

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В РАМКАХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Агафонов В.В., Борисов Б.Б.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

Ключевые слова: горнотехнические конструкции, конечно-элементный анализ, аппроксимация, системы водообеспечения, шахтный водозабор, геомеханические модели, численное моделирование.

Аннотация. Субконцептуальными составляющими 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 системы водообеспечения, которые в своей функциональной структуре имеют водозаборы шахтного типа и участок недр, где ведется их строительство, заявляются технологические платформы с соответствующим методологическим и методическим обеспечением. В основу обеспечения закладываются научно-методические принципы, проектные производственные процедуры с обязательным проведением ряда изысканий инженерно-геологического плана, которые в комплексе позволяют реализовать блок-схему алгоритма численного моделирования геомеханических представлений в области шахтного водозабора. Параметры напряженно-деформированного состояния в количественной численной постановке проектируемого ствола системы водозабора в границах черновой и чистовой обделок рационально определять с использованием соответствующих процедур математического моделирования в объемах проектируемой системы, включающей обязательные конечные элементы «вмещающий скальный массив – несущие элементы и конструкции вертикального шахтного ствола водозабора» в рамках методологии конечно-элементного анализа с привлечением программно-ориентированного и сертифицированного в рамках РФ вычислительного комплекса ZSoil. Приоритет заявленного подхода позволяет нивелировать до приемлемого уровня проявления различного рода аварийных ситуаций как на стадии строительства, так и на стадии устойчивой эксплуатации.

JUSTIFICATION OF DESIGN SOLUTIONS IN THE CONSTRUCTION OF MINING CONSTRUCTIONS WITHIN THE FRAMEWORK OF FINITE ELEMENT APPROXIMATION

Agafonov V.V., Borisov B.B.

National Research Technological University "MISIS", Moscow

Keywords: mining structures, finite element analysis, approximation, water supply systems, mine water intake, geomechanical models, numerical modeling.

Abstract. Subconceptual components of the generally accepted concept, which is stated in the process of designing spatial planning, technological and constructive solutions for various types of underground structures, which, with a certain degree of specificity, include water supply systems, which in their functional structure have mine-type water intakes and a subsurface area where they are being built, technological platforms with appropriate methodological and methodological support. The software is based on scientific and methodological principles, design production procedures with the mandatory conduct of a number of surveys of the engineering and geological plan, which together make it possible to implement a flowchart algorithm for numerical modeling of geomechanical representations in the field of mine water intake. The parameters of the stress-strain state in the quantitative numerical formulation of the projected shaft of the intake system within the boundaries of the roughing and finishing lining should be rationally determined using appropriate mathematical modeling procedures in the volumes of the projected system, which includes the mandatory final elements "enclosing rock mass – bearing elements and structures of the vertical shaft of the intake" within the framework of the methodology of finite element analysis involving software-oriented and the ZSoil computing complex certified within the framework of the Russian Federation. The priority of the stated approach makes it possible to level out the manifestations of various kinds of emergency situations both at the construction stage and at the stage of sustainable operation to an acceptable level.

Введение. 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 [1, 2].

Материалы и методы исследований. В результате проведения и обобщения исследований 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 (МКЭ) [3-5].

Процессы деформирования вмещающих массивов с различными степенями прочности протекают в большинстве случаев в соответствии с их конкретной структурой, и в меньшей степени обусловлены физико-механическими свойствами области ненарушенных участков массива. В связи с этим для повышения объективности и достоверности проведения геомеханических исследований требуется пересчет основных свойств массива, полученных лабораторным путем с учетом его структурных особенностей. Для реализации этой процедуры в данной работе используется модель разрушения грунтового массива Хоека-Брауна [6]. Все итерации расчетов рационально реализовывать в 3D-постановке с учетом двухфазной фильтрационной объемной составляющей приложения сил и 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.). КЭ-модель вертикального шахтного ствола водозабора из водохранилища разработана в ПВК ZSoil. Модель имеет круглую форму в плане со сгущением конечно-элементной сетки к центру. Поверхность модели построена по топографическим данным и воспроизводит рельеф (рис. 1). В рамках реализации программного модуля встроенной функции ZSoil колонки скважин в рамках инженерно-геологических элементов (ИГЭ) заданы с реализацией процедуры пространственной аппроксимации и использованием метода кригинга [7, 8] (рис. 2).

