

УДК 627.842:622.831.3
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-136-147

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ТУННЕЛЕЙ ПРИ ПРОХОДКЕ ЧЕРЕЗ КРЕПКИЕ СКАЛЬНЫЕ ПОРОДЫ

Б.А. Ботоканова, Н.Х. Тургунбаев, Б.Ж. Жаныбаева, А.Э. Мамбетов

Аннотация. Рассматривается распределение напряжений и деформаций в окрестности гидротехнического туннеля, расположенного в массиве речного каньона. Для анализа используется метод Колосова–Мусхелишвили, позволяющий учесть гидростатическое давление воды, тектонические и гравитационные нагрузки. В результате моделирования определены особенности напряжённого состояния массива, включая максимальные растягивающие и сжимающие напряжения, которые возникают в разных частях конструкции в зависимости от наличия или отсутствия гидростатического давления. Рассмотрены экономические аспекты проектирования, такие как оптимизация радиуса сечения, толщины обделки и типа крепи, что позволяет снизить затраты на материалы и строительство. Подчёркнута необходимость эффективного укрепления конструктивно напряжённых зон, в частности, в области подошвы туннеля, где достигаются максимальные напряжения. Для оценки этих аспектов использованы данные численных расчётов, выполненных с помощью Mathcad, что обеспечило точность и надёжность результатов.

Ключевые слова: гидротехнический туннель; гидростатическое давление; напряжения; деформация; деривация; горный рельеф; обделка; крепление.

БЕКЕМ АСКА ТЕКТЕР АРКЫЛУУ ӨТҮҮЧҮ ГИДРОТЕХНИКАЛЫК ТУННЕЛДЕРДИН ЧЫҢАЛУУ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫК АБАЛЫ

Б.А. Ботоканова, Н.Х. Тургунбаев, Б.Ж. Жаныбаева, А.Э. Мамбетов

Аннотация. Бул макалада Дарыя каньонунун массивинде жайгашкан гидротехникалык туннельге жакын жерде чыңалуулардын жана деформациялардын бөлүштүрүлүшү каралат. Талдоо үчүн суунун гидростатикалык басымын, тектоникалык жана гравитациялык жүктөрдү эсепке алууга мүмкүндүк берүүчү Колосов-Мусхелишвили ыкмасы колдонулат. Модельдештирүүнүн натыйжасында массивдин чыңалуу абалынын өзгөчөлүктөрү, анын ичинде гидростатикалык басымдын бар же жоктугуна жараша конструкциянын ар кайсы бөлүктөрүндө пайда болгон максималдуу чыңалуу жана кысуу чыңалуулары аныкталган. Дизайндын экономикалык аспекти каралат, мисалы, кесилишинин радиусун, каптаманын калыңдыгын жана таянычтын түрүн оптималдаштыруу, бул материалдардын жана курулуштун чыгымдарын азайтат. Конструктивдүү чыңалган зоналарды, атап айтканда, максималдуу чыңалууга жетишилген туннельдин таманынын аймагында эффективдүү бекемдөө зарылчылыгы баса белгиленди. Бул аспектилерди баалоо үчүн натыйжалардын тактыгын жана ишенимдүүлүгүн камсыз кылган Mathcad аркылуу жүргүзүлгөн сандык эсептөөлөрдүн маалыматтары колдонулган.

Түйүндүү сөздөр: гидротехникалык туннель; гидростатикалык басым; чыңалуулар; деформация; деривация; тоолуу рельеф; обделка; бекемдөө.

THE STRESS-DEFORMED STATE OF HYDROTECHNICAL TUNNELS WHEN WORKING THROUGH STRONG ROCK

B.A. Botokanova, N.Kh. Turgunbaev, B.Zh. Zhanybaeva, A.E. Mambetov

Abstract. The article considers the distribution of stresses and deformations in the vicinity of a hydraulic tunnel located in the massif of a river canyon. The Kolosov–Muskhelishvili method is used for the analysis, which allows taking into

account hydrostatic water pressure, tectonic and gravitational loads. As a result of the simulation, the features of the stressed state of the array are determined, including the maximum tensile and compressive stresses that occur in different parts of the structure, depending on the presence or absence of hydrostatic pressure. The economic aspects of design are considered, such as optimizing the radius of the section, the thickness of the lining and the type of support, which reduces the cost of materials and construction. The article emphasizes the need for effective strengthening of structurally stressed zones, in particular at the bottom of the tunnel, where maximum stress is reached. To evaluate these aspects, numerical calculations performed using Mathcad were used, which ensured the accuracy and reliability of the results.

Keywords: hydrotechnical tunnel; hydrostatic pressure; stress; deformation; derivation; mountain relief; lining; fastening.

Введение. Значительная часть территории Кыргызстана покрыта высокими хребтами Тянь-Шаня и Памиро-Алая. Уникальные природные условия делают строительство гидротехнических сооружений в предгорных и горных районах одной из ключевых задач для развития страны. Основной потенциал гидроэнергетики сосредоточен на горных реках, что определяет выбор мест для строительства гидроэлектростанций (ГЭС) и деривационных малых гидроэлектростанций (МГЭС) [1].

