

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»
(НИТУ МИСИС)



Борисов Борис Борисович

**ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ И
ПРОЦЕДУР ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
РЕАКЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Специальность 2.8.7 – Теоретические основы проектирования
горнотехнических систем

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Агафонов Валерий Владимирович

Москва, 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. К субконцептуальным составляющим общепринятой концепции, которая заявляется в процессе проектирования объемно-планировочных, технологических и конструктивных решений различного рода подземных сооружений, к которым с определенной степенью специфики можно отнести и водозаборные сооружения систем водообеспечения в пределах заданного района пересеченной местности, можно отнести проектные производственные правила и механизмы, построенные на численном моделировании реакции среды строительства, так как опыт эксплуатации подобных систем свидетельствует о том, что в качестве основных факторов, предопределяющих их эксплуатационную устойчивость, являются геомеханические составляющие грунтового массива строительства и сформировавшиеся течения в прибойных зонах.

Приоритет заявленного подхода позволяет нивелировать до приемлемого уровня проявления различного рода аварийных ситуаций как на стадии строительства, так и на стадии устойчивой эксплуатации.

Общеизвестно, что системы водообеспечения классифицируются как сложные горнотехнические сооружения, причем особенности их проектирования и эксплуатации обусловлены специфичностью водопроявлений, для локализации которых требуются превентивные технологические решения нестандартного типа и принципиально иные методологические и методические производственные правила вынесения окончательных проектных решений, что подтверждается высокой степенью риска разработки и реализации проектов подобной направленности с режимами формирования и проявлений максимальных нагрузок, что, в свою очередь, требует отслеживания изменений эксплуатационных свойств сооружений и конструкций.

Исходя из вышеизложенного, в диссертационном исследовании решается актуальная научная задача разработки проектных модельных представлений в обозначенной проблематичной области, позволяющих достаточно объективно и достоверно ориентироваться в методологических и методических составляющих процедуры выбора и обоснования соответствующих проектных решений с рациональными параметрами.

Степень разработанности и проработки поставленной научной задачи

В основу целевых функций математических модельных представлений в обозначенной среде проектирования закладывались системы уравнений, решение которых требовало наличия различных модификаций численных методов интегрированного характера как среди российских, так и зарубежных исследователей-ученых. Учитывая определенные практические и теоретические достижения можно выделить и обозначить труды Д.Р. Каплунова, А.С. Малкина, Фрянова В.Н., Рыльниковой М.В., Савича И.Н., Мельника В.В., Куликовой Е.В., К.В. Руппенейта, Д. Талобра, Ч. Джегера, Л.Д. Шевякова, Б.А. Картозия, М.Н. Щуплика, И.Р. Венгерова, А.П. Панкратенко, М.С. Плешко, Конюхова Д.С., А.Г. Протосени, Саммаля А.С., Анциферова С.В., Иовлева Г.А., Цюпы Д.А.,

Волохова Е.М., Белякова Н.А., Карасева М.А., Ставрогина А.Н., Авершина С.Г., Тимошенко С. П., Гудьера Дж., Малькова В. М. и многих других.

Модельные представления, разработанные и представленные в рамках исследований вышеперечисленных авторов в обозначенной проблематичной области позволяют достаточно объективно и достоверно ориентироваться в методологических и методических составляющих процедуры выбора и обоснования соответствующих проектных решений с рациональными параметрами, однако в области проектирования таких специфических горнотехнических сооружений, к которым с полным основанием можно отнести различные системы водообеспечения с различным функциональным назначением, требуется их совершенствование и трансформация (наличие физической нелинейности взаимодействия грунтовых элементов, системы «бетон-бетон» и «бетон-скала», особенно с учетом водонасыщения, поэтапности проведения и сооружения обделок горнотехнических сооружений и конструкций, детализация параметра RQD и пр.).

В сфере обозначенных проблемных составляющих проектирования рассматриваемых горнотехнических сооружений наиболее рациональной и содержательной является методология с модельным представлением, где в качестве базовой составляющей заявляется модель дискретного (континуального) типа) типа МКЭ.

Данный подход предусматривает выполнение численных расчетов в двухфазной нелинейной постановке в трехмерном проектном пространстве объемных фильтрационных сил, что формирует учет всех составляющих физической нелинейности взаимодействия геологических элементов вмещающих грунтов с вводом в модельное представление ряда известных целевых ограничений и допущений.

В проблематичной области **объектами исследований** являются проектные подходы к выбору мест расположения водозаборных сооружений (систем водообеспечения), и их функциональных элементов с учетом моделирования и прогнозирования поведения грунтового массива.

Предмет исследований: проектные подходы и процедуры при обосновании проектных решений и определении их рациональных параметров при сооружении систем водообеспечения.

Основная идея работы состоит в том, что повышение эффективности систем поддержки принятия проектных решений при строительстве водозаборных сооружений систем водообеспечения достигается использованием итерационного метода МКЭ в перемещениях со спецификой физической нелинейности работы вмещающих грунтов в сочетании со строительными конструкциями горнотехнического сооружения.

Методы исследований. Алгоритмический комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих задач исследований в заявленной проблематичной области диссертационного исследования требует для их эффективного решения привлечения и работоспособного использования комплекса современных научных методов: методы осуществления проектной деятельности с учетом

моделирования и прогнозирования поведения грунтового массива в результате сооружения системы водообеспечения, методы геофизических исследований, итерационный метод МКЭ с конечно-элементной аппроксимацией в перемещениях со спецификой физической нелинейности работы вмещающих грунтов в сочетании со строительными конструкциями горнотехнического сооружения) и пр. В рамках решения поставленной научной задачи в целевом наполнении привлекается методическое обеспечение алгоритма Ньютона-Рафсона с составляющими трех инвариантов (девиатора и тензора напряжений, плоских деформаций с вводом в целевую функцию угла Лоде) и пр.

Защищаемые научные положения:

1. Общая стратегия осуществления проектной деятельности в области строительства горнотехнических сооружений, связанных с водообеспечением различного рода потребителей должна базироваться на научно-методическом обеспечении с модельным представлением, где в качестве базовой составляющей заявляется модель дискретного (континуального) типа) типа МКЭ с конечно-элементной аппроксимацией. В качестве базовой заявляется гипотеза уплотнения массива грунтовых пород, основанной на мультипликативной зависимости эффекта Баушингера с сопутствующей анизотропией и линеаризацией возникающих напряжений с учетом пластичности.
2. Система поддержки принятия проектных решений и оптимизационная модель при строительстве систем водообеспечения должна включать методическое обеспечение алгоритма Ньютона-Рафсона с составляющими трех инвариантов (девиатора и тензора напряжений, плоских деформаций с вводом в целевую функцию угла Лоде) с выполнением численных расчетов в двухфазной нелинейной постановке в трехмерном проектном пространстве объемных фильтрационных сил, что формирует учет всех составляющих физической нелинейности взаимодействия геологических элементов вмещающих грунтов. Для реализации процедуры проведения численных расчетов в области эксплуатационной устойчивости металлоконструкций горнотехнического сооружения системы водообеспечения следует привлекать сертифицированный комплекс Sofistik.
3. Конкурентоспособные концептуальные технико-технологические проектные решения систем водообеспечения с водозаборными сооружениями формируются на основе детального анализа структурно-геомеханических решений с выявлением и систематизацией по определенным правилам и алгоритмам оптимизации их эксплуатационной устойчивости, что с достаточной степенью достоверности и объективности позволяет выявлять возможные пути совершенствования прототипа (аналога) или создавать новые конкурентоспособные проектные (пионерные) решения. Требуемая толщина бетонной обделки должна составлять не менее 800 мм с силовым наполнением арматурой 16-A500C и с наличием двух опорных венцов из быстротвердеющего бетона B30.

