### НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

## ИНСТИТУТ ГЕОМЕХАНИКИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР

# ЖАЛАЛ-АБАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Б.ОСМОНОВА

Диссертационный совет Д 25. 21. 643

На правах рукописи УДК: 622.33.013.3(575.2) (043.03)

# БОТОКАНОВА БАКТЫГУЛ АСАНКОЖОЕВНА

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ВОКРУГ НАПОРНЫХ ТУННЕЛЕЙ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность: 25.00.20 – геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

# Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Бишкек – 2022

Работа выполнена в:

Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б.Н. Ельцина Кыргызском национальном аграрном университете им. К.И. Скрябина

Научный руководитель

Жумабаев Бейшенбек, доктор технических наук, профессор Кыргызско-Российского Славянского Университета им. Б.Н. Ельцина

Официальные оппоненты:

Ведущая организация: Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044 г. Бишкек, проспект Ч. Айтматова 66

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г. в\_\_\_\_часов на заседании диссертационного совета Д. 25.21.643 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата (доктора) технических наук при Институте геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики и Жалал-Абадском государственном университете имени Б. Осмонова по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Медерова, 98, конференц-зал научной библиотеки. Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации: \_\_\_\_\_

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Медерова, 98 и Жалал-Абадского государственного университета имени Б. Осмонова по адресу: 715600, г. Жалал-Абад, ул. Ленина, 57, на сайте Института: <u>https://igion.megaline.kg/ и на сайте HAK KP: http://vak.kg/.</u>

Автореферат разослан\_\_\_\_\_ «\_\_\_»\_\_\_\_2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.ф-м.н., доцент

Г. С. Исаева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Разработка полезных ископаемых из недр, а также транспортировка гидроресурсов с помощью туннелей требуют проведения научных исследований по обеспечению устойчивости массива горных пород вокруг подземного пространства. В горных районах потребность в проведении горных выработок и строительстве транспортных, гидротехнических туннелей велика. Формирование напряженного состояния массива вокруг туннелей и горных выработок зависит от многих факторов: влияния склонов гор и впадин, совместного действия силы гравитации, сейсмики, тектонических сил, напора воды и внешних нагрузок. Поэтому оценка напряженного и деформированного состояния массивов горных пород вокруг выработок и туннелей с учетом вышеуказанных факторов является актуальной задачей.

Для оценки состояния массивов горных пород вокруг туннелей и выработок, когда необходимо учитывать выше перечисленные факторы одновременно, традиционные методы: метод разгрузки, ультразвуковое зондирование или метод фотоупругости становятся весьма дорогими и малоэффективными. Использование метода конечных разностей (МКР) или метода конечных элементов (МКЭ), когда высота гор измеряется километрами и поперечные сечения туннелей измеряется метрами, при совместном учете разномасштабных факторов крайне сложно для одной и той же модели без потери точности, и надежности моделирования. Полученные результаты с помощью МКЭ и МКР проверяются и сопоставляются с результатами применения других методов.

Таким образом, для расчета напряженно-деформированного состояния массивов пород вокруг горных выработок и туннелей необходимо создать аналитическую модель напряженного состояния массивов горных пород вокруг туннелей с учетом рельефа гор, возможного месторасположения, действия гидростатического давления, объемных и тектонических сил.

Связь темы диссертации с основными научно – исследовательскими работами. Результаты диссертации вошли в НИР по заказу Министерства образования и науки Кыргызской Республики. В Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б.Н. Ельцина были выполнены следующие проекты:

- Оценка динамики инженерных сооружений (плотин) в горных условиях и выработка методов моделирования механики конструкционных материалов. (Отчет 2012 г., стр. 55-77).
- Прочность и деформируемость горных пород при больших давлениях в условиях глубоких выработок и высокогорья. (Отчет 2013 г., стр.27-46, Отчет 2014 г., стр.19-44).
- Сейсмическая опасность и сейсмозащита инженерных сооружений в условиях Кыргызстана. (Отчет 2016 г., стр.20-32).

Целью диссертационной работы является оценка напряженнодеформированного состояния массивов напорных гидротехнических туннелей, расположенных в горной местности в условиях действия силы гравитации, тектонического сжатия и напора воды методом аналитического моделирования.

#### Задача исследований:

- 1. Оценка и аналитическое описание начального напряженного состояния массива горных пород в предполагаемой зоне расположения туннеля с учетом формы горного рельефа, действия гравитационных и тектонических сил.
- 2. Применение аналитического метода моделирования особенностей рельефа, типовых форм и размеров поперечных сечений туннелей с помощью математического метода конформных отображений полуплоскости выступом или вырезом на вспомогательной полуплоскости и различных форм сечений туннелей на внешности единичного круга.
- 3. Создание аналитической модели напряженно-деформированного состояния массивов пород вокруг туннелей с учетом его месторасположения и начального напряженного состояния массива гор, учитывающей совместные или раздельные действия силы гравитации и тектонического сжатия.
- 4. Аналитическое описание влияния напора воды на перераспределение напряжений вокруг туннелей с учетом типовых форм поперечных сечений в рамках метода Колосово-Мусхелишвили.
- 5. Создание методики расчета и анализа распределения напряжений, смещений туннелей в деформаций, вокруг условиях влияния различных факторов: форма рельефа горного массива, формы туннеля, месторасположение сечений действие И гравитационных сил, тектонического сжатия и напора воды.
- 6. Установление закономерностей распределения полей напряжений, деформаций массива горных пород вокруг гидротехнических туннелей при раздельном и совместном влиянии силовых факторов.

#### Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Создан алгоритм расчета и установлены закономерности распределения начального напряженного состояния массивов с горным рельефом в зоне глубокого каньона, ограниченного параболическим цилиндром, одиночной горы с почти вертикальным склоном, межгорной впадины и речного каньона, которые отличаются от ранее известных результатов других авторов. Результат 1 является частично новым.

2. Определено и аналитически описано напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг туннелей, учитывающее начальное напряженное состояние горного рельефа, месторасположение и типовые формы сечений туннеля. Результат новый.

3. Дана оценка и аналитическое описание сформировавшегося напряженного состояния массивов вокруг туннелей под влиянием напора воды и перераспределению напряжений вокруг туннелей. Количественные и качественные изменения определяются в зависимости от величины напора воды и типовых форм поперечных сечений, кроме туннелей с круглым сечением. Результат 3 является новым.

4. Создана аналитическая модель и разработана методика расчета напряжений вокруг туннелей в программной среде МАТНСАD, допускающая учёт совместных или раздельных действий сил гравитации, горизонтальных тектонических сил, гидростатического напора воды и типовых форм поперечных сечений. Результат 4 является новым.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов состоит в:

- разработке аналитической модели напряжённого и деформированного состояния массивов вокруг напорных гидротехнических туннелей с учётом действия гравитационных, сейсмических и тектонических сил, а также гидростатического напора;
- применении методики расчета и оценки состояния туннелей, расположенных в горной местности при выполнении оперативной экспертной оценки и принятия инженерных решений;
- разработке рекомендаций для проектирования туннелей в горной местности, выбора форм и размеров туннелей, месторасположения туннеля относительно склона гор, каньонов и др.;
- создании методических пособий для решения инженерных задач аналитическим методом моделирования (метод Колосово-Мусхелишвили);
- экспертной оценке напряженно-деформированного состояния подземных горных выработок и туннелей, коммуникаций, рудников вокруг массивов горных пород, расположенных в горной местности.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебном процессе в КРСУ им. Б.Н. Ельцина при подготовке:

- бакалавров по направлению 15.03.03 – РФ, 650500 – КР «Прикладная механика» в составе дисциплин «Математические методы двухмерной теории упругости» и «Специальные главы и практикум по высшей математике»;

- бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 – РФ и 750500 – КР «Строительство», профиль «Гидротехническое строительство» по дисциплине «Проведение горных выработок»;

- бакалавров по направлению подготовки 750500 - «Строительство» профиль «Гидротехническое строительство» по дисциплинам: «Механика грунтов», «Решение инженерных задач методом математического моделирования» на кафедре «Горного гидротехнического строительства» в КНАУ им. К.И. Скрябина.

#### Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- унифицированная методика моделирования 15-ти типовых форм поперечных сечений туннелей и аналитическое описание напряженнодеформированного состояния вокруг туннелей путем вариации постоянных параметров отображающей функции;
- установленные новые закономерности напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг туннелей, учитывающие начальное состояние горного массива, месторасположение и формы сечений туннеля с привлечением аналитической модели, представленной программой MATHCAD к расчету полей напряжений и деформаций;
- аналитическое описание напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг туннелей в зависимости от совместного действия силы гравитации, горизонтальных тектонических сил, отсутствия напора и действия гидростатического напора воды;
- автоматизированный алгоритм расчета и его графическое оформление для напряженно-деформированного состояния массивов вокруг гидротехнических туннелей с применением продукта программной среды MATHCAD.

Научные положения основываются на решении задачи теории упругости для напорных гидротехнических туннелей в условиях действия силы гравитации и гидростатического напора, что содействовало обоснованию методики расчета напряженно-деформированного состояния напорных гидротехнических туннелей, состоящей из следующих этапов:

- 1. Начальное напряженно-деформированное состояние массива до проведения гидротехнических туннелей или горной выработки.
- 2. Изменение напряженно-деформированного состояния массива вокруг гидротехнических туннелей после проведения горной выработки.
- 3. Напряженно-деформированное состояние массива вокруг гидротехнических туннелей под действием силы напора воды.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач исследования данной научно-технической задачи; в разработке алгоритма отображающего функции массива горных пород вокруг гидротехнических туннелей; в разработке новой автоматизированной системы исследования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород вокруг туннелей в программной среде МАТНСАD.

Апробация результатов иследования. Основные результаты исследования обсуждались, докладывались и опубликованы: в Кыргызском национальном аграрном университете им. К.И. Скрябина на научных конференциях и семинарах «Горное гидротехническое строительство». (Бишкек, 2004, 2009 гг.); в институте Геомеханики и освоения недр НАН КР на международной конференции и сборнике «Современные проблемы механики и сплошных сред». (Бишкек, 2005, 2011, 2012, 2013 гг.); в Кыргызско-Российском Славянском университете им Б.Н. Ельцина на

6

кафедре «Механика». (Бишкек, 2006, 2013 гг.); в научно-методическом журнале «Вестник науки и образования». (Москва, 2018 г.); в журнале «Естественные и технические науки». Включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, также в международную базу данных Chemical Abstracts. (Москва, 2018 г.); в теоретическом и научно-Вестник Забайкальский Государственый практическом журнале университете (Чита, 2018г.); в научном журнале «European Applied Sciences» (Национальный центр ISSN). (Вена, 2018 г.); в научном журнале «Наука, инновации Кыргызстана», технологии «Известия новые И ВУЗов Кыргызстана». (Бишкек, 2018, 2021гг.).

**Полнота отражения результатов исследования в публикациях.** Основные результаты исследования опубликованы в 17 работах восьми печатных изданий, из них 5 работ опубликовано за рубежом в рецензируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений, изложенных на 132 страницах компьютерного текста, содержит 21 таблицу, 51 рисунок, список использованной литературы из 78 наименований.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дается общая характеристика и степень ее изученности, раскрываются цель и задачи работы, излагается научная новизна, основные положения, выносимые автором на защиту и их практическое значение, приводится апробация результатов исследования.

**В первой главе** выполнен краткий критический обзор работ, связанных с темой диссертационной работы, приведены используемый математический аппарат и методические основы оценки напряженного состояния вокруг гидротехнических туннелей.

Ранее в монографиях Н.И. Мусхелешвили (1966 г.) и Н.Г. Савина (1968 г.) приведены решения граничных задач распределения напряжений около отверстий. В дальнейшем эти задачи неоднкратно решались методом Колосова-Мусхелишвили с помощью аппарата отображения.

В работах С.Г. Авершина, С.А. Балалаева, В.Н. Груздева, Ж.С. Ержанова (1971 г.), Ш.М. Айталиева, Ж.К. Масанова (1980 г.) исследованы горные выработки, находящиеся напряженном состоянии в весомой плоскости.

Начальное напряженное состояние массива вокруг выработок (без туннеля) рассмотрены в работах Э.В. Калинина (1970 г.), Д.М. Ахпателова, З.Г. Тер-Мартиросяна (1976 г.). Методом разгрузки начальное напряженное состояние горного массива исследовались в работа И.Т. Айтматова, К.Ч. Кожогулова, К. (1999 г.) и других авторов.

В работах Б. Жумабаева и Г.С. Исаевой (1990 г.) исследовано напряженное состояние массивов речных каньонов с учетом влияния водохранилищ без влияния туннеля. Напряженное состояние массива вокруг горных выработок с круглым поперечным сечением в зоне речного каньона исследовано в работах Б. Жумабаева и Г.Б. Ходасевича (1991 г).

Альтернативный путь оценки начального напряженного состояния массива методом математического моделирование с учетом формы рельефа массива, отражены в работах К.Ж. Усенова (2002 г.).

Однако в научных работах влияние рельефа на состояние горных выработок и туннелей почти не изучалось.

Наиболее эффективный подход к оценке начального напряженного состояния горного массива основан на применении аппарата конформного отображения полубесконечной исследуемой области на полуплоскость с использованием свойств интегралов типа Коши.

Отображающая функция  $\omega_1(\zeta)$ ,  $\zeta = \xi + i\eta$ ,  $\eta \leq 0$ ,  $-\infty \leq \xi \leq \infty$  реализуется полубесконечной областью на полуплоскости, и с помощью нее отыскиваются комплексные потенциалы  $\Phi(\zeta)$  и  $\Psi(\zeta)$ , которые удовлетворяют граничным условиям:

$$\Phi(t) + \overline{\Phi(t)} - e^{2i\alpha} \left[ \overline{\omega(t)} \Phi'(t) + \Psi(t) \omega'(t) \right] = N - iT$$
(1)

где *N* и *T* соответственно нормальные и касательные составляющие к контурам полубесконечной области.

В другом случае, когда формы выработок и туннелей моделируются, тогда используется отображающая функция  $\omega_2(\zeta)$ ,  $\zeta = \rho \cdot e^{2i\theta}$ ,  $1 \le \rho \le \infty$ ,  $0 \le \theta \le 2\pi$  и отыскиваются комплексные потенциалы  $\Phi(\zeta)$  и  $\Psi(\zeta)$  из граничных условий:

$$\Phi(\zeta) + \overline{\Psi(\zeta)} - e^{2i\alpha} \left[ \overline{\omega_1(\zeta)} \Phi'(\zeta) + \Psi(\zeta) \omega_2'(t) \right] = \sigma_\rho + i\tau_{\rho\theta}$$
(2)

где  $\sigma_{\rho}$  и  $\tau_{\rho\theta}$  как (1) нормальные и касательные составляющие к контуру выработок и туннелей.

Выражения  $e^{2i\theta}$  и  $e^{-2i\theta}$  вслучае решения граничных задач (1) и (2) определяются только от принятого вида отображающей функции. Суть параметра  $\alpha$  – это угол между горизонтальной оси *OX* и касательной в любой точке области по направлению переменных  $0\xi$  или  $0\rho$ .