В условиях сложного горного рельефа гидротехнические туннели играют важную роль при реализации крупных инфраструктурных проектов. Эти сооружения используются для транспортировки воды в деривационных системах, отвода потоков через плотины, а также для обеспечения безопасной эксплуатации ГЭС. Предгорные зоны Кыргызстана, где происходит строительство таких объектов, характеризуются высокими сейсмическими рисками, сложной геологической структурой и наличием тектонических процессов, что требует учёта множества факторов при проектировании и строительстве.

Масштабность и важность строительства гидротехнических туннелей в горных условиях требуют применения точных инженерных подходов и научного анализа. Одной из ключевых задач является исследование напряжённо-деформированного состояния массива горных пород вокруг туннеля, поскольку от этого зависит его устойчивость, безопасность и долговечность [1].

В данной работе представлена математическая модель, которая позволяет учитывать влияние ключевых факторов: рельефа гор, действия гравитационных сил, тектонического растяжения и сжатия, а также гидростатического напора воды. Применение такой модели актуально для проектирования и исследования гидротехнических туннелей в условиях Кыргызстана. Она позволяет определить оптимальные параметры сооружений, повысить их надёжность и сократить риски при строительстве и эксплуатации.

Таким образом, создание и использование математических моделей для анализа напряжённо-деформированного состояния горных массивов вокруг туннелей является важной и актуальной задачей в развитии гидротехнической инфраструктуры Кыргызстана.

Материалы и методы. Для решения задач, связанных с определением начального упругого распределения напряжений в анизотропных массивах вокруг горных выработок произвольного профиля, в данной работе использованы методики, разработанные С.Г. Лехницким и А.С. Космодианским. Эти методики позволили эффективно учитывать анизотропию материалов и сложность формы выработок при решении задач, касающихся напряжённо-деформированного состояния [2, 3].

Основной подход, применяемый в статье, основан на методе Колосова–Мухелишвили, который является важным инструментом для анализа напряжений в изотропных массивах, особенно в присутствии сложных геометрических форм, таких как горные выработки. Этот метод оказывается особенно эффективным при применении конформных отображений, которые позволяют трансформировать сложные геометрические формы в более простые, облегчая дальнейший анализ.

Кроме того, в работе активно используются свойства интегралов типа Коши, что значительно повышает точность вычислений и позволяет эффективно решать задачи, связанные с напряжённым состоянием массивов с горным рельефом. Эффективность предложенной методики была подтверждена многочисленными работами, включая исследования Н.И. Мухелишвили, Г.Н. Савина, Ж.С. Ержанова

и Б. Жумабаева, которые продемонстрировали высокую применимость и точность метода Колосова–Мусхелишвили в различных геологических и инженерных задачах [2, 3].

Основная часть. Для моделирования массивов вокруг туннеля, расположенного в горной местности или глубоком речном каньоне, используется полубесконечная область S_0 с круглым поперечным сечением. Рельеф каньона в разрезе представлен в виде полуплоскости с одним криволинейным вырезом (рисунок 1). Для определения напряжений применяется аппарат конформного отображения, который позволяет преобразовать сложные геометрические области в более простые для аналитического решения задачи [4–6]:

$$z = \omega(\zeta); z = x + i \cdot y; \zeta = \xi + i \cdot \eta; i = \sqrt{-1};$$

$$\omega(\zeta) = a \cdot \zeta + \omega_0(\zeta); \omega_0(\zeta) = \frac{a_1}{(\zeta - i)} \cdot \dots \quad (1)$$

Конформное отображение позволяет учитывать сложную форму рельефа каньона и туннеля, преобразуя их в эквивалентные участки на комплексной плоскости, где уравнения напряжённого состояния имеют более простое аналитическое решение [6]. Этот подход обеспечивает высокую точность при моделировании распределения напряжений вокруг туннеля, что особенно важно в условиях сложного горного рельефа.

С помощью функции (1) построим форму выреза-каньона (рисунок 1), численные значения параметров равны: $a = 400$; $a_1 = -300$ м.

Расчет начального напряженного состояния каньона без туннеля в (1) и их значения компонентов напряжений для контурных точек каньона представлен в предыдущих работах автора и вычислены относительно декартовых координат, представленных для каждого компонента напряжений на рисунке 2 и приняты как [7]:

$$\lambda = 0.50; \gamma = 2.75 \cdot 10^{-2}; T_x = -20 \text{ МПа.}$$

Наибольшие напряжения концентрируются в зоне сопряжения борта каньона с его основанием. Здесь вертикальная нормальная компонента достигает максимального значения $-86,20$ МПа, горизонтальная $-390,20$ МПа, а касательная $-29,40$ МПа. С удалением на 30–50 м от основания происходит существенное снижение напряжений: горизонтальная нормальная компонента уменьшается до $-59 \dots -59$ МПа, вертикальная – до -20 МПа, касательная – до 15 МПа (рисунок 2).

Такое распределение напряжений указывает на локализацию высоких напряжений вблизи сопряжения борта каньона с его основанием и их быстрое затухание в массиве горных пород на удалении от этой зоны.