Данные параметры удовлетворяют характеру реакции геологической среды на строительство заявленного горнотехнического сооружения и соответствуют картине напряжений и деформаций строительных конструкций.

Достоверность и объективность разработанных производственных правил алгоритмического обеспечения принятия проектных решений строительства систем обусловлена удовлетворительным уровнем сходимости полученных в результате проведения экспериментов исходных и результирующих данных в сравнении с аналогами теоретического плана (уровень сходимости превышает 90%) в рамках верификации разработанного методического обеспечения применительно к конкретному объекту исследований (водозабор из Чиркейского водохранилища в Буйнакском районе Республики Дагестан) с использованием современных средств цифрового многопараметрического оптимизационного моделирования и пр.

Научная новизна проведенных исследований обусловлена составляющими, существенно расширяющим возможности реализации проектных процедур:

1. Для обоснования проектных производственных правил и процедур при строительстве систем водообеспечения с учетом численного многопараметрического оптимизационного моделирования реакции геологической среды разработана процедура трансформации механизма адаптации и переориентации технологических процессов строительства систем водообеспечения с использованием подземных горных работ к реакции геологической среды и максимального нивелирования геотехнологических рисков при их ведении.

2. Разработана СППР с алгоритмом Ньютона-Рафсона и составляющими трех инвариантов (девиатора и тензора напряжений, плоских деформаций с вводом в целевую функцию угла Лоде) с выполнением численных расчетов в двухфазной нелинейной постановке в трехмерном проектном пространстве объемных фильтрационных сил, что формирует учет всех составляющих физической нелинейности взаимодействия геологических элементов вмещающих грунтов на основе модели разрушения скальных массивов Хоека-Брауна и диаграммы Феннера – Пахера.

Теоретическая значимость обусловлена разработкой научного подхода с симплициональными блоками, которые позволяют объективно структурировать сложившиеся взаимосвязи между элементами и факторами проектирования и эксплуатации с учетом динамической составляющей. сформировать соответствующие адаптационные способности к изменениям внутренней и внешней сред строительства и функционирования, повышающих их технико-экономическую эффективность,

Практическая значимость исследований обусловлена разработкой практических рекомендаций в области реализации предложенной системы поддержки принятия проектных решений при проектировании и строительстве шахтного водозабора системы водообеспечения с формированием достоверной и объективной прогнозной динамики сопутствующих геомеханических процессов и их воздействия на горнотехнические конструкции, что дает возможность

нивелировать до приемлемого уровня проявления различного рода аварийных ситуаций как на стадии строительства, так и на стадии устойчивой эксплуатации. Представленное решение в рамках разработанного научно-методического обеспечения поставленной научно-практической задачи позволяет существенно расширить границы формирования должного уровня промышленно-экологической безопасности.

Теоретические результаты работы могут представлять интерес в прикладном плане при выполнении соответствующих хозяйственных работ и в учебном процессе специализаций, посвященных строительству подземных сооружений и горных предприятий.

Реализация результатов работы. Методика, проектные производственные правила и процедуры, алгоритмическое обеспечение с рациональными геомеханическими модельными представлениями с предлагаемой моделью разрушения скальных массивов Хоека-Брауна и диаграммы Феннера – Пахера рекомендованы к использованию при строительстве шахтного водозабора системы водообеспечения (респ. Дагестан). Научные и практические результаты работы в рамках концепции и комплексной методики обоснования проектных производственных правил и процедур, методического, методологического, алгоритмического и архитектурного наполнения процедуры обоснования проектных решений и оптимизации их параметров при строительстве систем водообеспечения, прошли проверку и рекомендованы к использованию в практике их проектирования, строительства и эксплуатации в рамках Московской строительной компании ИБТ (гражданское и промышленное строительство) и ООО Этернум Тех (инженерные изыскания, инженерно-техническое проектирование, геотехнический прогноз (оценка влияния) строительства). Соответствующие справки приведены в Приложении.

В рамках получения и формирования соответствующих навыков и компетенций результаты проведенных в заявленной области проблематики теоретических и практических исследований широко используются в учебном процессе профильных кафедр Горного института НИТУ МИСИС в рамках изучения соответствующих дисциплин и рекомендованы для широкого использования проектными организациями при проектировании и строительстве подобных горнотехнических систем.

Личный вклад автора можно обозначить и конкретизировать следующими составляющими:

автор принимал непосредственное участие:

- в обосновании актуальности поставленной научно-практической задачи, что позволило правомерно сформулировать цель и идею;
- в выявлении положительных и негативных тенденций и закономерностей ранее проведенных методологических исследований с рациональными геомеханическими модельными представлениями;
- разработке проектных производственных правил принятия рациональных проектных решений и практических рекомендаций по результатам расчетов

применительно к конкретному объекту исследований (водозабор из Чиркейского водохранилища).

Апробация работы. Соответствующая апробация разработанной системы поддержки проектных решений и основных результатов диссертационной работы подтверждается рядом докладов, сделанных в рамках международного научного симпозиума "Неделя горняка - 2025", г. Москва, "Неделя горняка - 2026", г. Москва, международной научно-практической конференции, Bengaluru, India, 19–20 января 2026 года. – Bengaluru, India и в рамках проведения научных семинаров аспирантов кафедры «Геотехнологии освоения недр» Горного института НИТУ МИСИС.

Публикации. В рамках освещения и представления научной общественности автором опубликованы 6 научных работ в изданиях МБД и ВАК в соответствии с заявленной специальностью.

Объем и структура работы. Структурно диссертация представлена общепринятыми разделами: введением, 4 главами с табличным и иллюстрационным материалом, заключением, списком использованных литературных источников из 116 наименований и приложения. Общий объем составляет 122 страницы, в который включены 52 рисунка и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена актуальность поставленной научно-производственной задачи в свете современных тенденций недропользования, рассмотрена и проанализирована степень разработанности и проработки поставленной научной задачи с учетом сложившихся модельных представлений, выделены объект и предмет исследований, сформулированы цель, идея и частные задачи исследований с учетом конечных целевых модельных представлений научно-методического обеспечения, приведен перечень привлекаемых методов исследований, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, приведены основные составляющие достоверности и объективности проведенных исследований, научной новизны, практической и теоретической ценности, личного вклада, рекомендаций по внедрению результатов работы, приведены сведения о апробации и степени опубликованности и структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ основных методических и методологических составляющих исследований, выполненных в последнее время в исследуемой области, которые были связаны с развитием теоретической базы в области проектирования горнотехнических систем и оценки устойчивости обделок тоннельных сооружений с использованием различных проектных подходов (Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, В.В. Мельник, В.Н. Фрянов, Б.А.Картозия, А.Н. Панкратенко, А.С. Саммаль, М.С.Плешко, А.Г. Протосеня, И.В. Родин, W. Prager, D.W. Muir и др). В области физического оптимизационного и имитационного моделировании можно отметить работы Ф.С. Фролова, А.Н. Конькова, А. Kirsch, и др. Мукминовой Д. З., Харченко И. Я., Фомченкова Д. И., Лебедева М. О., Романевича К. В., Латышева О. Г.,

Карасева, М. А., Белякова Н. А., Иовлева Г. А. и др. Данные исследования базируются на вводе в проектную деятельность интенсивно развивающегося сектора нелинейной механики грунтов с использованием трансформированных методов численного моделирования и оптимизации, позволяющих осуществлять комплексную оценку и прогнозирование НДС вмещающего массива при проектировании и строительстве подземных сооружений с более тщательным учетом граничных условий и ограничений.