При этом компоненты напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  в плоскости *XOY* и компоненты напряжений  $\sigma_{\xi}, \sigma_{\eta}, \tau_{\xi\eta}$  или  $\sigma_{\rho}, \sigma_{\theta}, \tau_{\rho\theta}$  в криволинейных координатах  $\zeta = \xi + i\eta$  и  $\zeta = \rho e^{i\theta}$  имеют место связей в любой точке массива.

$$\sigma_{x} + \sigma_{y} = \sigma_{\xi} + \sigma_{\eta} = \sigma_{\rho} + \sigma_{\theta}$$
  

$$\sigma_{\eta} - \sigma_{\xi} + 2i\tau_{\xi\eta} = (\sigma_{x} - \sigma_{y} + i\tau_{xy})e^{2i\alpha}$$
  

$$\sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} + 2i\tau_{\rho\theta} = (\sigma_{y} - \sigma_{x} + i\tau_{xy})e^{2i\alpha}$$
(3)

Для вычисления компоненты напряжений в криволинейных координатах используются найденные из (1) и (2) функции  $\Phi(\zeta)$  и  $\Psi(\zeta)$  с помощью соотношений Мусхелишвили [1966 г. – 707 с.]:

$$\sigma_{\xi} + \sigma_{\eta} = 2Re\left[\Phi(\zeta) + \overline{\Phi(\zeta)}\right] \tag{4}$$

$$\sigma_{\eta} - \sigma_{\xi} + 2i\tau_{\xi\eta} = 2[\omega(\zeta)\Phi'(\zeta) + \Psi(\zeta)]$$
<sup>(5)</sup>

Величины  $e^{2i\alpha}$  и  $e^{-2i\alpha}$  при отображении типа  $\omega_1(\zeta)$  равны:

$$e^{2i\alpha} = \frac{\omega'(\zeta)}{\overline{\omega(\zeta)}}; \quad e^{-2i\alpha} = \frac{\overline{\omega'(\zeta)}}{\omega'(\zeta)} \tag{6}$$

При отображении отверстий  $\omega_2(\zeta)$ :

$$e^{2i\alpha} = \frac{\overline{\zeta^2}}{\rho^2} \frac{\overline{\omega_2'(\zeta)}}{\omega_2'(\zeta)}; \quad e^{-2i\alpha} = \frac{\rho^2}{\zeta^2} \frac{\omega_2'(\zeta)}{\omega'(\zeta)}; \tag{7}$$

Следует отметить, что компоненты напряжений в криволинейных координатах  $\sigma_{\xi}$ ,  $\sigma_{\eta}$ ,  $\tau_{\xi\eta}$  и  $\sigma_{\rho}$ ,  $\sigma_{\theta}$ ,  $\tau_{\rho\theta}$  в контуре полубесконечной области или кунтуре туннеля незаменимы для оценки точности выполнения граничных условий (1) и (2). Они мало пригодны для анализа характера распределения напряжений во внутренних точках массива, котрые изменчивы от точки к точке и величины направления напряжений.

Для анализа распределения напряжений использованы компоненты напряжений, связанные координатой оси ХОУ. Кроме того в данной координатой оси удобно суммировать поля напряжений, вызваннных различными силовыми факторами. Далее используем компонент напряжений, вычисленных в криволинейных координатах для оценки точности построенных решений в контурных точках, и компоненты  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  для суммирования полей напряжений, вызванных напряжений различными силовыми факторами.

**Во второй главе** приводится алгоритм, составлена программа расчёта и выполнен прогноз начального напряженного состояния глубокого каньона, одиночной горы, межгорной впадины и пологого речного каньона.

Цель работы заключается в разработке математической модели напряженно-деформированного состояния массивов вокруг гидротехнических туннелей, состоящей из суммы полей напряжений:

$$\sigma_{x}^{0} = \sigma_{x}^{n} + \sigma_{x}^{p} + \sigma_{x}^{m} + \sigma_{x}^{H}, 
\sigma_{y}^{0} = \sigma_{y}^{n} + \sigma_{y}^{p} + \sigma_{y}^{m} + \sigma_{y}^{H}, 
\tau_{xy}^{0} = \tau_{xy}^{\Pi} + \tau_{xy}^{p} + \tau_{xy}^{T} + \tau_{xy}^{H}.$$
(8)

Компоненты напряжений с индексом «*n*» (сверху интегралы от дифференциальных уравнений равновесия):

$$\sigma_x^{\Pi} = A_1 \cdot y + T_x; \quad \sigma_y^{\Pi} = A_2 y; \quad \tau_{xy}^{\Pi} = A_3 y \tag{9}$$
где  $A_1 = \lambda \cdot \gamma \cdot (1 - k_c \cdot \cos \delta); \quad A_2 = \gamma \cdot (1 - k_c \cdot \cos \delta); \quad A_3 = k_c \cdot \gamma \cdot \sin \delta$ 

Здесь обозначены:  $\gamma$ - объемный вес горных пород, как произведение плотности пород и гравитационного ускорения;  $\gamma_c = \kappa_c \gamma$  - сейсмическая сила; g – гравитационное ускорение;  $T_x$  –тектоническое сжатие, которое направлено преимущественно горизонтально;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора;  $k_c$  – коэффициент сейсмичности горного региона;  $\rho_x = \gamma k_c \sin \delta$  – горизонтальная состовляющая;  $\rho_y = \gamma (1 - k_c \cos \delta)$  – вертикальные составляющие объемной силы.

Компоненты напряжений с индексом «p» сверху ( $\sigma_x^p, \sigma_y^p, \tau_{xy}^p$ ) в модели (8) обозначают влияние рельефа горного массива. Сумма первых двух полей напряжений иногда называется начальным напряженным состоянием массива пород с горным рельефом и вычисляется следующими соотношениями:

$$\sigma_x^{\rm H} = \sigma_x^n + \sigma_x^p, \qquad \sigma_y^{\rm H} = \sigma_y^n + \sigma_y^p, \qquad \tau_{\rm xy}^{\rm H} = \tau_{\rm xy}^{\rm \pi} + \tau_{\rm xy}^p. \tag{10}$$

Поле напряжений (10) на дневной поверхности массива с горным рельефом удовлетворяют следующие граничные условия:

$$(\sigma_x^p + \sigma_x^n + T_x) \cdot (\cos n, x) + (\tau_{xy}^p + \tau_{xy}^n)) \cdot (\cos n, y) = 0$$
  
$$(\tau_{xy}^p + \tau_{xy}^n) \cdot (\cos n, x) + (\sigma_y^n + \sigma_y^p) \cdot \cos(n, y) = 0$$
 (11)

Методика исследования напряженного состояния массивов с горным рельефом методом Колосова-Мусхелишвили более эффективны при использовании конформного отображения и свойств интегралов типа Коши. Об этом свидетельствуют работы Н.И. Мусхелишвили, Г.Н. Савина, Ж.С. Ержанова, Б. Жумабаева и их последователей.

Для определения напряжений (10) использованы конформно отображающие функции:

$$z = \omega(\zeta); \ z = x + i \cdot y; \ \zeta = \xi + i \cdot \eta; \ i = \sqrt{-1};$$
  
$$\omega(\zeta) = ib \cdot \zeta(\xi, \eta)^2 + a \cdot \zeta + \omega_0(\zeta); \ \omega_0(\zeta) = a_1/(\zeta - i) + b_1/(\zeta + t_b - i) \ (12)$$

Здесь вариацией параметров постоянных a,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $t_b$  достигается создание разных форм горного рельефа. Компоненты напряжений с индексом «p» сверху определяются для криволинейных координат  $\xi$ ,  $\eta$  через функции Н.И. Мусхелишвили.