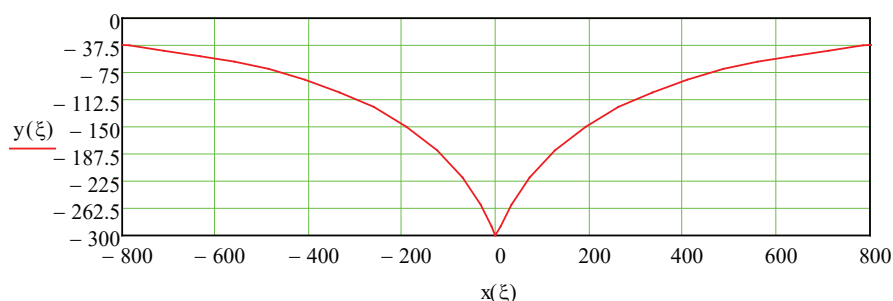


Рисунок 1 – Расчетная форма выреза-каньона

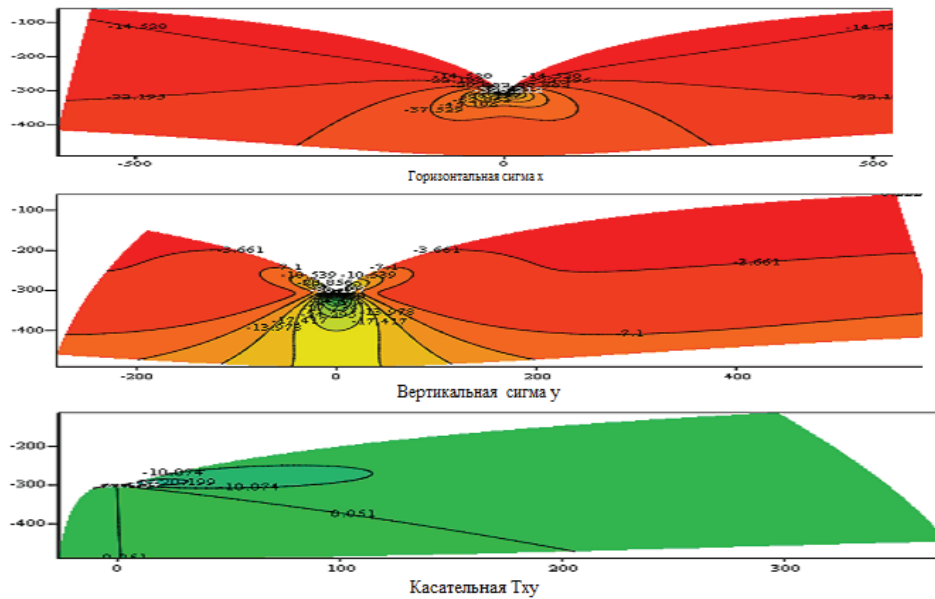


Рисунок 2 – Распределение напряжений каждого компонента – σ_x , σ_y , τ_{xy} в массивах каньона (МПа)

Постановка задачи для гидротехнического туннеля проводится следующим образом. Согласно ранее опубликованным работам Б.А. Ботокановой, математическая модель напряженно-деформированного состояния массивов в окрестности туннелей описывается с использованием трех полей напряжений. Эта модель удовлетворяет следующим граничным условиям [8, 9]:

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

Поле напряжений, возникающее в результате образования туннеля $\sigma_x^m, \sigma_y^m, \tau_{xy}^m$ будет определяться из граничного условия (2). Форма отверстий, используемая для моделирования поперечных сечений туннелей, может быть разнообразной и обладать сложными конфигурациями. Для упрощения дальнейших рассуждений применим конформное отображение формы отверстия на форму единичной области с помощью комплексного переменного $\zeta = \rho e^{i\theta}$, используя отображающую функцию (3), и графически представленную на рисунке 3:

$$\begin{aligned} \omega(\rho, \theta) &= R \cdot e^{i\frac{\pi}{2}} \cdot \left(\zeta(\rho, \theta) + \frac{0.060}{\zeta(\rho, \theta)} + \frac{0.100}{\zeta(\rho, \theta)^2} - \frac{0.029}{\zeta(\rho, \theta)^3} + \frac{0.015}{\zeta(\rho, \theta)^4} \right) \\ x(\theta) &= \text{Re}(\omega(1, \theta)); \quad y = \text{Im}(\omega(1, \theta)). \end{aligned} \quad (3)$$

Отображающая функция типа (3), угол α между направлениями осей ox и касательной кривой ρ определяются следующей формулой [7]:

$$e^{2i\alpha} = \frac{\zeta^2 \omega'(\zeta)}{\rho^2 \overline{\omega'(\zeta)}}; \quad e^{-2i\alpha} = \frac{\zeta^{-2} \overline{\omega'(\zeta)}}{\rho^2 \omega'(\zeta)}. \quad (4)$$