Анализ данных исследований показал, что при наличии обширного числа методических и методологических подходов к обоснованию проектных технологических решений с учетом расчетной базы НДС вмещающих массивов был использован ряд различных и кардинально отличающихся по своей сути допущений, которые приводят к возникновению весьма существенных неточностей с учетом определенных сложностей выделения наиболее значащих и влияющих горно-геологических и горнотехнических факторов на фоне других при строительстве подземных сооружений. Решить подобную задачу можно только с использованием комплексного подхода, основанного на использовании современных методов моделирования и оптимизации, многовариантных проработках технологических структур систем водообеспечения, выявлении тенденций и закономерностей развития научно-технического прогресса в заявленной проблематичной области.

Анализ комплекса технологических составляющих и методов моделирования процесса строительства подземных сооружений подобного типа показал, что они реализуются с использованием шести принципиальных составляющих, основанных на отличительных свойствах геотехнической среды и механизмах производства сопутствующих работ.

Проектными технологическими платформами при строительстве систем водообеспечения, реализуемых в настоящее время являются системы с водозаборами с самотечными или сифонными водоводами руслового типа, водозаборами берегового типа, водозаборными сооружениями с подводным огражденным каналом, водозаборами островного типа, комбинированными водозаборами, водозаборными сооружениями в условиях стратифицированного водоема. Одинаковыми связующими в технологиях подземного строительства систем водообеспечения являются строительное оборудование, конструкции, механизмы и пр., однако в различных горно-геологических и горнотехнических условиях выполняемые технологические операции кардинально отличаются.

С учетом этого в основу логико-информационной последовательности действий при проектной деятельности и обосновании проектных решений систем водообеспечения в данной работе заложены: принцип соответствия функций и функциональной структуры технологической системы водообеспечения, принцип поэтапного развития техники и технологии возведения подобных сооружений, принцип прогрессивной эволюции и принцип общих и частных закономерностей развития подобных горнотехнических систем, рис.1. Составляющие процедуры выявления продуктивных знаний, правил и процедур при проектировании систем

водообеспечения приведены на рис.2. Предлагаемые тезаурусные составляющие задачи обоснования проектных решений систем водообеспечения приведены на рис.3.

Во второй главе приведены основные методические положения предлагаемой методики и алгоритмического обеспечения осуществления проектной деятельности с учетом численного расчета реакции геологической среды при проектировании и строительстве систем водообеспечения.

В данной работе за основу процедуры концептуального проектирования и принятия проектных решений систем водообеспечения взята методология иерархического выбора, которая в увязке общих и частных закономерностей развития научно-технического прогресса в области водообеспечения представляется наиболее логичной в понимании, последовательной в описании и доступной в реализации.

Проектная деятельность с использованием данного подхода также предполагает на первом уровне формирование всего возможного множества вариантов с узконаправленной пространственной ориентацией (формирование продуктивных областей), наиболее приближенных к оптимальной области эффективных решений. Очевидно, что данный подход требует меньших затрат на его реализацию (меньшая энтропия - снижение риска принятия нерациональных проектных решений). Предложенный подход к концептуальному проектированию систем водообеспечения основан на системной стратегии и позволяет задействовать различные комплексы методов моделирования и оптимизации параметров (рисунки 1,2,3).



Рис. 1 – Составляющие модели принятия проектных решений систем водообеспечения с вертикальными водозаборами



Рис. 2 – Составляющие процедуры выявления продуктивных знаний, правил и процедур при проектировании систем водообеспечения

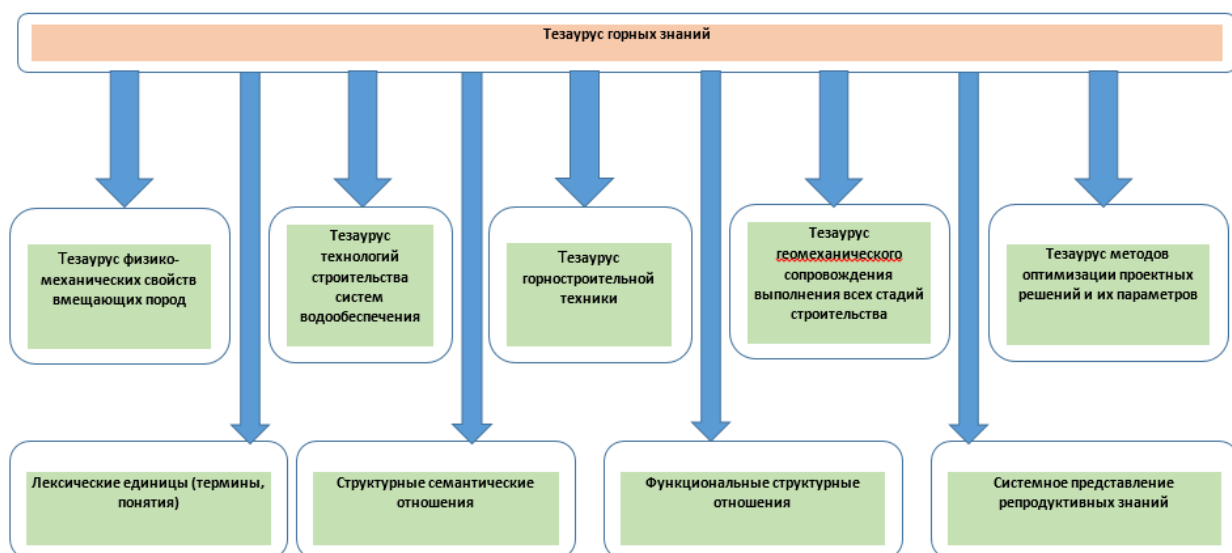


Рис.3 – Тезаурусные составляющие задачи обоснования проектных решений систем водообеспечения

В рамках этого подхода произведено обоснование типа и структуры горнотехнических сооружений системы водообеспечения, выполнена горно-геологическая оценка участка строительства при проектировании вертикального водозабора, осуществлен выбор методов моделирования и оптимизации с оценкой точности и надежности принимаемых решений, обеспечения качества проектов с учетом промышленной безопасности, определены основные параметры модели и особенности использования программного обеспечения *ZSoil* в рамках модельного представления конечно-элементной базы проведения исследований.

