (In Russ.).
9. Baialieva JA, Ismailova KJ, Abdygazyev KK, et al. Assessment of the Strain-Stress Distribution in the Vicinity Conceding Mountainside's Scarp Using Mathematical Modeling. Sustainable Development Risks and Risk Management. 2023;375-80. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34256-1_65.
10. Botokanova BA, Zhumabaev B. Calculation of stresses and deformations of arrays around a pressure tunnel with a trapezoidal section. European Journal of. Technical and Natural Sciences. 2018;3:16–27.
11. Botokanova BA, Zhumabaev B. Method of mathematical modeling of the stress state around a pressure tunnel located in a mountain range. Natural and technical sciences. 2018;8(122):235-43 (In Russ.).
12. Hast N. Stress Fields, Fracture Systems and the Mechanism for Movements in the Gneiss-Granite Area of the Mont Blanc Massif. Tectonic Stresses in the Alpine-Mediterranean Region: Conference paper. 1980;9:1-13.
13. Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown criterion – 2002 edition. In Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada: NARMS-TAC. 2002;1:267-73.
14. SNiP-7-81. Building codes and regulations. Design standards. Construction in seismic areas. Moscow, 1982 (In Russ.).
15. Kiryanov DV. MATCAD 14. St. Petersburg, 2007 (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Ботоканова Бактыгул Асанкожоевна –
кандидат технических наук, доцент, Кыргызский
государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан, e-mail: b993344@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Baktygul A. Botokanova –
candidate of technical sciences, docent, Kyrgyz State Technical
University named after. I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan, e-mail:
b993344@mail.ru