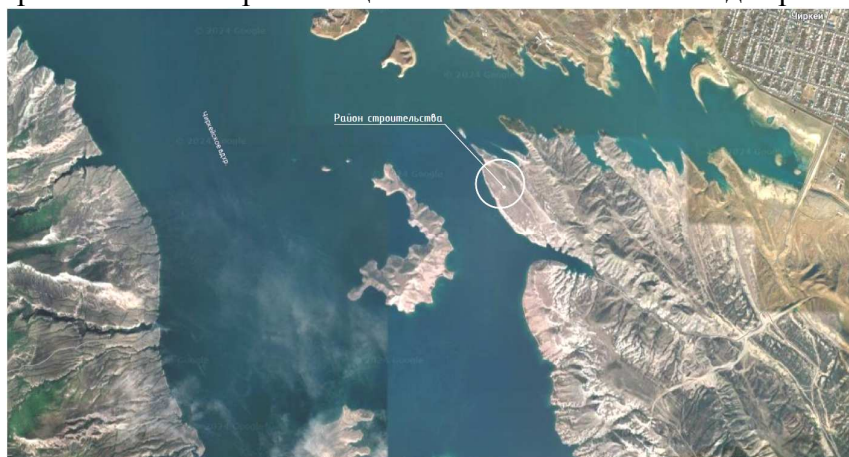


Рис. 1. Топографические особенности объекта проектирования

Проведенное аналитическое обобщение геомеханических особенностей района проектирования, строительства и эксплуатации водозабора позволило выявить следующие возникающие воздействия и нагрузки.

1. Давление, связанное с собственным весом используемых несущих элементов и конструкций водозабора и вмещающего скального грунтового массива с обязательным учетом составляющих горного давления. Первая составляющая вводится в заложенном в вычислительный комплекс автоматическом режиме, вторая составляющая (горное давление) воспроизводится в итоге реализации процедур поэтапного моделирования проходческих

работ с итерационным шагом в 1,05 м (высота технологического яруса заходки при этом составляет 4,2 м) с учетом всех необходимых геометрических пространственных размеров, физико-механических свойств вмещающих пород и технологических платформ возведения черновой и чистовой обделок. В этой связи, реализованы все необходимые итерации аналитического расчета эксплуатационных характеристик бетонной обделки в черновом исполнении с учетом возникающих напряжений в результате горного давления с учетом усиливающей дополнительной системы крепления с наличием анкеров.

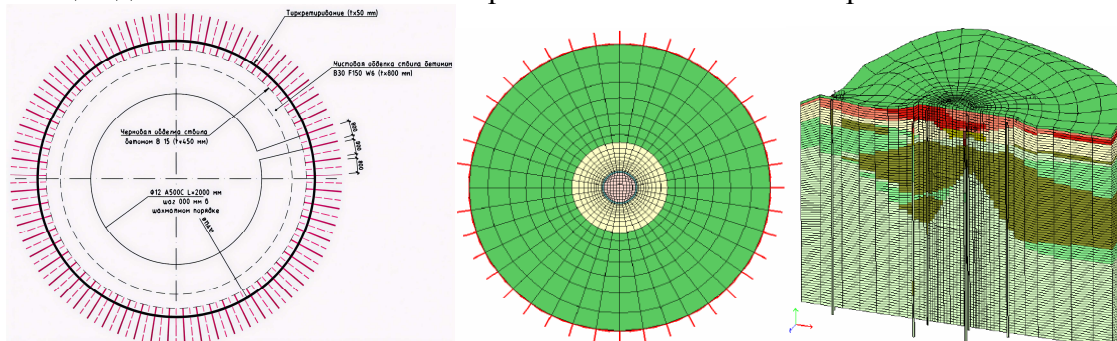


Рис. 2. Модель конечно-элементного анализа с учетом пространственной аппроксимации и использованием метода кригинга