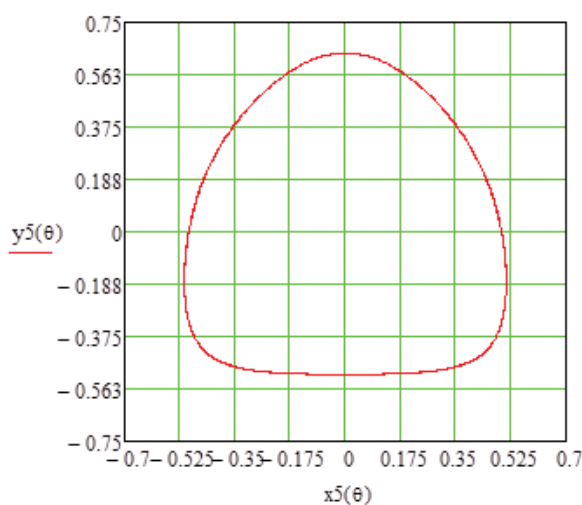


Рисунок 3 – Расчетная схема туннеля с корытообразным поперечным сечением

С помощью функции (3) и (4) компоненты напряжений в криволинейной системе координат обозначаются как $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \tau_{\rho\theta}$ где, $\sigma_\rho(\rho, \theta)$ – направлено по нормали к криволинейной дуге, а компонента $\tau_{\rho,\theta}(\rho, \theta)$ – действует по касательной, и на контурных точках туннеля будет равно [9]:

$$N = \sigma_\rho(1, \theta); \quad T = \tau_{\rho,\theta}(1, \theta). \quad (5)$$

Сумма первых трех полей напряжений [8–10] должна удовлетворять граничным условиям (1) на контурах полубесконечных областей и контуре отверстия, чтобы $N = T = 0$, т. е. контуры были свободны от внешних нагрузок.

На практике туннель или выработка размещается на определенной глубине массива, центр которого с координатами (X_0, Y_0) расположен на расстоянии $R_0 \geq 5R$, начальное напряженное напряженное состояние в центре отверстия с координатами (X_0, Y_0) определено величинами S_x, S_y, S_{xy} .

Здесь, R_0 – минимальное расстояние между контурами речного каньона и контуром отверстия.

Принятые значения для решения задач следующие:

$$S_x = -22 \text{ МПа}; \quad S_y = -30 \text{ МПа}; \quad S_{xy} = -35 \text{ МПа}.$$

Для выполнения анализа решим две задачи:

1. В первом случае на контур туннеля действует гидростатический напор величиной $P = -20 \text{ МПа}$.

2. Во втором случае гидростатический напор отсутствует, то есть $P = 0$.

Полученные значения напряжений и других характеристик напряженно-деформированного состояния будут представлены в таблицах 1 и 2, в зависимости от условий задачи. В этих таблицах будут приведены результаты расчета напряжений и деформаций, которые характеризуют состояние туннеля в различных сочетаниях нагрузок.

На основе приведённых в таблице 1 расчётных данных можно установить следующие закономерности поведения напряжённого состояния массива породы, окружающего гидротехнический туннель при наличии гидростатического давления.

Таблица 1 – Распределение напряжений и деформаций
с учётом гидростатического давления воды ($P = -20$ МПа)

θ	σ_ρ	σ_θ	$\tau_{\rho\theta}$
-10	-19.775	60.991	0.044
0	-20.003	-18.514	-0.064
10	-20.203	-101.049	0.087
20	-20.192	-145.571	0.336
30	-20.013	-159.650	0.517
40	-19.202	-158.815	0.587
50	-19.470	-152.410	0.528
60	-19.202	-137.695	0.328
70	-20.023	-115.524	$-7.559 \cdot 10^{-4}$
80	-18.987	-88.059	0.407
90	-19.104	-58.015	-0.836
100	-19.384	-25.050	-1.266
110	-19.897	16.411	-1.678
120	-20.817	75.731	-1.907
130	-20.073	141.633	-1.335
140	-22.462	144.151	0.224
150	-21.694	87.787	1.284
160	-20.876	39.462	1.575
170	-20.289	8.503	1.590
180	-19.827	-14.418	1.548

Таблица 2 – Распределение напряжений и деформаций
при отсутствии гидростатического давления воды ($P = 0$)

θ	σ_ρ	σ_θ	$\tau_{\rho\theta}$
-10	0.221	22.425	0.051
0	$-1.803 \cdot 10^{-3}$	-63.133	-0.064
10	-0.207	-139.615	0.080
20	-0.204	-172.818	0.328
30	-0.037	-177.975	0.513
40	0.217	-172.829	0.594
50	0.509	-162.623	0.546
60	0.784	-146.445	0.356
70	0.973	-123.426	0.035
80	1.025	-95.681	-0.368
90	0.923	-66.560	-0.800
100	0.660	-36.906	-1.239
110	0.164	-3.025	-1.668
120	-0.744	42.375	-1.930
130	-2.016	93.207	-1.406
140	-2.461	100.376	0.133
150	-1.734	63.246	1.217
160	-0.930	25.707	1.537
170	-0.346	4.318	1.573
180	0.116	-16.704	1.548

Значения σ_r по всей окружности туннеля колеблются в узком диапазоне от $-18,987$ до $-22,462$ МПа, что соответствует однородному распределению внешнего гидростатического давления воды. Минимальное значение наблюдается при $\theta = 140^\circ$, что указывает на незначительное перераспределение нагрузки, вызванное геометрией и сопряжённым напряжённым состоянием массива. Характер распределения σ_θ изменяется существенно.