В этом случае вместо компонентов напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  вводим новые обозначения для компонентов напряжений ( $\sigma_{\xi}, \sigma_{\eta}, \tau_{\xi\eta}$ ), которые выражаются функциями  $\Phi(\zeta), \Psi(\zeta)$  и преобразуются с помощью соотношений Колосова-Мусхелишвили :

$$\sigma_{\xi} + \sigma_{\eta} = \sigma_{x} + \sigma_{y}$$
  
$$\sigma_{\eta} - \sigma_{\xi} + 2i\tau_{\xi\eta} = e^{2i\alpha} (\sigma_{y} - \sigma_{x} + 2i\tau_{xy})$$
(13)

Заменив в правой части (6) компоненты напряжений функциями Колосова-Мусхелишвили, имеет:

$$\sigma_{\xi} + \sigma_{\eta} = 2 \left[ \Phi(\zeta) + \overline{\Phi(\zeta)} \right]$$
  
$$\sigma_{\eta} - \sigma_{\xi} + 2i\tau_{\xi\eta} = 2 \left[ \overline{\omega(\zeta)} \Phi'(\zeta) + \omega'(\zeta) \Psi(\zeta) \right] \cdot \frac{\omega'(\zeta)}{\omega'(\zeta)}$$
(14)

Функции  $\Phi(\zeta), \Psi(\zeta)$  являются решением граничной задачи:

$$\Phi(t)\,\omega(t)' + \overline{\Phi(t)}\,\omega(t)' + \omega(t)\,\overline{\Phi(t)'} + \overline{\omega(t)'}\,\overline{\Psi(t)} = [N(t) - i\,T(t)]\omega(t)',$$
  

$$\Phi(t)\,\overline{\omega(t)'} + \overline{\Phi(t)}\,\overline{\omega(t)'} + \overline{\omega(t)}\,\Phi(t)' + \omega(t)'\,\Psi(t) = [N(t) + i\,T(t)]\overline{\omega(t)'}$$
(15)

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

$$\Phi(\zeta) \cdot \omega'(\zeta) + G(\zeta) = B(\zeta),$$
  

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

$$G(\zeta) = -a_1 \overline{\Phi_1} / [\zeta - i]^2 - b_1 \overline{\Phi_2} / [\zeta + t_b - i]^2$$

Соотношение (14) – (15) позволяет найти начальное напряженное состояние для криволинейных координат ( $\sigma_{\xi}, \sigma_{\eta}, \tau_{\xi\eta}$ ), а затем перейти к декартовым координатам  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ . Расчеты напряжений начального состояния горы представлены в таблице 1.

таблица т эпа тепия напряжений на контуре еклопа тер				Jona ropbi				
0	t	<i>х</i> (м)	<i>у</i> (м)	$\sigma_1(M\Pi a)$	$\sigma_2(M\Pi a)$	<i>N</i> (МПа)	<i>T</i> (МПа)	$T_{max}(M\Pi a)$
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

Таблица 1 - Значения напряжений на контуре склона горы

Таблица 2 - Расчет контурных напряжений каньона при совместном действии гравитационных, сейсмических объемных сил и тектонического сжатия

N⁰	х(м)	у(м)	$\sigma_1(M\Pi a)$	$\sigma_2(M\Pi a)$	N(MПa)	Т(МПа)
1	-6.4	64	$-1.4 \cdot 10^{-9}$	-19	$-1.4 \cdot 10^{-8}$	$-2 \cdot 10^{-7}$
2	-5.6	49	$-1.8 \cdot 10^{-9}$	-19.9	$-1.8 \cdot 10^{-8}$	$-2.1 \cdot 10^{-7}$
3	-4.8	36	$-2.5 \cdot 10^{-9}$	-21.2	$-2.5 \cdot 10^{-8}$	$-2.3 \cdot 10^{-7}$
4	-4.0	25	$-3.9 \cdot 10^{-9}$	-23.1	$-3.9 \cdot 10^{-8}$	$-2.4 \cdot 10^{-7}$
5	-3.2	16	$-6.7 \cdot 10^{-9}$	-26.4	$-6.7 \cdot 10^{-8}$	$-2.2 \cdot 10^{-7}$
6	-2.4	9	$-1.5 \cdot 10^{-8}$	-33.4	$-1.5 \cdot 10^{-7}$	$-5.9 \cdot 10^{-8}$
7	-1.6	4	$-5.1 \cdot 10^{-8}$	-52.6	$-5.1 \cdot 10^{-7}$	$-8.3 \cdot 10^{-7}$
8	-0.8	1	$-4.9 \cdot 10^{-7}$	-143.2	$-4.9 \cdot 10^{-6}$	$-9.3 \cdot 10^{-6}$
9	0	$-8 \cdot 10^{-7}$	$-2.3 \cdot 10^{-5}$	-928	$-2.3 \cdot 10^{-4}$	0
10	0.8	1	$-4.9 \cdot 10^{-7}$	-143.2	$-4.9 \cdot 10^{-6}$	$9.3 \cdot 10^{-6}$

В таблице 2 приведено решение задачи напряженного состояния каньона при действии гравитационных, сейсмических объемных сил и тектонического сжатия. Для расчета принято:  $T_{r} = -5.1 M\Pi a$ ,  $\gamma = 2.5 \cdot 10^{2} \Pi a$ .

Выполнен расчет начального напряженного состояния каньона без туннеля. Распределение напряжений, которые вычислены относительно декартовых координат, представлены для каждого компонента напряжений на рисунке 1 принято:  $\lambda = 0.5$ ;  $\gamma = 2.75 \cdot 10^{-2}$ ;  $T_x = -20M\Pi a$ .



Рисунок 1 - Распределение напряжений в массивах каньона (Мпа)

На основании выполненных расчетов о начальном напряженном состоянии массивов для пяти видов горного рельефа можно заключить:

- 1. Во всех точках массива с горным рельефом возникают три компонента напряжений  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_{xy}$  (МПа). Одноосное и двуосное состояния встречаются крайне редко.
- Наличие отображающей функции типа z<sub>1</sub> = ω(ζ) в работах Н.И. Мусхелешвили, Б. Жумабаева, Г.Н. Савина, Ш.М. Айталиева, Ж.С. Ержанова допускает исследование напряженного состояния массивов с наибольшей эффективностью.
- 3. Для определения влияния образования туннеля из-за малых их характерных размеров при сравнении размеров высоты гор и глубины впадин принимаем допущение, что начальное напряженное состояние массива с достаточной точностью определяется

вычисленными значениями напряжений  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_{xy}$  - (*МПа*) в центре воображаемого туннеля.

**В третьей главе** приводится математическая модель напряженного состояния вокруг туннелей и горных выработок в массивах с горным рельефом без учета действия напора воды.

Напряжённое состояние массивов вокруг туннелей состоит из первых трех полей напряжений (8), которые в контурных точках туннеля удовлетворяют граничным условиям (15).

Поэтому, поле напряжений при образовании туннеля  $\sigma_x^m$ ,  $\sigma_y^m$ ,  $\tau_{xy}^m$  будем искать исходя из граничного условия (15). Формы отверстий, с помощью которых моделируются поперечные сечения туннелей, весьма разнообразны и имеют сложную конфигурацию.

Для удобства дальнейших рассуждений используем конформные отображения внешности отверстий на внешность единичного вспомогательного комплексного переменного  $\zeta = \zeta + i\eta$  с помощью отображающей функции:

$$z = \omega(\zeta); \ z = x + \iota \cdot y;$$
  

$$\omega(\zeta) = e^{i\delta}R[\zeta + \omega_0(\zeta)]; \ \omega_0(\zeta) = \sum_{k=1}^5 d_k/\zeta^k$$
(16)

Здесь  $1 \le \rho \le \infty$  ось положительных чисел;  $0 \le \theta \le 2\pi$ - в радианах; R – коэффициент изменения размеров отверстия;  $\delta$  – параметр (в радианах) для установления ориентации оси симметрии отверстия относительно горизонтальной оси.