Следует отметить, что в настоящее время в этой области используется и находит широкое применение довольно обширное количество оптимизационных критериев: Друкера – Прагера, Мора-Кулона, Хоека-Брауна, Ладе - Дункана с их модификациями, которые обусловлены областями пространственной дискретизации (методы конечных разностей, объемов и элементов) и динамической составляющей (явная или неявная схема).

Основой решения поставленной задачи является научно-методическое обеспечение, позволяющее однозначно интерпретировать входные данные различной направленности у объектов проектирования в количественной, качественной, вербальной, семантической, символьной и др. формах. Таким образом, система реализует любой критериальный интерфейс. Система также воспринимает любые виды продуктивных знаний и продукционных правил синтеза проектных решений. С учетом этого выбрано и обосновано критериальное обеспечение инвариантной системы многокритериального выбора проектных решений в условиях достоверной, частично определенной информации и риска.

В основу научно-методического обеспечения заложен метод конечных элементов с критерием Хоека-Брауна, который является уникальным программным продуктом и в то же время достаточно простым в интерпретации

результатов средством в оценке геомеханических ситуаций в массиве горных пород с учетом широкого многообразия физико-механических механических свойств и условий нагружения, деформаций и смещений. В рамках используемого подхода требуется пересчет основных свойств массива, полученных лабораторным путем с учетом его структурных особенностей, что составляет суть **первого проектного производственного правила**.

В качестве целевой функции модельного представления Хоека-Брауна заявляется выражение:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b (\sigma_3 / \sigma_{ci}) + s)^a, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – составляющие наибольшего и наименьшего значения превалирующего напряжения;

σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие ненарушенного вмещающего массива;
 m_b , s , a – сопутствующие постоянные.

Постоянные целевой функции определяются с помощью зависимостей:

$$\begin{aligned} m_b &= m_i \cdot e^{[(GSI-100)/(28-14D)]}, \\ s &= e^{[(GSI-100)/(9-3D)]}, \\ a &= 1/2 + 1/6 \cdot (e^{GSI/15} - e^{20/3}) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь геологический индекс прочности GSI представляет собой двухпараметровую классификацию, учитывающую структуру массива и состояние поверхности стенок трещин; измеряется в баллах от 0 до 100. Классификация основывается на визуальном осмотре породных обнажений без привязки к конкретному типу сооружения, что позволяет применять ее в численных расчетных комплексах.

Для использования модели разрушения массива Хоека –Брауна необходимо 4 прочностных параметра с учетом GSI – геологического индекса прочности. В рамках объекта исследования обработаны данные бурения скважин глубиной 90 м каждая в пределах контура проектируемого сооружения и определены усредненные значения показателя RQD и качество поверхности стенок трещин для каждого инженерно-геологического элемента.

Основные входные параметры модели Хоука-Брауна в естественном и водонасыщенном состоянии представлены в таблицах 1 и 2. Численный (компьютерный) расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) вертикального ствола водозабора из водохранилища, а именно черновой (временной, опережающей) и чистовой (постоянной) обделок, выполняется путем математического моделирования системы «вертикальный шахтный ствол водозабора – вмещающий массив» методом конечных элементов (МКЭ) в сертифицированном программно-вычислительном комплексе ZSoil.

Расчет выполняется в пространственной (трехмерной) двухфазной (с учетом объемных фильтрационных сил) нелинейной постановке.

Учитывается физическая нелинейность работы скальных грунтов, нелинейное взаимодействие по контакту бетон-скала, поэтапность проходки и возведения обделки.

Таблица 1 – Основные входные параметры модели Хоека-Брауна для грунта в естественном состоянии

Структурные элементы ИГЭ	Значение статистического показателя	σ_{ci} , прочность массива на одноосное сжатие в ненарушенном состоянии, МПа	R_{QD}	GSI	E_m , МПа
ИГЭ-4(0.9-5.8м), - структурные элементы представлены различными видами мергеля, преобладающего зеленоватого цвета с серым оттенком, тяжелый, плотный	X_n	29.2	24	17	182.0
	$X_a = 0.85$	28.7			179.0
	$X_a = 0.95$	28.4			177.0
ИГЭ-5(1.0-13.0м), - структурные элементы представлены различными видами алевролита, преобладающего серого цвета с серым, беловатым и бежевым оттенком, среднепрочный, плотный	X_n	45.8	26	24	963.0
	$X_a = 0.85$	45.3			952.0
	$X_a = 0.95$	45.0			946.0
ИГЭ-6(0.7-5.0м), - структурные элементы представлены различными видами алевролита, преобладающего серого цвета с серым, беловатым и бежевым оттенком, прочный	X_n	56.0	12	21	1130.0
	$X_a = 0.85$	54.0			1092.0
	$X_a = 0.95$	52.5			1068.0
ИГЭ-7 (1.3-5.1м), - структурные элементы представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, среднепрочный	X_n	18.8	63	43	754.0
	$X_a = 0.85$	18.5			745.0
	$X_a = 0.95$	18.2			742.0
ИГЭ-8 (1.5-35.2м),- структурные элементы представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, прочный	X_n	19.2	57	41	711.0
	$X_a = 0.85$	19.1			707.0
	$X_a = 0.95$	19.0			703.0
ИГЭ-9 (2.5-69.5м), - структурные элементы представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, низкопрочный	X_n	20.6	79	54	1705.0
	$X_a = 0.85$	20.4			1688.0
	$X_a = 0.95$	20.3			1680.0
ИГЭ-10 (3.7-21.3м), - структурные элементы которого представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, среднепрочный	X_n	51.2	56	40	2639.0
	$X_a = 0.85$	50.2			2588.0
	$X_a = 0.95$	49.5			2551.0

*Расчетные аналитические постоянные m_i , m_b , a и u с изменялись в доверительных интервалах 4-7, 0.37-0.80, 0.50-0.55 и 0.05-0.20

Таблица 2 - Основные входные параметры водонасыщенного состояния

Структурные элементы ИГЭ	Значение статистического показателя	σ_{ci} , прочность массива на одноосное сжатие в ненарушенном состоянии, МПа	RQD	GSI	E_m , МПа
ИГЭ-4(0.9-5.8м), - структурные элементы представлены различными видами мергеля, преобладающего зеленоватого цвета с серым оттенком, тяжелый, плотный	X_n	7.4	24	17	46.0
	$X_a = 0.85$	7.0			43.0
	$X_a = 0.95$	6.8			42.0
ИГЭ-5(1.0-13.0м), - структурные элементы представлены различными видами алевролита, преобладающего серого цвета с серым, беловатым и бежевым оттенком, среднепрочный, плотный	X_n	31.0	26	24	651.0
	$X_a = 0.85$	30.4			638.0
	$X_a = 0.95$	30.1			632.0
ИГЭ-6(0.7-5.0м), - структурные элементы представлены различными видами алевролита, преобладающего серого цвета с серым, беловатым и бежевым оттенком, прочный	X_n	52.0	12	21	1003.0
	$X_a = 0.85$	51.0			984.0
	$X_a = 0.95$	50.2			971.0
ИГЭ-7 (1.3-5.1м), - структурные элементы представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, среднепрочный	X_n	4.8	63	43	154.0
	$X_a = 0.85$	4.5			145.0
	$X_a = 0.95$	4.2			142.0
ИГЭ-8 (1.5-35.2м),- структурные элементы представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, прочный	X_n	5.6	57	41	208.0
	$X_a = 0.85$	5.5			204.0
	$X_a = 0.95$	5.4			200.0
ИГЭ-9 (2.5-69.5м), - структурные элементы представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, низкопрочный	X_n	1.7	79	54	146.0
	$X_a = 0.85$	1.6			138.0
	$X_a = 0.95$	1.5			130.0
ИГЭ-10 (3.7-21.3м), - структурные элементы которого представлены различными видами аргиллита, преобладающего серого цвета с черным оттенком, среднепрочный	X_n	34.2	56	40	1773.0
	$X_a = 0.85$	33.2			1722.0
	$X_a = 0.95$	30.0			1691.0