Максимальные сжимающие напряжения достигают $\sigma_\theta = 144,151$ МПа при $\theta = 140^\circ$ (в области подошвы туннеля), аналогично ситуации без давления воды, однако абсолютные значения напряжений возросли. Наибольшие растягивающие значения наблюдаются в верхней части туннеля ($\theta \approx 30^\circ$), где $\sigma_\theta = -159,650$ МПа, что несколько меньше по модулю по сравнению с случаем $P = 0$ ($\sigma_\theta = -177,975$ МПа). Это указывает на компенсирующее влияние гидростатического давления, частично разгружающего зону растяжения. Поведение касательных напряжений также $\tau_{r\theta}$ демонстрирует аналогичную тенденцию.

Наибольшие значения касательных напряжений сосредоточены в диапазоне $\theta = 150^\circ\text{--}170^\circ$, достигая до 1,590 МПа. Наблюдается асимметричное распределение $\tau_{r\theta}$, свидетельствующее о возможном вращательном или сдвиговом характере деформаций, особенно в сочетании с гидростатическим и сейсмическим воздействием.

На основании численных данных, приведённых в таблице 2, следует отметить, что наибольшее по модулю отрицательное значение напряжения наблюдается в районе угла $\theta = 30^\circ$, где σ_θ достигает $-177,975$ МПа. Это указывает на зону интенсивного растяжения в верхней части контура туннеля (ближе к кровле), что соответствует типичной схеме перераспределения напряжений вокруг полости в массиве при гравитационном и сейсмическом воздействии без давления воды.

В нижней части, в области $\theta = 140^\circ$ наблюдается переход к положительным значениям σ_θ , достигающим максимума 100,376 МПа, что свидетельствует о развитии напряжений сжимающего характера в подошве туннеля.

Значения радиальных напряжений σ_r варьируются в пределах от $-2,461$ МПа ($\theta = 140^\circ$) до 1,025 МПа ($\theta = 80^\circ$). Их наименьшие значения фиксируются в нижней полусфере ($\theta = 130\text{--}140^\circ$), что также коррелирует с зонами максимальных сжимающих напряжений. Максимальные касательные напряжения (по абсолютному значению) достигают $\approx 1,573$ МПа при $\theta = 170^\circ$, то есть ближе к нижнему боковому сектору туннеля.

Наличие значительных касательных напряжений указывает на возможные зоны сдвиговых деформаций, особенно при динамическом или комбинированном нагружении.

Таким образом, при отсутствии гидростатического давления воды вокруг гидротехнического туннеля в окружающем массиве формируется выраженная асимметрия в распределении напряжений. Зона растяжения локализуется в верхней части ($\theta \approx 30^\circ$), в то время как область максимального сжатия приходится на подошву ($\theta \approx 140^\circ$). Это характерно для систем, находящихся под действием гравитации и сейсмики без дополнительной разгрузки со стороны воды, и должно учитываться при проектировании крепи и оценке устойчивости выработки [11–13].

Результаты исследования представлены в виде изолиний на рисунках 4 и 5, что позволяет наглядно показать распределение напряжений и деформаций в окружающей горной породе при различных значениях гидростатического напора. Изолинии помогут выявить участки с максимальными напряжениями, а также зоны, где возможны критические состояния, требующие внимания при проектировании или эксплуатации гидротехнических и деривационных туннелей.

С учётом выявленного перераспределения напряжений в обделке и окружающем массиве при воздействии гидростатического давления воды (до -20 МПа), конструктивное проектирование крепи гидротехнического туннеля должно базироваться на принципах эффективного усиления конструктивно-напряжённых зон, особенно в области подошвы, где при наличии внешнего давления достигаются наибольшие значения напряжений (до $144,151$ МПа).

Данная зона нуждается в использовании усиленных анкеров, армированных футляров либо массивных профилированных железобетонных обделок, обладающих повышенной несущей способностью и устойчивостью к изгибу и деформациям [12].

Согласно действующим нормативным документам (СП 47.13330.2016, СП 63.13330.2018, СНиП 2.06.04-82), следует учитывать [14, 15]:

- локальную концентрацию касательных и окружных напряжений при проектировании сечения обделки;
- сопротивление сжатию и растяжению в условиях знакопеременных напряжений;
- влияние гидродинамического воздействия на элементы крепи, особенно при переменном или импульсном напоре.

С экономической точки зрения, избыточное укрепление всего сечения туннеля приводит к необоснованному росту капитальных затрат, в том числе на бетонные работы, арматуру и монтаж. Анализ напряжённо-деформированного состояния массива позволяет [14, 15]:

- минимизировать объёмы бетона;
- сократить количество крепёжных элементов;
- снизить стоимость монтажа и доставки материалов;
- повысить эффективность использования техники.

Таким образом, эффективное усиление конструктивных элементов туннеля обеспечивает надёжность сооружения при сохранении экономической рациональности, особенно в условиях сложных геологических и гидрогеологических условий (трещиноватость, обводнённость, слоистость массива).

Оптимизация проектных параметров (радиуса сечения, толщины обделки, типа крепи) должна учитывать (таблица 3) [16]:

- расчётные значения внешнего давления (водяного и горного);
- схему распределения напряжений (по данным численного моделирования);
- эксплуатационный режим (постоянный или переменный напор);
- параметры геомеханических свойств пород (E , μ , прочность при одноосном сжатии, угол внутреннего трения, сцепление и др.).