2. Второй составляющей, участвующей во всех расчетных процедурах является давление, связанное с наличием грунтовых вод в литологических составляющих геологических элементов скального массива с учетом фильтрационных сил объемного характера, возникающее в забое по всему периметру шахты в процессе ее углубления. Уровень грунтовых вод, который необходим для проведения расчетов в объемах вмещающего скального массива, определяется на основе и в рамках хода уровня водохранилища, которое характеризуется большим сезонным перепадом с достижением отметки в 42,3 м. Численные расчеты реализуются в рамках связанной задачи стационарной объемной фильтрации и граничных условий дренажа грунтовых вод на линии поверхности проходческого забоя. Расчетная схема представляет собой многослойное кольцо, нагруженное эквивалентными напряжениями, приложенными на бесконечность. На этом этапе важно получить расчетные количественные значения выпора забоя с учетом составляющих воздействия и фильтрационных сил объемного характера. Жесткостные характеристики противофильтрационной завесы рассчитываются в предположении заполнения трещин и пустот массива цементным раствором. При этом учитывается тот факт, что неоднородность строения инженерно-геологических элементов используемых в конечно-элементной модели предопределяет неравномерность интервала распределения смещений, конвергенции и напряжений.

3. Конкретные параметры давления водных масс при заполненном стволе в режиме эксплуатации, которые оказывают непосредственное влияние на контакт соприкосновения с поверхностью несущих конструкций. Объёмные фильтрационные силы в основании учитываются автоматически путем решения сопряженной задачи фильтрации, – при этом активируются граничные условия дренажа, как показано на рисунке 3.

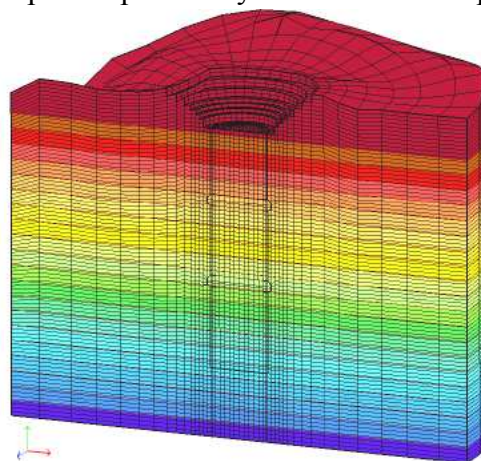


Рис. 3. КЭ-аппроксимация дренажных КЭ по высоте ствола и поровое давление в грунте на 7 этапе вскрытия котлована

Результаты. С учетом этого, выполнены расчеты аналитического плана по обеспечению эксплуатационной устойчивости бетонной черновой обделки и ее анкерной системы крепления с учетом действующих нагрузок. 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.

Результаты были получены в графической форме, а именно:

- перемещения вмещающего массива (рис. 4);
- напряжения и внутренние усилия в бетонной черновой обделке в строительный период по мере ее возведения верху вниз;
- внутренние усилия в железобетонной чистовой обделке в строительный период по мере ее возведения снизу вверх и далее в период эксплуатации при полностью осушенном и полностью заполненном стволе водозабора.

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.