*Расчетные аналитические постоянные m_i , m_b , a и u с изменялись в доверительных интервалах 4-7, 0.37-0.80, 0.50-0.55 и 0.05-0.20

Второе проектное производственное правило связано с обязательным анализом геомеханических особенностей строительства и эксплуатации водозабора, который позволяет выявить возникающие воздействия и нагрузки.

Установление основополагающей связи между узловыми перемещениями и деформациями определяется вариационным исчислением метода взвешенных невязок Галеркина или с использованием метода минимизации функционала.

Нижепредставленное алгоритмическое обеспечение научно-методического обеспечения проведения расчетов в рамках численного математического моделирования процессов и параметров геомеханических процессов и геомеханической обстановки в режиме строительства изложено с учетом рационализации и минимизации проведения расчетов с базовой составляющей построения матрицы жесткости конечного элемента с упрощенной интерпретацией полученных результатов.

Целевым назначением проведения дальнейших исследований является обоснование технологии и конструктивных параметров сохранности и эксплуатационной устойчивости ствола водозабора системы водообеспечения для обеспечения равномерной нагрузки на крепь. При этом эксплуатационная сохранность и обеспечение равномерной нагрузки на крепь ствола водозабора при строительстве достигается на базе использования оптимизационной модели цифрового типа (метод конечных элементов), которая позволяет сравнивать и выбирать наиболее эффективные технологии и конструктивные параметры сохранности и эксплуатационной устойчивости подземных сооружений при новом строительстве.

Оптимизационная модель Хоука-Брауна в области проведения геомеханических расчетов относится к классу моделей, построенных на реализации процедур конечно-элементной аппроксимации и анализа. Ее предпочтительность по сравнению с идеально упругопластической моделью Кулона-Мора обусловлена более точными результатами совпадения конечных результирующих данных математического моделирования по сравнению с экспериментальными опытными данными.

Построение конечно-элементной модели выполняется с учетом **третьего проектного производственного правила**, предусматривающего выявление особенностей рельефа, геометрических размеров вертикального шахтного ствола и поэтапности проходки.

Точность решения МКЭ (а в отдельных случаях и сама возможность нахождения сходящегося решения) зависит от применяемого алгоритма решения. В ПВК *ZSoil* реализован алгоритм поиска решения для нелинейных задач Ньютона-Рафсона. Процедура поиска решения проиллюстрирована на рис. 4.

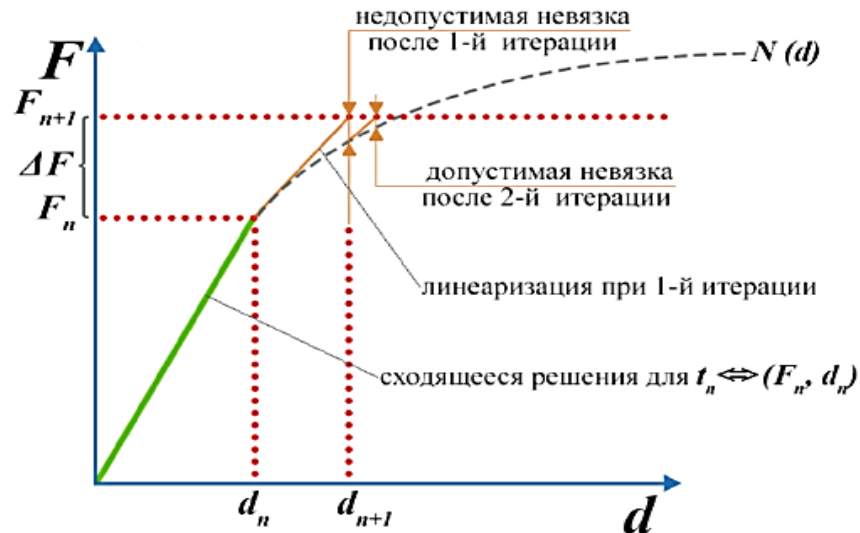


Рис. 4 – Итерационная процедура Ньютона – Рафсона

В ходе нелинейных итерационных расчетов требуется постоянно вычислять критерии перехода элементов в пластическое состояние, что отражает суть **четвертого проектного производственного правила**.

Модель Хоека-Брауна предусматривает ввод в алгоритмическое обеспечение коэффициента устойчивости, который в таком случае записывается в виде:

$$\begin{aligned} f(\sigma_1, \sigma_3) &= \sigma_1 - \sigma_3 - 1/SF \cdot \sigma_{ci} (m_b \cdot \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^a; \\ f(\sigma_1, \sigma_3) &= \sigma_1 - \sigma_3 - \square (SF^{-1})^{1/a} \square a \cdot \sigma_{ci} (m_b \cdot \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^a \end{aligned} \quad (3)$$

Следовательно, условие пластического течения используя модифицированные постоянные m_i^* и s^* принимает вид:

$$\begin{aligned} f(\sigma_1, \sigma_3) &= \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_{ci} (m_b^* \sigma_3 / \sigma_{ci} + s^*)^a; \\ m_b^* &= m_b SF^{1-a}; \quad s^* = s SF^{1-a} \end{aligned} \quad (4)$$

Критерий Ранкина (критерий максимального главного напряжения) определяется следующим выражением:

$$f(\sigma_3) = -\sigma_3 + f_t = 0, \quad (5)$$

где f_t – прочность на одноосное растяжение. Значение, которое принимает f_t должно удовлетворять условию $|f_t| < /f_t^{HB} /$, чтобы сохранить выпуклость области упругости. Использование данного критерия позволяет упростить описание разрушения и дилатансии при растяжении. Для критерия Ранкина используется стандартный метод снижения прочности:

$$f_t^* = f_t / SF \quad (6)$$

МКЭ-модель вертикального ствола водозабора из водохранилища разработана в ПВК ZSoil и представлена на рис. 5.