Параметры отображающей функции  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$ ,  $d_5$  путем вариации их значений достигаются моделированием разнообразных и сложных форм поперечных сечений туннелей.

При отображении типа (16) угол  $\alpha$  между направлениями осей *ох* и касательной кривой  $\rho$  определяется формулой:

$$e^{2i\alpha} = \zeta^2 \omega'(\zeta) / \left(\rho^2 \overline{\omega'(\zeta)}\right); \quad e^{-2i\alpha} = \overline{\zeta}^2 \overline{\omega'(\zeta)} / \left(\rho^2 \omega'(\zeta)\right) \tag{17}$$

Поле напряжений при образовании туннеля характеризуется функциями  $\varphi(\sigma)$ и  $\psi(\sigma)$ , которые определяются из решения граничной задачи:

$$\begin{bmatrix} R\Gamma\sigma + \varphi(\sigma) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R\overline{\Gamma} + \overline{\varphi'(\sigma)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega(\sigma)/\overline{\omega'(\sigma)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R\Gamma'\sigma + \overline{\psi(\sigma)} \end{bmatrix} = 0$$
$$\begin{bmatrix} \overline{R\Gamma\sigma} + \overline{\varphi(\sigma)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R\Gamma + \varphi'(\sigma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{\omega(\sigma)}/\omega'(\sigma) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R\Gamma'\sigma + \psi(\sigma) \end{bmatrix} = 0$$
(18)

Интегралы типа Коши от граничного условия (18) для внешности единичного круга имеют вид:

$$\varphi(\zeta) + G(\zeta) = A_0(\zeta); \quad \varphi'(\zeta) \cdot [\overline{\omega}(\zeta)/\omega'(\zeta)] + \psi(\zeta) - \overline{G_0}$$

$$G(\zeta) = [b_3\overline{R}_1 + 2b_4\overline{R}_2 + 3b_5\overline{R}_3]e^{2i\delta}\zeta^{-1} + [b_4\overline{R}_1 + 2b_5\overline{R}_2]e^{2i\delta}\zeta^{-2} + [b_5\overline{R}_1]e^{2i\delta}\zeta^{-3}$$

$$A_0(\zeta) = \sum_{k=1}^5 ca_k\zeta^{-k}; \quad B_0(\zeta) = \sum_{k=1}^5 sb_k\zeta^{-k}; \quad (19)$$

Таким образом, поле напряжений от влияния возникновения туннеля в массиве межгорной впадины  $\sigma_{\rho}, \sigma_{\theta}, \tau_{\rho\theta}$ , начальное напряженное состояние в

точке возникновения туннеля характеризуется компонентами  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_{xy}$  и будет определено из граничных условий (18). Интегралы типа Коши от заданных граничных условий (18) представлены функциями  $\Phi(\zeta), \Psi(\zeta)$  (19) в зависимости от конкретной формы сечения туннеля.

Расчеты напряжений вокруг туннелей вначале выполнены для криволинейных координат, связанных отображением (16). Как и в главе 2, такой расчет необходим для проверки граничных условий (18). Сумма первых трех полей напряжений в (8) на контуре туннеля должна выполнять условие  $\sigma_{\rho}(1, \theta) = 0$  и  $\tau_{\rho, \theta}(1, \theta) = 0$ .

Вычислена сумма первых трех полей напряжений (8) в системе криволинейных координат для контурных точек туннеля  $\rho = 1$  с овальным сечением, Результаты расчета представлены в таблице 3.

$\sigma_{ ho}(1, heta)$ (MIIa)		$\sigma_{\theta}(1,\theta)$ (MIIa)
$-2.84 \cdot 10^{-14}$	8.882·10 <sup>-15</sup>	-243.385
$-4.974 \cdot 10^{-14}$	$-3.73 \cdot 10^{-14}$	-254.971
$2.132 \cdot 10^{-14}$	$2.043 \cdot 10^{-14}$	-264.289
$-9.237 \cdot 10^{-14}$	$-1.128 \cdot 10^{-13}$	-268.089
$-1.101 \cdot 10^{-13}$	$5.507 \cdot 10^{-14}$	-260.994
$-7.461 \cdot 10^{-14}$	$-3.553 \cdot 10^{-14}$	-238.005
$-9.948 \cdot 10^{-14}$	$-7.105 \cdot 10^{-14}$	-199.199
$-2.132 \cdot 10^{-14}$	$5.100 \cdot 10^{-14}$	-151.878
$9.948 \cdot 10^{-14}$	$-3.553 \cdot 10^{-14}$	-106.031
$-7.105 \cdot 10^{-14}$	$3.553 \cdot 10^{-14}$	-68.153

Таблица 3 - Напряжения на контуре туннеля с овальным сечением

Вычислено влияние туннеля на распределение начального напряженного состояния массива напряжений в системе криволинейных координат. Для контурных точек туннеля с треугольным сечением при  $\rho = 1$  в рамках закона Гука вычислены компоненты напряжений и относительных деформаций при значении модуля Юнга  $E = 1,71 \cdot 10^4$  МПа и коэффициента Пуассона  $\nu = 0,3$ .

Числовые значения компонентов напряжний приняты:

$$S_x = -30M\Pi a, \ S_y = -8 \ M\Pi a, \ : S_{xy} = -9M\Pi a$$

тиолици і типр	Tuosiniqu + Tranpakenina B Kontyptibik To ikuk Tpeyrosibiloro Tynitesix				
$\sigma_{ ho}(1, heta)$ (MIIa)	$\sigma_{ heta}(1, heta)$ (MIIa)	$ au_{ ho}(1, heta)$ (MIIa)			
$-1.776 \cdot 10^{-15}$	- 202	$-2.132 \cdot 10^{-14}$			
$3.126 \cdot 10^{-13}$	- 203.241	$8.971 \cdot 10^{-14}$			
$-1.954 \cdot 10^{-14}$	- 165.686	$-3.997 \cdot 10^{-14}$			
$-4.441 \cdot 10^{-14}$	- 125.28	$7.105 \cdot 10^{-15}$			
$1.066 \cdot 10^{-14}$	- 94.439	$8.882 \cdot 10^{-15}$			
$1.421 \cdot 10^{-14}$	- 72.669	0			
$1.954 \cdot 10^{-14}$	- 57.299	$1.066 \cdot 10^{-14}$			
$-1.243 \cdot 10^{-14}$	- 46.182	0			
$3.553 \cdot 10^{-15}$	- 37.892	$-3.553 \cdot 10^{-15}$			
$-1.421 \cdot 10^{-14}$	- 31.512	$-5.329 \cdot 10^{-15}$			

Таблица 4 - Напряжения в контурных точках треугольного туннеля





Рисунок 2 - Изменение напряжений и относительных деформаций вокруг с треугольным сечением туннеля (МПа)

Вычислено распределение напряжений вокруг трапециевидного туннеля (рис. 3), когда оно возникает при отсутствии напора P = 0.

Вычисленные значения компонентов начального напряженного состояния массива в центре воображаемого туннеля, поле напряжений для выполнения расчетов принимаем:  $Sx = -40 M\Pi a$ ;  $Sy = -20 M\Pi a$ ;  $S_{xy} = -10 M\Pi a$ .



Рисунок 3 - Распределение напряжений вокруг туннеля (слева), изолинии распределения относительных деформаций вокруг туннеля (справа) (МПа)

Числовые значения  $\sigma_{\rho}(1,\theta)$ ,  $\sigma_{\theta}(1,\theta)$ ,  $\tau_{\rho\theta}(1,\theta)$  и граничные условия (18) для туннеля с трапециевидным сечением вычислены с высокой точностью.