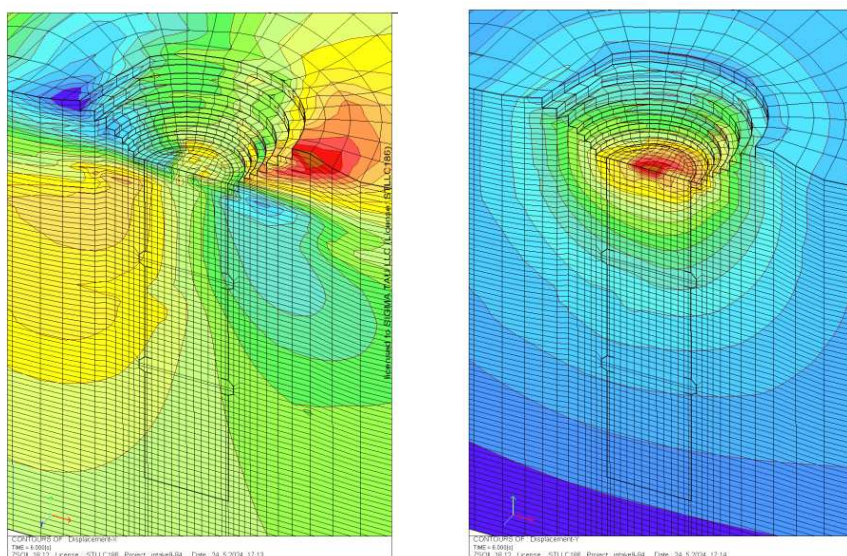


Рис. 4. Этап 6 – Перемещения вмещающего массива с учетом поэтапного возведения (горизонтальные и вертикальные смещения вмещающего массива)

Численные расчеты дополнялись использованием комплекса Sofistik [9] (рис. 5).

Пространственная конечно-элементная модель формировалась в соответствии с проектной документацией. Граничные условия в расчетной схеме заданы в соответствии с фактической работой конструкций и свойствами применяемых конечных элементов [10].

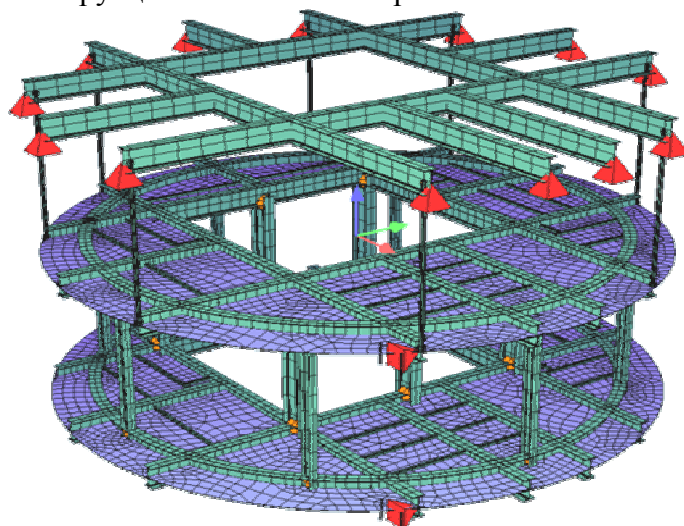


Рис. 5. Общий вид расчетной схемы

Выводы. На основании выполненных расчетов установлено, что принятые проектные конструктивные решения удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов. Максимальный коэффициент использования элементов несущих конструкций равен 0,62 и они обладают соответствующими запасами с учетом несущей способности и реакции геологической среды строительства.

Заключение. 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. Решение в рамках разработанного научно-методического обеспечения поставленной научно-практической задачи позволяет существенно расширить границы формирования должного уровня промышленно-экологической безопасности и эксплуатационной надежности проектных решений систем водообеспечения в современных условиях недропользования.