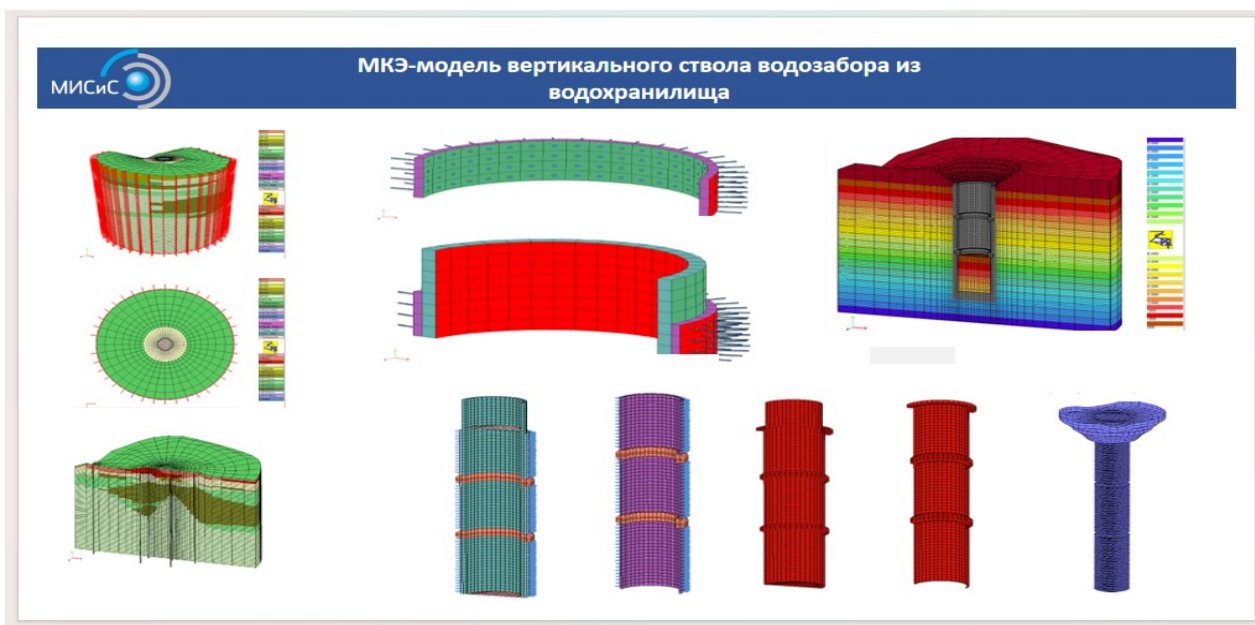


Рис.5 - Обобщенная МКЭ-модель вертикального ствола водозабора из водохранилища, разработанная в ПК *ZSoil*

В третьей главе приведены результаты аналитических численных расчетов вертикального ствола водозабора с использованием предлагаемых проектных продукционных процедур, установлена последовательность строительства и ввода в эксплуатацию шахтного водозабора, которые реализованы с учетом основного сочетания нагрузок и поэтапного возведения в рамках оптимизации проектных решений.

С учетом результатов оценки горно-геологических и горнотехнических условий объекта проектирования и строительства **горнотехнического сооружения** (топографические, климатические, геологические, гидрогеологические, сейсмичность, свойства грунтов, описание объекта строительства) вертикальный ствол водозабора выполняется в виде круглой в плане шахты. Диаметр ствола в проходке - 15,6 м, с учетом черновой обделки 14,6 м, с учетом чистовой обделки 13,0 м., протяженность ствола составляет 73,0 м.

По результатам моделирования и оптимизации приняты следующие проектные решения: - по мере проходки ствола стены шахты торкретируются бетоном В15 толщиной 50 мм для закрепления грунтовых стен и выравнивания поверхности, после чего устраивается черновая обделка толщиной 0,45 м из бетона класса по прочности на сжатие В25.

В черновую обделку заделываются балки армировки. Для повышения устойчивости черновой обделки, и чтобы предотвратить ее «сползание» устанавливаются анкеры из арматуры класса А500С диаметром 25 мм. Арматурный анкер через торкрет забуливается в горные породы и устанавливается с шагом 0,8 м по всему диаметру шахты. Крепление арматуры производится с помощью химического анкера ОКГ ТЕ 100. Поверх черновой

обделки устраивается гидроизоляция из полимочевины. Толщина стен чистовой обделки составляет 0,8 м. Максимальный уровень воды в шахте на отметке 357,300 м. Дно шахты расположено на отметке 297,950 м и выполнено из монолитного железобетона толщиной 1,0 м. Учитывая, что горные породы обводнены, то вокруг шахты производится цементация грунтов, чтобы предотвратить фильтрацию грунтовых вод в шахту в процессе строительства. Цементацией основания вместе с цементацией стен шахты создается единый замкнутый противофильтрационный контур.

Также приведены результаты численного расчета ствола водозабора с учетом этапности его возведения (аналитический расчет бетонной черновой обделки, расчет крепи на горное давление, расчет крепи на давление грунтовых вод, расчетное сочетание нагрузок, расчет анкеров), подтверждающие эксплуатационную устойчивость принятых проектных решений. Модель предусматривает реализацию 110 расчётных этапов, которые воспроизводят принятую технологическую последовательность.

Фрагменты результатов численных расчётов для расчетной пространственной модели приведены на рис.6. Результаты расчета перемещений вмещающего массива показывают, что расчетная конвергенция (сближение стенок выработки в результате разгрузки скального массива и формирования горного давления) составляет до 15 мм с каждой стороны. Расчетный выпор забоя в результате разгрузки скального массива с учетом действия объемных фильтрационных сил составляет до 33 мм.

Обоснование проектных решений выполнено с использованием диаграммы Феннера – Пахера. Ее принцип заключается в нахождении точки пересечения двух кривых: графика разгрузки массива и графика сопротивления крепи с наличием кривой, называемой в англоязычной литературе Longitudinal Displacement Profile (LDP).

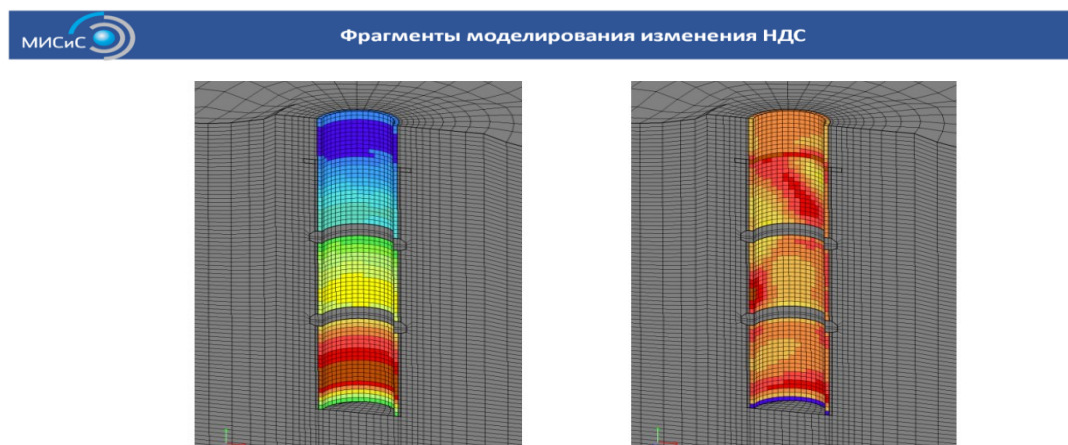


Рис. 6 – Фрагменты моделирования изменения НДС

Полученный таким образом профиль для рассчитываемого ствола изображен на рис.7. В таблицу 3 сведены итоговые данные от воздействия всех видов нагрузок на крепь ствола водозабора. Сравнение расчетных значений