**В четвертой главе** выявлено влияние напора воды на распределение напряжений для туннелей с типовыми поперечными сечениями. Изучены закономерности распределения напряжений вокруг туннелей при различных сочетаниях действий гравитационных, горизонтальных тектонических сил и напора воды.

Влияние туннеля  $\sigma_x^{\rm H}, \sigma_y^{\rm H}, \tau_{xy}^{\rm H}$  устанавливается путем решения граничной задачи для плоскости *хоу* с отверстием, форма которого моделируется с помощью отображающей функции (16).

Напряженное состояние массивов вокруг туннелей трех полей напряжений (8) в контурных точках удовлетворяет граничным условиям (11) и записывается в следующем виде:

$$\varphi(\sigma) + \frac{\omega(\sigma)}{\overline{\omega'(\sigma)}} \cdot \overline{\varphi'(\sigma)} + \overline{\psi(\sigma)} = i \int_{0}^{s} (X_n - \iota Y_n) ds + const$$
$$\overline{\varphi(\sigma)} + \frac{\overline{\omega(\sigma)}}{\omega'(\sigma)} \cdot \varphi'(\sigma) + \psi(\sigma) = -i \int_{0}^{s} (X_n + Y_n) ds + const$$
(20)

Согласно методу Н.И. Мусхелишвили граничное условие (20) следует из соотношения:

$$X_n = -P\cos(n, x), \quad Y_n = -P\cos(n, y)$$
  

$$(X_n + iY_n)ds = -P(dy - idx) = Pid\overline{z},$$
  

$$(X_n - iY_n)ds = -P(dy + idx) = -Pidz$$
(21)

Когда на контур туннеля действует гидростатический напор ( $-P_0$ ) после вычисления интегралов в правой части (21) необходимо решить граничную задачу (глава 3) по определению функций  $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$  из граничных условий:

$$\frac{\varphi(\sigma) + \overline{\varphi'(\sigma)} \cdot \left[\omega(\sigma)/\overline{\omega'(\sigma)}\right] + \overline{\psi(\sigma)} = -P_0 R \omega(\sigma);}{\overline{\varphi(\sigma)} + \varphi'(\sigma) \cdot \left[\overline{\omega(\sigma)}/\omega'(\sigma)\right] + \psi(\sigma)} = -P_0 R \overline{\omega(\sigma)}.$$
(22)

Компоненты напряжений  $\sigma_x^{\rm H}, \sigma_y^{\rm H}, \tau_{xy}^{\rm H}$  или  $\sigma_\rho^{\rm H}, \sigma_\theta^{\rm H}, \tau_{\rho\theta}^{\rm H}$  выражаются через найденные из граничного условия (22) функциями  $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$  в зависимости от поперечного сечения туннеля и от величины напора  $P_0$ .

Когда туннель имеет круглое сечение и с тем же начальным состоянием массива  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_{xy}$ , как представлено в главе 4, в этом случае m = 0 (полная симметрия). Вычислены распределения контурных значений напряжений  $\sigma_{\rho}$ ,  $\sigma_{\theta}$ ,  $\tau_{\rho,\theta}$  вокруг эллиптического поперечного сечения напорного туннеля. Результаты представлены на рисунке 4 в виде изолинии. Как видно из рисунка при  $P = -1M\Pi a$  концентрация напряжений вокруг эллиптического туннеля.



Рисунок 4 - Распределение напряжений на контуре эллиптического туннеля в зависимости только от напора воды (МПа)

Суммарное поле напряжений в (8), когда напор  $P_0 = -25$  Мпа, для контурных точек туннеля с треугольным сечением представлено в таблице 5.

преугольным поперечным сечением				
$\sigma_{ ho}(1,\theta)$ (MIIa)	$ au_{ heta}(1, heta)$ (MIIa)	$\sigma_{\theta}(1,\theta)$ (MIIa)		
-25	0	125		
-25	$8.882 \cdot 10^{-14}$	107.008		
-25	$-1.137 \cdot 10^{-13}$	72.663		
-25	$4.974 \cdot 10^{-14}$	44.074		
-25	$1.776 \cdot 10^{-15}$	25		
-25	$1.776 \cdot 10^{-15}$	12.834		
-25	$6.55 \cdot 10^{-15}$	5		
-25	$-2.109 \cdot 10^{-15}$	-0.146		
-25	-5.551 · 10 <sup>-15</sup>	-3.571		
-25	0	-5 839		

Таблица 5 - Напряжения в контурных точках напорного туннеля с треугольным поперечным сечением

Моделирован напорный туннель с горизонтальным овальным сечением. Результаты распределения напряжений и относительных деформаций от действия напора на контур туннеля представлены на рис. 5.



Рисунок 5 - Изолинии распределения напряжений (слева) и относительных деформаций вокруг напорного туннеля от совместных сил (справа) (МПа)

Выполнен расчет туннеля с трапециевидным сечением, контур которого обозначен через ( $x4_2$ — $y4_2$ ). Сумма первых трех полей напряжений в системе криволинейных координат для контурных точек туннеля при  $\rho = 1$ 

рассчитана и представлена в таблице 6 для каждого компонента напряжений при действии напора *P*= - 25 МПа.

Таблица 6 - Напряжения на контуре туннеля с трапециевидным сечением в зависимости от напора воды

$\sigma_{ ho}(1,\theta)$ (MIIa)	$\sigma_{\theta}(1,\theta)$ (MIIa)	$ au_{ ho heta}(1, heta)$ (MIIa)
- 25	5.132	0
- 25	5.794	$-1.021 \cdot 10^{-14}$
- 25	7.876	$2.220 \cdot 10^{-15}$
- 25	11.68	$-1.0066 \cdot 10^{-14}$
- 25	17.751	$-1.599 \cdot 10^{-14}$
- 25	26.857	$-2.487 \cdot 10^{-14}$
- 25	39.634	0
- 25	55.109	$-4.619 \cdot 10^{-14}$
- 25	67.746	$-5.862 \cdot 10^{-14}$
- 25	68.337	$1.332 \cdot 10^{-14}$

Для контурных точек туннеля со сводчатым сечением при  $\rho = 1$  расчеты каждого компонента напряжений представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Напряжения на контуре со сводчатым сечением туннеля в зависимости от напора воды

$\sigma_{\rho}(1,\theta)$ (MIIa)	$\sigma_{ heta}(1, heta)$ (MIIa)	$ au_{ ho heta}(1, heta)$ (MIIa)
-15	24.868	0
-15	24.442	$7.55 \cdot 10^{-15}$
-15	23.328	$-2.665 \cdot 10^{-15}$
-15	21.917	$-1.776 \cdot 10^{-15}$
-15	20.922	$-3.553 \cdot 10^{-15}$
-15	19.730	$1.776 \cdot 10^{-15}$
-15	19.356	$-3.553 \cdot 10^{-15}$
-15	19.427	$1.776 \cdot 10^{-15}$
-15	19.906	0
-15	18.551	0

В результате исследования создана аналитическая модель напряженнодеформированного состояния вокруг напорного туннеля со сводчатым поперечным сечением с развитыми вертикальными стенками при P = -15*МПа*.