Например, чрезмерное увеличение радиуса корытообразного туннеля при прочих равных условиях может привести к росту изгибающих моментов в обделке и снижению её несущей способности. Напротив, оптимизация формы и радиуса сечения в сочетании с зональным армированием и локальным усилением критических участков (углы, подошва) позволяет существенно сократить объём строительных материалов и трудозатрат [16].

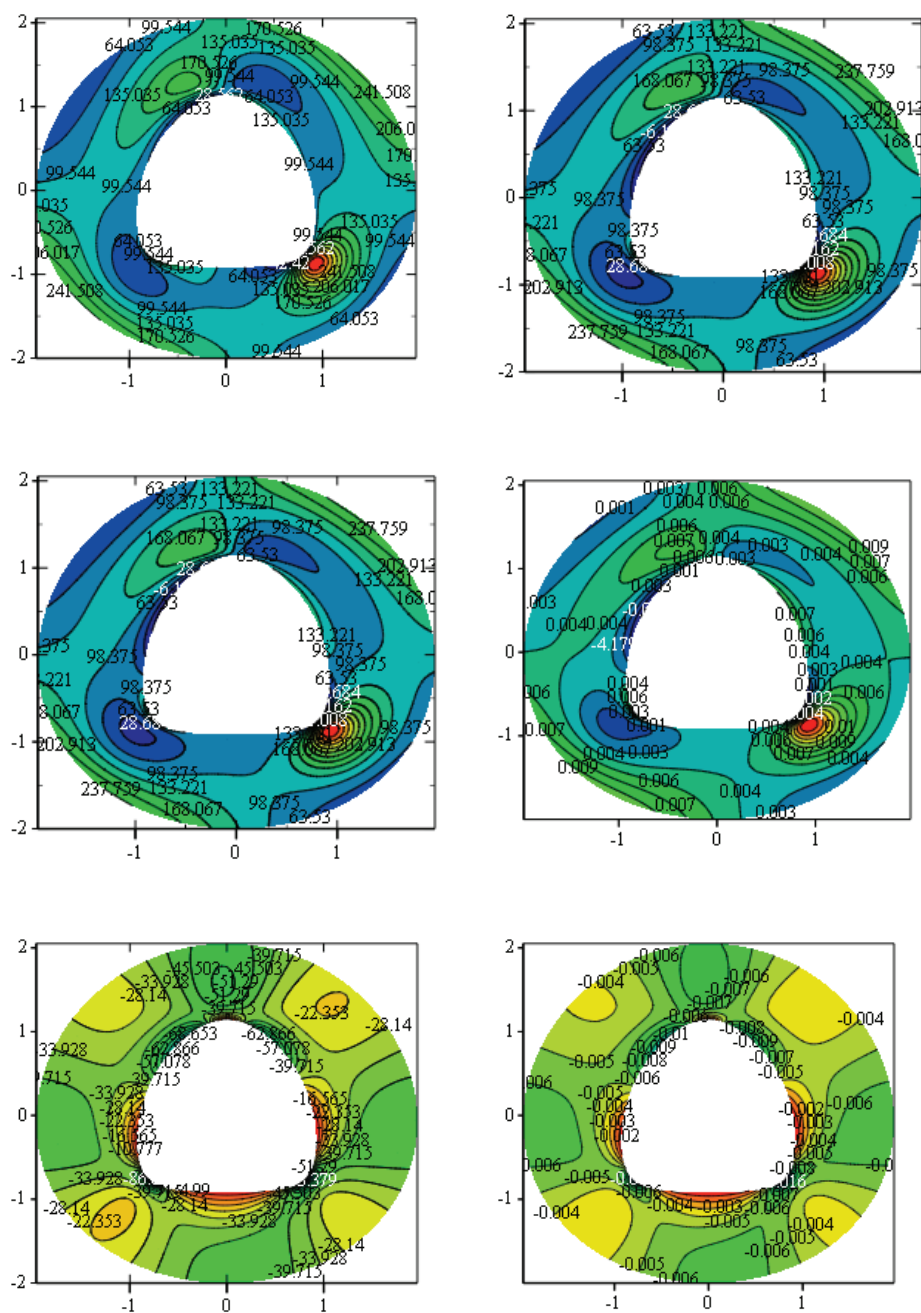


Рисунок 4 – Распределение напряжений и деформаций с учётом совместного влияния гравитации, сейсмики и гидростатического давления воды