Список литературы

1. Шакура Е.И., Кудина Е.Ф. Групповые водозаборы подземных вод // Водоснабжение, химия и прикладная экология: труды Международной научно-практической конференции. – Гомель: УО «Белорусский государственный университет транспорта», 2022. – С. 149-151.
2. Чупин В.Р. Современное состояние, перспективы и пути развития систем водоснабжения и водоотведения, методы их расчета, построения и организации эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2023. – Т. 13, №2(45). – С. 359-368.
3. Арсеньев И.Д. Численное моделирование реакции геологической среды для различных вариаций вариантов строительства подземных сооружений // Уголь. – 2024. – №12(1187). – С. 127-130. – DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-127-130.
4. Алексеев Е.В., Викулина В.Б., Викулин П.Д. Основы моделирования систем водоснабжения и водоотведения. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2015. – 128 с.
5. Федченко И.В. Методы расчета и моделирования состояния водовода // Проблемы развития предприятий: теория и практика: сборник статей X Международной научно-практической конференции. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 618-622.
6. Горбунова Н.Н. Об особенностях поведения массива горных пород при рассмотрении модели Хоека-Брауна // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №4(125). – С. 62-66.
7. Власов М.А., Простов С.М., Соколов М.В. Выбор рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружения в ПК PLAXIS 3D // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – №5(159). – С. 4-14. – DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-4-14.
8. Ержаковский Е.О., Сурсанов Д.Н. Анализ современных методов расчета грунтового основания // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2019. – Т. 2. – С. 27-33.
9. Цветкова П.Ю. Сравнительный анализ программного обеспечения для решения геотехнических задач // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education: XLI International scientific and practical conference. – Boston, USA: PROBLEMS OF SCIENCE, 2018. – С. 34-36.
10. Козлов В.В., Агафонов В.В. Обоснование метода математического моделирования для расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Уголь. – 2017. – №3(1092). – С. 70-71. – DOI: 10.18796/0041-5790-2017-3-70-71.

References

1. Shakura E.I., Kudina E.F. Group water intakes of groundwater // Water supply, chemistry and applied ecology: proceedings of the International scientific and practical conference. – Gomel: Belarusian State University of Transport, 2022. – P. 149-151.
2. Chupin V.R. The current state, prospects and ways of development of water supply and sanitation systems, methods of their calculation, construction and organization of operation // News of universities. Investments. Construction. Real estate. 2023, vol. 13, no. 2(45), pp. 359-368.

3. Arsenyev I.D. Numerical modeling of the geological environment reaction for various variations of underground structures construction options // Coal. 2024, no. 12(1187), pp. 127-130. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-127-130.
4. Alekseev E.V., Vikulina V.B., Vikulin P.D. Fundamentals of Modeling Water Supply and Sanitation Systems. – M.: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2015. – 128 p.
5. Fedchenko I.V. Methods of Calculation and Modeling of the State of a Water Supply Line // Problems of Enterprise Development: Theory and Practice: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. – Penza: Penza State Agrarian University, 2023. – P. 618-622.
6. Gorbunova N.N. On the peculiarities of the rock mass behavior when considering the Hoyek-Brown model // Surveyor's Bulletin. 2018, no. 4(125), pp. 62-66.
7. Vlasov M.A., Prostov S.M., Sokolov M.V. Selection of rational parameters of the geomechanical model of the soil foundation of the structure in the PLAXIS 3D PC // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023, no. 5(159), pp. 4-14. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-4-14.
8. Erzhakovsky E.O., Sursanov D.N. Analysis of modern methods of calculating the soil foundation // Modern technologies in construction. Theory and practice. 2019, vol. 2, pp. 27-33.
9. Tsvetkova P.Yu. Comparative Analysis of Software for Solving Geotechnical Problems // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education: XLI International scientific and practical conference. – Boston, USA: PROBLEMS OF SCIENCE, 2018. – P. 34-36.
10. Kozlov V.V., Agafonov V.V. Justification of the Mathematical Modeling Method for Calculating the Stress-Strain State of a Rock Mass // Coal. 2017, no. 3(1092), pp. 70-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-3-70-71.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Агафонов Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехнологии освоения недр»	Agafonov Valery Vladimirovich – doctor of technical sciences, professor of the Department of geotechnology of subsurface development
Борисов Борис Борисович – аспирант agafonovfvv@yandex.ru	Borisov Boris Borisovich – postgraduate student

Получена 08.12.2025