Найденные компоненты напряжений позволили с помощью закона Гука вычислить компоненты относительных деформаций при принятых значениях модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Для выполнения расчетов начальное напряженное состояние принято, как:

$$S_x = -30 M\Pi a; S_y = -25 M\Pi a; S_{xy} = -10 M\Pi a.$$



Рисунок 6 - Изолинии распределения напряжений вокруг туннеля (слева) и относительных деформаций (справа) напорного туннеля в зависимости от совместных сил (МПа

Таким образом, в результате расчетов (рис.6) установлены величины напряжений и относительных деформаций массивов пород вокруг туннелей со сводчатым поперечным сечением в условиях влияния различных силовых факторов и действия напора воды. Все соотношения, необходимые для вычисления компонентов напряжений и деформаций алгоритмизированы в нотациях МАТСНАD.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации даны новые решения актуальной научно-технической задачи – моделирование и расчет напряженного и деформированного состояния массива горных пород вокруг напорных туннелей с учетом горного рельефа, совместного действия гравитационных сил и тектонического сжатия, формы поперечного сечения и глубины залегания.

Основные методические и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

- 1. Разработан и реализован алгоритм расчета начального напряженного состояния массива горных пород вокруг туннеля в зоне влияния каньона, склона горы и межгорной впадины. Установлены значения горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений в массиве вокруг туннеля. Численные показатели напряжений принимаются за граничные условия для определения их влияния на образованный туннель.
- 2. Методика определения напряжений вокруг туннеля в массиве заключается в суммировании трех полей напряжений:

- поле напряжений от интегрирования уравнений равновесия при действии силы гравитации и горизонтального тектонического сжатия;

- влияние форм горного рельефа на распределение напряжений;

- влияние напора воды на распределение напряжений при образовании туннеля в массиве горных пород.

Использован математический аппарат двухмерной теории упругости с помощью конформных отображений полубесконечной области на полуплоскость и отверстий на внешности единичного круга.

- 3. Установлены новые закономерности распределения напряжений вокруг выработок и туннелей при совместном и раздельном действии гравитационных сил и тектонического сжатия.
- 4. Определено влияние напора воды на распределения напряжений и деформаций вокруг туннелей различной формы. Установлено, что напор воды вызывает растяжение в контурных точках туннеля и сжатие в направлении перпендикулярном к контуру.
- 5. Проведен расчет напряжений и деформаций вокруг туннелей в новой программной среде MATHCAD. Оформление результатов расчета в виде изолиний, поверхностей напряжений автоматизировано и не требует вмешательства исследователя.
- 6. Предложенная методика расчета напряжений и деформаций вокруг туннелей в новой программной среде MATHCAD принята для практического применения при инженерных расчетах для обоснования проектных решений по обеспечению устойчивости и выборе

поперечных сечений горных выработок и их креплении в горном массиве проектной организацией "Строительство малой гидроэлектростанции на реке Козубаглан Лейлекского района Баткенской области". Отдельные результаты диссертации внедрены в учебный процесс в КНАУ и КРСУ (акты внедрения прилагаются в диссертационной работе).

# СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ:

**1.** Ботоканова, Б.А. Оценка геомеханических параметров массивов горных пород вокруг гидротехнических туннелей [Текст] / Б.А. Ботоканова // Вестн. Кырг. аграр. ун-та. – 2004. – № 2. – С. 16-17. <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=45801701</u> – Загл. с экрана.

2. Ботоканова, Расчет напряжённого Б.А. состояния напорных гидротехнических туннелей [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Вестн. 2004. ун-та. № 2. С. 18-20. Кырг. аграр. https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=53416 – Загл. с экрана.

**3.** Ботоканова, Б.А. Напряженное состояние пород вокруг гидротехнического туннеля, расположенного в наклонно-слоистом массиве [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Развитие инженерных методов в геомеханике: оценка, прогноз, контроль (Авершинские чтения): материалы Междунар. науч.-практ. конф. / ИФиМГП НАН КР. – Бишкек, 2005. – С. 216-224.

4. **Ботоканова, Б.А.** О сейсмонапряженном состоянии гидротехнического туннеля в горной местности [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев, А.А. Аманалиев // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-та. – 2006. – Т. 6, № 7. – С. 56-59. https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=10529 – Загл. с экрана.

5. Ботоканова, Б.А. Моделирование форм поперечного сечения горных выработок и нагорных плотин с помощью конформного отображения [Текст] / Б.А. Ботоканова, Исмаилова К. Дж, Баялиева Ж.А. // Вестн. Кырг. аграр. ун-та. – 2009. – № 5 (16): Материалы Междунар. науч.-практ. конф.: «Развитие научно-технического потенциала мелиорации и водного хозяйства на современном этапе в КР». – С. 30-34.

**6.** Ботоканова, Б.А. Распределение напряжений вокруг напорного туннеля с эллиптическим (круглым) поперечным сечением [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев, А. А. Аманалиев // Современные проблемы механики сплошных сред: сб. тр. Междунар. конф.: «Проблемы геомеханики и освоения недр». – Бишкек, 2011. – Вып. 13: Геомеханика массивов горных пород. – С. 330-338. <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=28777820</u> – Загл. с экрана.

**7. Ботоканова, Б.А.** Методика и программа расчета напряжений вокруг туннелей (выработок) [Текст] / Б.А. Ботоканова, А.А. Аманалиев, Б. Жумабаев // Современные проблемы механики сплошных сред: сб. тр. Междунар. конф. «Проблемы геомеханики и освоения недр». – Бишкек, 2012.

– Вып. 15: Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии. – С. 102-111. https://elibrary.ru/item.asp?id=28926297 – Загл. с экрана.

**8. Ботоканова, Б.А.** Распределение напряжений вокруг тоннеля с овальным поперечным сечением [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Современные проблемы механики сплошных сред: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы механики сплошных сред». – Бишкек, 2012. – Вып. 16: Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии. – С. 298-304.

**9. Ботоканова, Б.А.** Напряженно-деформированное состояние пород вокруг напорных гидротехнических тоннелей [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Вестн. Кырг. -Рос. Славян. ун-та. – 2013. – Т. 1: Материалы 2-й Междунар. конф., посвящ. 20-летию образования КРСУ им. Б.Н. Ельцина и 100-летию Я.В. Быкова. – С. 181-186.

**10. Ботоканова Б.А.** Распределение напряжений вокруг гидротехнических туннелей [Текст] / Б.А. Ботоканова, Ж.А. Баялиева, А. К. Жамангапова // Вестн. Кырг. аграр. ун-та. – 2018. – № 1 (46). С. 28-32 https://elibrary.ru/item.asp?id=32351881 – Загл. с экрана.

Б.А. Моделирование 11. Ботоканова, И расчет напряженного И деформированного состояния напорных туннелей в массиве вблизи речного каньона [Текст] / Ж.А. Баялиева, Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Естеств. и 5(119). 2018. техн. науки. М., \_ № C. 108-118. https://elibrary.ru/item.asp?id=35209824 – Загл. с экрана.

12. Ботоканова, Б.А. Методика математического моделирования напряженного состояния вокруг напорного туннеля, расположенного в горном массиве [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Естеств. и техн. науки. М., 2018. 8 (122).C. 235-243. N⁰ \_ https://elibrary.ru/item.asp?id=35574849 – Загл. с экрана.

**13.** Ботоканова, Б.А. Математическое моделирование напряженного и деформированного состояния вокруг напорного туннеля, расположенного в зоне межгорной впадины [Текст] / Ж.А. Баялиева, Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Вестн. Забайкальского гос. ун-та. – Чита, 2018. – Т. 24, № 7. – С. 4-17. <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=36309853</u> – Загл. с экрана.

**14.** Ботоканова, Б.А. Моделирование и прогноз напряженного и деформированного состояния напорного туннеля треугольным сечением [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // Вестн. науки и образования. – М., 20180. – Т. 2, № 6 (42). – С. 88-97. <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=35156386</u> – Загл. с экрана.