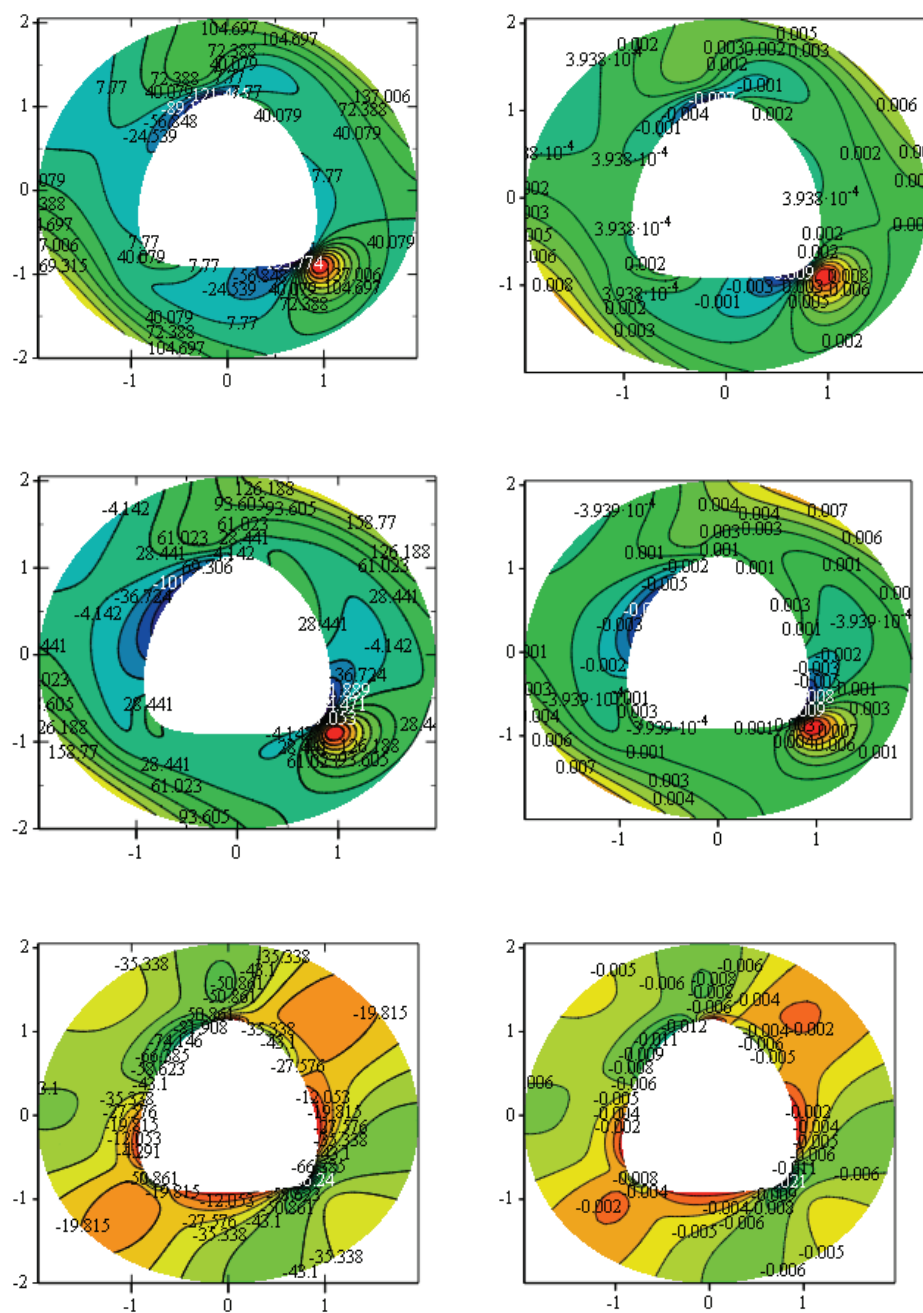


Рисунок 5 – Распределение напряжений и деформаций при совместном действии гравитационных и сейсмических нагрузок (без учёта гидростатического давления воды)

Таблица 3 – Оптимальные конструктивные решения для крепких скальных пород (гранит и известняк)

Параметр	Гранит	Известняк
Тип крепи	Болтовая + торкретбетон	Болтовая + армированный торкретбетон + дренаж
Минимальная толщина обделки	≥ 250 мм (монолит)	≥ 300 мм (с армированием и гидроизоляцией)
Анкеры	$\varnothing 25\text{--}32$ мм, длина 2.5–4 м, шаг 1.5–2.0 м	$\varnothing 25\text{--}28$ мм, длина 3–4.5 м, шаг 1.0–1.5 м
Особенности	Повышенные нагрузки в углах, трещиноватость	Возможна слоистость, карст, необходимость дренажа
Дополнительные меры	Армирование углов, водоотвод по подошве	Гидроизоляция, дренажные трубки, анкеры с расширением

Выводы. Установлено, что гидростатическое давление воды оказывает смягчающее воздействие на напряжённое состояние массива породы в верхней зоне тоннеля: растягивающие напряжения уменьшаются по модулю. Одновременно наблюдается увеличение сжимающих напряжений в нижней части сооружения.

В частности, по сравнению с расчётной ситуацией при отсутствии гидростатического давления ($P = 0$), когда максимальные значения напряжений в зоне кровли достигали $\sigma_\theta = -177,975$ МПа, при наличии давления $P = -20$ МПа наибольшее растяжение ограничивается величиной $\sigma_\theta = -159,650$ МПа, что свидетельствует о частичной разгрузке массива в данной области.

Установлено увеличение положительных напряжений в подошвенной части тоннеля: при $P = -20$ МПа значение σ_θ возрастает до 144,151 МПа против 100,376 МПа без напора воды. Этот факт указывает на необходимость усиленного конструктивного армирования в нижней зоне тоннеля при проектировании его крепи.

Гидростатическое давление также способствует более равномерному распределению радиальных напряжений, что в целом повышает стабильность окружающего массива. Вместе с тем, локальные концентрации касательных напряжений могут создавать предпосылки для развития пластических деформаций в отдельных участках.