напряжений с расчетными характеристиками бетона В25, показывает, что во всех случаях прочность крепи удовлетворяется. Таким образом, **условие прочности выполнено.**

Таким образом, в рамках установления критериальной прочности и эксплуатационной устойчивости с учетом предлагаемых проектных решений несущих конструкций системы крепления вертикального водозабора системы водообеспечения применительно к рассматриваемым условиям были реализованы следующие блоки проектных процедур:

Симплициальный блок проектной продукционной процедуры 1

Аналитический расчет армирования и исполнения чистовой отделки

Симплициальный блок проектной продукционной процедуры 2

Аналитический расчет бетонной черновой отделки

Симплициальный блок проектной продукционной процедуры 3

Расчет крепи на горное давление

Симплициальный блок проектной продукционной процедуры 4

Расчет крепи на давление грунтовых вод

Симплициальный блок проектной продукционной процедуры 5

Расчет системы анкерного крепления

Симплициальный блок проектной продукционной процедуры 6

Учет сейсмического воздействия

Симплициальный блок проектной продукционной процедуры 7

Расчетное сочетание нагрузок

P , МПа	u , м
0	0.0249
0.2254	0.0266
0.5975	0.0283
0.9455	0.0297

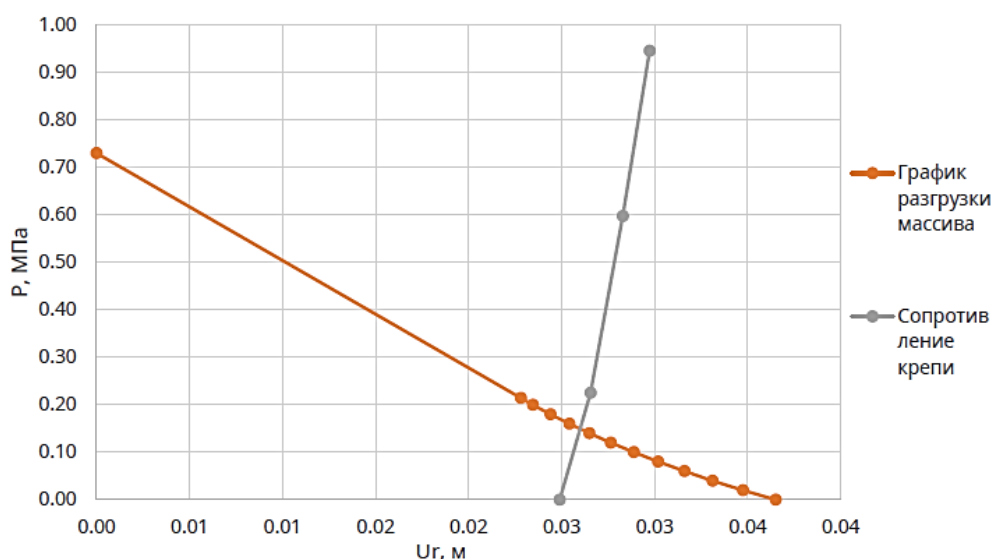


Рис. 7 – Диаграмма Феннера – Пахера

Таблица 3 - Итоговые данные от воздействия всех видов нагрузок на крепь ствола водозабора

Виды воздействий	σ_{θ}^{in} , МПа	σ_{θ}^{ex} , МПа
Горное давление	1.91	1.81
Давление от напора горных и поровых вод	8.60	7.96
Сейсмическое воздействие $\theta=0^\circ$	-0.93	1.09
Сейсмическое воздействие $\theta=90^\circ$	1.66	-0.09
Индикатор комплексного опасного воздействия	12.17	10.86
Расчетное сопротивление бетона В25	$R_b = 14,5$ $R_b \cdot \gamma_{bz} = 12.325$	
Усилия, возникающие при наиболее опасном комплексном воздействии	0.046 М, МН*м	0.587 N, МН

В четвертой главе приведены общие сведения и основные положения численного расчета обоснования проектных решений системы крепления шахтного водозабора с обеспечением эксплуатационной устойчивости с учетом проектных конструктивных решений системы водозабора на основе расчета металлоконструкций. Для проверки достаточности принятых конструктивных решений выполнен расчет конструкций в ПК Sofistik. Общий вид расчетной схемы представлен на рис. 8.

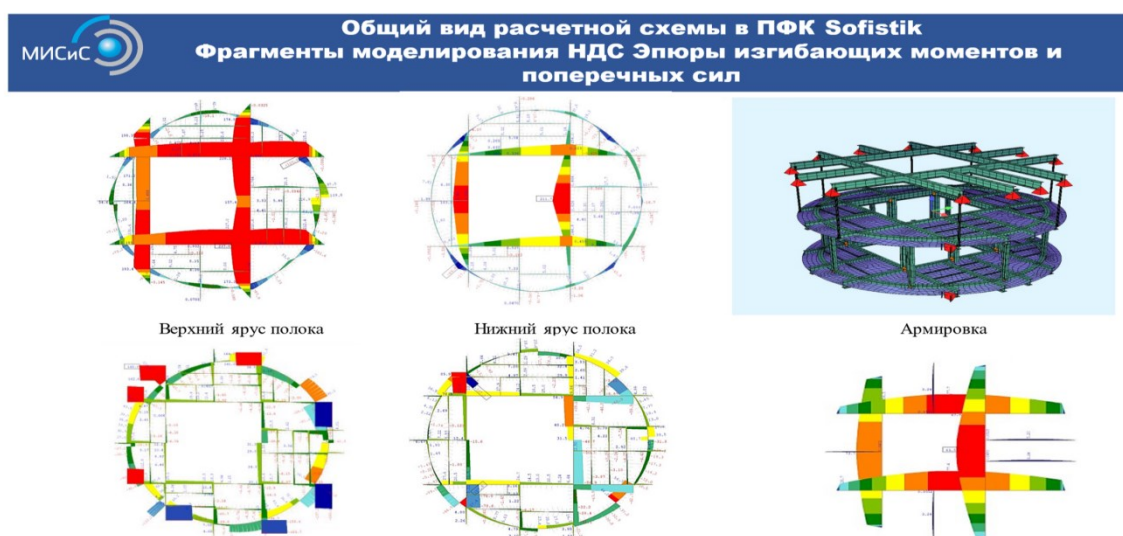


Рис. 8 – Общий вид расчетной схемы и результаты моделирования

В результате проведения расчетов выявлено, что конструкции верхнего и нижнего ярусов полока удовлетворяют требованиям СП 16.13330.2017 по двум группам предельных состояний. Максимальный коэффициент использования - 0.48.