**15.** Ботоканова, Б.А. Расчет напряжений и деформаций массивов вокруг напорного туннеля трапециевидным сечением [Текст] / Б.А. Ботоканова, Б. Жумабаев // European Journal of. Technical and Natural Sciences. – Vienna, 2018. – № 3. – С. 16-27. <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=36269620</u> – Загл. с экрана.

**16.** Ботоканова, Б.А. О концентрации напряжений вокруг туннелей с типовыми поперечными сечениями [Текст] / Б.А. Ботоканова // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2018. – № 9. – С. 13-33. <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=37030543</u> – Загл. с экрана. **17.** Ботоканова, Б.А. Изменения полей напряжений вокруг туннеля со сводчатым сечением от действия напора воды [Текст] / Б.А. Ботоканова Известия ВУЗов Кыргызстана. – Бишкек, 2021. – № 5. – С. 14 – 20. <u>https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48220823</u>–Загл. с экрана.

#### РЕЗЮМЕ

диссертации Ботокановой Бактыгул Асанкожоевны на тему: «Оценка напряженно-деформированного состояния массивов вокруг напорных туннелей методом математического моделирования» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20. – «Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика, и горная теплофизика».

Ключевые слова: гравитационная сила, деформация, напряжения, комплексные потенциалы, математическое моделирование, отображающая функция, сейсмичность, гидротехнический туннель, горные выработки.

**Объект исследования:** оценка напряженно-деформированного состояния массивов вокруг напорных туннелей методом аналитического моделирования.

**Предмет исследования:** изучение распределения полей напряжений и деформаций массива горных пород вокруг гидротехнических туннелей от совместных сил методом аналитического моделирования.

Цель диссертации: оценка напряженно-деформированного состояния массивов напорных гидротехнических туннелей, расположенных в горной местности в условиях действий силы гравитации, тектонического сжатия и напора воды методом аналитического моделирования.

Методы исследования: метод двухмерной теории упругости, аппарата конформных отображений, метод Колосова-Мусхелишвили, использование программного обеспечения МАТНСАD, численный расчет и компьютерная графика на ПЭВМ.

Научная новизна исследования: разработана аналитическая модель и методика расчета напряжений вокруг (напорных, безнапорных) туннелей, расположенных в горных массивах в программной среде МАТНСАD, допускающая учёт совместных или раздельных действий сил гравитации, горизонтальных тектонических сил, гидростатического напора воды для различных типовых форм поперечных сечений.

Область применения: учебные программы по дисциплинам «Математические методы двумерной теории упругости» и «Проведение горных выработок» в КРСУ им. Б.Н. Ельцина. В КНАУ по дисциплине «Решение инженерных задач методом математического моделирования», научно – исследовательские работы магистрантов.

Методика расчета напряжений вокруг туннелей принята для практичского применения при инженерных расчетах проектной организацией «Строительство малой гидроэлектростанции на реке Козубаглан Лейлекского района Баткенской области».

25.00.20 – «Геомеханика, тектерди жардыруу менен талкалоо, рудник аэрогазодинамикасы жана тоо-кен жылуулук физикасы» адистиктери боюнча техника илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн Ботоканова Бактыгул Асанкожоевнанын «Математикалык моделдөө ыкмасы менен басымдуу туннелдердин айланасындагы массивдердин чыналуу-деформациялык абалын баалоо» темасындагы диссертациясынын

#### КЫСКАЧА КОРТУНДУСУ

**Негизги сөздөр:** тартылуу күчү, деформация, чыңалуу, комплекстүү потненциал, чагылдыруу функциясы, математикалык модел түзүү, сейсмикалык күч, гидротехникалык туннель, кең иштетүү.

**Изилдөө объектиси:** түрдүү кесилиштеги гидротехникалык туннелдер айланасындагы чыңалуу-деформациялык абалын аналитикалык моделдөө ыкмасы менен баалоо.

**Изилдөө предмети:** Аналитикалык моделдөө ыкмасы менен биргелешкен күчтөрдүн гидротехникалык туннелдердин тегерегиндеги чыңалуу талааларынын жана тоо массасынын деформацияларынын таралышын изилдөө.

**Диссертациынын максаты:** тартылуу күчү, тектоникалык кысуу жана суунун басымы аракет кылган шарттарда тоолуу аймактарда жайгашкан басымдуу гидротехникалык туннелдердин чыңалуу-деформациялык абалын аналитикалык моделдөө ыкмасы менен баалоо.

**Изилдөө ыкмасы:** эки өлчөмдүү серпилгичтүүлүк теориясынын методу, конформдук чагылдыруу аппараты, Колосов-Мусхелишвили методу, МАТНСАD программасын колдонуу, компьютердик сандык эсептөө жана компьютердик графика.

Изилдөөнүн илимий жаңылыгы: тоо массивдеринде жайгашкан

(басымдуу, басымсыз) тунеллдеринин айланасындагы чыңалууларды, тартылуу күчүнүн биргелешкен же жекече аракеттери, узатасынан кеткен тектоникалык күчтөр, суунун гидростатикалык басымы таасир эткен түрдүү кеилиштердин ар типтүү формалары үчүн эсептөөнүн аналитикалык модели жана методологиясы MATHCAD программалык чөйрөсүндө иштелип чыккан.

Колдонуу Адистерди боюнча жааты: даярдоо окуу «Механика» боюнча «Эки программаларында: адистиги өлчөмдүү серпилгичтүүлүк теориясынын математикалык методдору», «Курулуш» багытында, «Гидротехникалык курулуш» профили боюнча "Тоо кен иштетууну жургузуу", «Математикалык моделдөө жолу менен инженердик маселелерди чечүү» дисциплиналары боюнча, ошондой эле магистранттардын илимий-изилдөө иштеринде, «Баткен областынын Лейлек

26

районундагы Козубаглан дарыясына кичи ГЭСти куруу» долбоорлоо уюмунун инженердик эсептөөлөрүндө эсептөө методикасы колдонулду.

#### RESUME

Of the dissertation by Botokanova Baktygul Asankozhoyevna on the theme: «Evaluation of the stress-strained condition of the masses around the pressure tunnels by mathematical modeling» for the candidate of technical sciences degree in the specialty 25.00.20. - «Geomechanics, explosion destruction of rocks, mine aerogas dynamics, and mountain thermal physics».

**Keywords:** gravitational force, deformation, strain, complex potentials, mathematical modeling, mapping function, seismicity, hydraulic tunnel, mining.

**Objects of study estimation** of stress-deformed condition of arrays around pressure tunnels by mathematical modeling.

**Subject of the study:** is the study of the distribution of stress fields and deformations of the rock masses around hydraulic tunnels from joint forces by mathematical modelling.

The objective of the dissertation is to assess the stress-strained state of the masses of pressure hydraulic tunnels located in mountainous terrain, under the action of gravity, tectonic compression and water pressure in a unified mathematical model.

**Research methods:** 2D elastic theory method, conformal mapping apparatus, Kolosov-Muskhelishvili method, use of MATHCAD software, numerical calculation and computer graphics on PC.

Scientific novelty of the study: developed analytical model and method of calculation of stresses around (pressure, free-flow) tunnels located mountain masses in the software environment MATHCAD, permitting the accounting of joint or separate actions of gravity forces, horizontal tectonic forces, hydrostatic pressure of water for various standard forms of cross-sections.

**Field of application:** Education programs for training of specialists: in the specialty «Mechanics» in the discipline «Mathematical methods of twodimensional theory of elasticity», in the direction «Construction», profile «Hydrotechnical construction» in the discipline «Mining operations» at the KRSU named after B.N. Yeltsin. KNAU in the discipline «Solution of engineering problems by mathematical modeling», as well as in the research work of undergraduates.

The calculation method is adopted for practical application in engineering calculations by the project organization «Construction of a small hydroelectric power plant on the Kozubaghlan River, Leilek district, Batken region».