Проведен анализ учета реального напряженно-деформированного состояния массива при проектировании гидротехнического тоннеля, особенно в крепких скальных породах, что способствует:

- повышению безопасности и долговечности сооружения;
- снижению избыточного армирования;
- оптимизации затрат и сроков строительства;
- учету особенностей водонасыщенных участков без необходимости избыточного дублирования конструктивных элементов.

Заключение. Учёт гидростатического давления воды при расчёте напряженно-деформированного состояния породного массива, окружающего гидротехнический тоннель, является неотъемлемым элементом эффективного проектирования. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода, включающего учёт всех факторов нагружения для точной оценки устойчивости подземных сооружений, а также для разработки оптимальных решений по повышению их надёжности и эксплуатационной безопасности.

В условиях горных районов Центральной Азии, в частности Кыргызстана, где ограничены ресурсы и наблюдается высокая сейсмическая активность, наиболее рациональным является использование современных инженерных расчётов, геомеханического моделирования и адаптивных конструктивных решений для крепи, что способствует снижению затрат при сохранении высоких эксплуатационных характеристик сооружений.

Поступила: 30.04.2025; рецензирована: 19.05.2025; принята: 21.05.2025.

Литература

1. Лавров Н.П. Курс лекций «Введение в профессию “Гидротехническое строительство”»: учебное пособие / Н.П. Лавров, О.В. Атаманова. Бишкек: КРСУ, 2012. 187 с. URL: <http://lib.krsu.edu.kg/uploads/files/public/4485.pdf> (дата обращения: 5.02.2025).
2. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий / Г.Н. Савин. Киев: Наук. Думка, 1968. 887 с. URL: <https://lib-bkm.ru/15005> (дата обращения: 5.02.2025).
3. Жумабаев Б. Распределение вокруг выработок, пройденных в зоне влияния каньона / Б. Жумабаев, Г.Б. Ходосевич // Напряженное состояние и разгрузка горных пород. Бишкек, 1991. С. 157–166. URL: <https://igion.megaline.kg> (дата обращения: 8.02.2025).
4. Мамбетов Ш.А. Геомеханика: учебник: в 2 т. Т. 1. Основы геомеханики / Ш.А. Мамбетов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2013. 138 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geomexanika-tom-1-osnovy-geomexaniki.pdf> (дата обращения: 10.02.2025).
5. Мостков В.М. Подземные гидротехнические сооружения / В.М. Мостков, П.Д. Орлов, П.Д. Степанов, Ю.Е. Хечинов, С.А. Юфин. М., 1986. 467 с. URL: <https://korobkaknig.ru/> (дата обращения: 10.02.2025).
6. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. М.: Наука, 1966. 707 с. URL: <https://lib-bkm.ru/load/86-1-0-2343> (дата обращения: 15.02.2025).
7. Баялиева Ж.А. Моделирование и расчет напряжённого деформированного состояния напорных туннелей в массиве вблизи речного каньона / Ж.А. Баялиева, Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Естественные и технические науки. 2018. № 5 (119). С. 108–118. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp> (дата обращения: 10.03.2025).
8. Волохов Е.М. К вопросу оценки влияния объемных сил в расчетах напряженно-деформированного состояния массива при проходке в нем горных выработок / Е.М. Волохов // Маркшейдерский вестник. 2003. № 3. С. 34–41.
9. Жумабаев Б. Распределение напряжений изотропной и анизотропной полуплоскости от действия нагрузки с треугольной эпюрой / Б. Жумабаев, А.А. Аманалиев, А.А. Ширяева // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 1. С. 33–38. URL: <https://arch.kyrlibnet.kg/?&npage=download&nadd=16574> (дата обращения: 30.02.2025).
10. Ботоканова Б.А. Закономерности распределения напряжений вокруг напорного туннеля с круглым поперечным сечением / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев, Ч.М. Эльдияров // Вестник КРСУ. 2022. Т. 22. № 12. С. 107–114. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50199522> (дата обращения: 10.03.2025).
11. Ботоканова Б.А. Исследование напряженного состояния пород вокруг гидротехнического туннеля, расположенного в горном массиве / Б.А. Ботоканова // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 4(132). С. 30–34. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69153586> (дата обращения: 10.03.2025).
12. Botokanova B.A. Stress-strain state of rock massifs around tunnels located in a dip-layered massif / B.A. Botokanova, G.S. Isaeva // Mine Surveying and Subsurface Use. 2024. № 6 (134). С. 12–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80061601> (дата обращения: 10.03.2025).
13. Матаев А.К. Выбор оптимального вида крепления горных выработок на основе моделирования напряженного состояния подземных конструкций / А.К. Матаев, А.Ж. Имашев // Научно-технический горный журнал Казахстана. 2024. № 1(225). С. 25–32. URL: <https://www.kstu.kz/wp-content/uploads> (дата обращения: 20.03.2025).
14. СНиП 2.06.09-84 Туннели гидротехнические. URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001262> (дата обращения: 30.03.2025).
15. ВСН 126-90 Крепление выработок набрызг-бетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/5/5652/index.htm> (дата обращения: 10.04.2025).
16. ГОСТ Р 58917-2021 Технологический инжиниринг и проектирование. Техничко-экономическое обоснование инвестиционного проекта промышленного объекта. Общие требования. М.: Российский ин-т стандартизации, 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181011> (дата обращения: 25.04.2025).