Таким образом, можно констатировать, что при реализации заявленных проектных решений строительства системы водообеспечения (водозабор водохранилища) прочность его несущих конструкций и элементов обеспечена и они обладают соответствующими запасами с учетом несущей способности и реакции геологической среды строительства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-производственная задача, связанная с совершенствованием проектной деятельности в части разработки модельных представлений и проектных продукционных правил, позволяющих достаточно объективно и достоверно ориентироваться в методологических и методических составляющих процедуры выбора и обоснования проектных решений шахтного водозабора систем водообеспечения с рациональными параметрами. Использование конечно-элементной аппроксимации в оптимизационных процедурах в целом повышает эффективность систем поддержки принятия проектных решений и вносит значительный вклад в теорию проектирования горнотехнических систем. Основные фрагментарные результаты работы сводятся к ряду следующих:

1. На основе выполненного анализа предшествующих исследований в рамках разработки методики, проектных продукционных правил и процедур, алгоритмического обеспечения поставленной задачи с рациональными геомеханическими модельными представлениями установлено, что процесс проектирования заявленных горнотехнических систем в силу сложившихся тенденций и закономерностей отличается повышенной сложностью и риском, что обусловлено различными режимами формирования максимальных нагрузок конструкций с учетом этапности их строительства и функционирования.
2. Установлена необходимость трансформации механизма адаптации и переориентации технологических процессов строительства систем водообеспечения с использованием подземных горных работ к реакции геологической среды и максимального нивелирования геотехнологических рисков при их ведении с использованием методологических и методических особенностей метода конечных элементов.
3. На основании исходных данных выполнено расчетное обоснование проектных решений шахтного водозабора системы водообеспечения. С учетом методологии проведения исследований параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) в количественной численной постановке проектируемого ствола системы водозабора в границах черновой и чистовой обделок, определяются с учетом их нелинейности (работа скальных грунтов, поэтапность ведения проходческих работ и возведения несущих конструкций и элементов обделки, работа в области контакта бетон-скальный массив и пр.) Численное моделирование выполнено с использованием сертифицированных программно-вычислительных комплексов.
4. В ходе нелинейных итерационных расчетов требуется постоянно вычислять критерии перехода элементов в пластическое состояние. В целях минимизации объема вычислений и сокращения многократных итераций, связанных с преобразованием величин смещений, конвергенции и напряжений в масштабах глобальной и локальной системой координат в рамках расчетной модели и отдельных конечных элементов, рациональным является ввод в расчетную систему отдельной инвариантной составляющей, которая

обеспечивает их неизменность и независимость в рамках используемой системы координат.

Итерации расчетной системы предусматривали соответствующую детализацию и уточнение используемых расчетных характеристик и параметров вмещающего массива скального типа в рамках оптимизационной модели Хоека-Брауна, в частности параметра RQD (задействовались данные эксплуатационного бурения и фотографии ко конкретным кернов) с учетом водонасыщенного и естественного состояний.

5. В результате моделирования выявлено, что бетон должен соответствовать требованиям ГОСТ 26633-2015. Класс бетона определен расчетом на прочность конструкций шахты от действующих нагрузок. Марка бетона по водонепроницаемости принята для защиты конструкций от коррозии. Для армирования железобетонных конструкций необходимо использовать арматуру класса А500С. Класс арматуры принят в соответствии с требованиями СП 63.13330.2018 и с учетом требований СП 28.13330.2017 и СП 14.13330.2018. Вся применяемая арматура должна соответствовать требованиям ГОСТ 34028-2016.

Всего выделено 110 расчетных этапов поэтапного возведения.

6. Выполнены расчеты аналитического плана по обеспечению эксплуатационной устойчивости бетонной черновой обделки. Реализованы все необходимые итерации аналитического расчета перемещений и смещений контуров вмещающего вертикальный ствол водозабора массива. Конечные итерации расчетов убедительно доказывают их соответствующую критериальную прочность и эксплуатационную устойчивость в рамках предлагаемых несущих конструкций применительно к условиям водохранилища. Расчетные количественные значения конвергенции стенок выработки по ее периметру в результате приложения возникающих нагрузок и последующей разгрузки вмещающего массива не превышают 15 мм.

Таким образом, подтверждается достаточный уровень устойчивости несущих конструкций горнотехнического сооружения (системы водозабора из водохранилища). Требуемая толщина бетонной обделки при этом должна составлять не менее 800 мм с силовым наполнением арматурой 16-А500С и наличием двух опорных венцов из быстротвердеющего бетона В30.

7. Для проверки достаточности принятых конструктивных решений выполнен расчет конструкций в ПК Sofistik. Граничные условия в расчетной схеме заданы в соответствии с фактической работой конструкций и свойствами применяемых конечных элементов. На основании выполненных расчетов установлено, что принятые конструктивные решения удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов. Максимальный коэффициент использования элементов несущих конструкций равен 0.64.

Публикации автора

Основные публикации по специальности 2.8.7:

1. Борисов Б.Б., Фролова А.Ю., Искандяров А.С. Цифровое моделирование футеровки скипов рудничных подъемных установок // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2025 — №5 (специальный выпуск 9). - с. 18-29.

2. Борисов Б.Б., Агафонов В.В. Обоснование проектных решений при строительстве горнотехнических сооружений в рамках конечно-элементной аппроксимации // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025 – № 35 – С. 90-95.

3. Борисов Б.Б., Козлова О.Ю., Агафонов В.В. Анализ и выбор проектных технологических платформ при возведении горнотехнических конструкций систем водообеспечения // Горная промышленность. – 2026 – № 1 – С. 44-48.

4. Борисов Б.Б., Агафонов В.В., Герасимов Е.Н., Козлова О.Ю. Синтез проектных вариантов с использованием итерационного метода в перемещениях со спецификой физической нелинейности работы вмещающих грунтов и строительных конструкций горнотехнического сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2026 — №5 (специальный выпуск 9). - с. 18-29.

5. Борисов Б.Б., Агафонов В.В., Козлова О.Ю. Оценка технологичности и природно-техногенной специфики проектирования и строительства горнотехнических конструкций // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026 – № 37 – С. 90-95.

Публикации в материалах международной конференции:

6. Борисов Б.Б., Агафонов В.В. Система поддержки принятия проектных решений и оптимизационная модель при строительстве горнотехнических конструкций систем водообеспечения. Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Материалы XXXVIII международной научно-практической конференции, Bengaluru, India, 19–20 января 2026 года. – Bengaluru, India: Pothi.com, 2026. – С. 90-94.

Личный вклад автора в заявленных публикациях:

- автором выполнен комплекс работ, включающих обоснование, формулирование цели и задач исследований, выбраны и обоснованы методики проведения исследований, проанализированы и оценены методы комплексного обоснования и проектирования функциональных структур систем водообеспечения, выполнена оценка методов, механизмов и инструментария проектирования, разработана концепция, научно-методические и системотехнические принципы, которые позволяют сформировать соответствующие адаптационные способности к изменениям внутренней и внешней сред строительства и функционирования, повышающих их технико-экономическую эффективность, разработана соответствующая методика, обоснованы закономерности формирования функциональных структур систем водообеспечения с учетом инноваций в этой проблематичной области, позволяющих объективно структурировать сложившиеся взаимосвязи между элементами и факторами проектирования и эксплуатации с учетом динамической составляющей, корректно сформулировать защищаемые научные положения и выводы.