Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.013.3 © И.Д. Арсеньев✉, 2024

UDC 622.013.3 © I.D. Arsenyev✉, 2024

НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
✉ e-mail: sps@misis.ru

National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation
✉ e-mail: sps@misis.ru

Численное моделирование реакции геологической среды для различных вариаций вариантов строительства подземных сооружений

Numerical simulation of the reaction of the geological environment for various variations of underground construction options

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-12-127-130

АРСЕНЬЕВ И.Д.
Аспирант кафедры «Строительство подземных сооружений и горных предприятий» Горного института НИТУ «МИСиС», 119049, г. Москва, Россия, e-mail: sps@misis.ru

Предложена процедура оценки реакции геологической среды с использованием численного моделирования. В моделируемой системе предлагается использование многопараметрического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) в трехмерной двухфазной (с учетом объемных фильтрационных сил) нелинейной постановке системы «вертикальный шахтный ствол водозабора – вмещающий массив». Использовалась оптимизационная модель цифрового типа в рамках лицензионного сертифицированного программно-вычислительного комплекса ZSoil с учетом физической нелинейности работы скальных грунтов по модели Хоека – Брауна, нелинейного взаимодействия по контактам «бетон – скала» и «бетон – бетон», поэтапности проходки и возведения черновой и чистовой обделок. Алгоритмическое наполнение предложенного модельного представления способно адекватно смоделировать необходимое число соответствующих итераций и позволяет с достаточным уровнем объективности и достоверности выбирать и обосновывать рациональные проектные решения и их параметры.

Ключевые слова: *горнотехническая система, система водообеспечения, метод конечных элементов, численное моделирование, оптимизационная модель, процедура оценки.*

Для цитирования: Арсеньев И.Д. Численное моделирование реакции геологической среды для различных вариаций вариантов строительства подземных сооружений // Уголь. 2024;(12):127-130. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-127-130.

Abstract

A procedure for evaluating the reaction of the geological environment using numerical modeling is proposed. In the simulated system, it is proposed to use multiparametric finite element modeling (FEM) in a three-dimensional two-phase (taking into account volumetric filtration forces) nonlinear formulation of the system "vertical shaft intake – host array". The optimization model of the digital type was used within the framework of the licensed certified ZSoil software and computing complex, taking into account the physical nonlinearity of the work of rocky soils according to the Hoek – Brown model, nonlinear interaction between the "concrete – rock" and "concrete – concrete" contacts, the phased penetration and construction

of rough and finishing workings. The algorithmic content of the proposed model representation is able to adequately simulate the required number of corresponding iterations and allows choosing and justifying rational design solutions and their parameter with a sufficient level of objectivity.

Keywords

Mining engineering system, water supply system, finite element method, numerical modeling, optimization model, evaluation procedure.

For citation

Arsenyev I.D. Numerical simulation of the reaction of the geological environment for various variations of underground construction options. *Ugol'*. 2024;(12):127-130. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-127-130.

ВВЕДЕНИЕ

Общепринятой сопутствующей концепцией при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений, к которым с полным основанием можно отнести и системы водообеспечения, обслуживающих промышленные предприятия и населенные пункты, расположенные в пересеченной местности, является обеспечение высокого уровня используемых технологических платформ, базирующихся на проектных продукционных правилах и процедурах с учетом численного моделирования реакции геологической среды. Это подразумевает разработку надежного превентивного инструментария реализации процедуры проведения геомеханических расчетов с использованием адекватных модельных представлений деформации грунтового массива [1, 2, 3, 4]. Данный подход позволяет обеспечить должный уровень эксплуатационной устойчивости подземного сооружения и нивелирования неизбежных негативных аварийных проявлений различного масштаба на стадиях строительства и эксплуатации систем водообеспечения.

Как правило, строительство таких сложных горнотехнических систем сопряжено с определенными трудностями, которые обусловлены специфичностью водотоков, и в этом случае требуются определенные нестандартные технологические решения и принципиально иные продукционные правила принятия конечных проектных конструктивных решений.

В связи с наличием определенной степени риска реализации подобных проектов, что обусловливается наличием довольно большого числа взаимоувязанных технических и технологических параметров, которые в свою очередь должны попадать в доверительный интервал перераспределения напряжений в грунтовом массиве, должны отслеживаться режимы формирования максимальных нагрузок с изменением прочностных и эксплуатационных свойств конструкций и сооружений.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Разработка сопровождающего научно-методического обеспечения при реализации технологических платформ строительства систем водообеспечения осуществлялась на базе использования математического моделирования горнотехнической системы «вертикальный шахтный ствол водозабора – вмещающий массив» с учетом сопутствующих нагрузок и этапности возведения конструкций (нагрузки и деформации в черновой обделке, чистовой обделке и опорожненном стволе водозабора в период нормальной эксплуатации при заполненном стволе водозабора) [5, 6, 7, 8].

Обоснование проектных решений строительства систем водообеспечения при этом выполнялось с помощью численного многопараметрического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) в трехмерной двухфазной (с учетом объемных фильтрационных сил) нелинейной постановке системы «вертикальный шахтный ствол водозабора – вмещающий массив», *рис.1*. Использовалась оптимизационная модель цифрового типа в рамках лицензионного сертифицированного программно-вычислительного комплекса *ZSoil* с учетом физической нелинейности работы скальных грунтов по модели Хоека – Брауна, нелинейного взаимодействия по контактам «бетон – скала» и «бетон – бетон», поэтапности проходки и возведения черновой и чистовой обделок. Численные расчеты металлоконструкций армировки и полока методом конечных элементов (МКЭ) с определением усилий в элементах, деформаций и коэффициентов использования сечений выполнялись с использованием сертифицированного программно-вычислительного комплекса *Sofistik* с учетом коэффициентов надежности по нагрузкам, по материалам, по ответственности, принятых в соответствии с действующими нормативными документами.

Продукционные правила алгоритмического обеспечения принятия проектных решений строительства системы водообеспечения включали процедуру учета соответствия несущих конструкций проектируемого вертикального шахтного ствола водозабора из водохранилища критериям прочности и устойчивости.

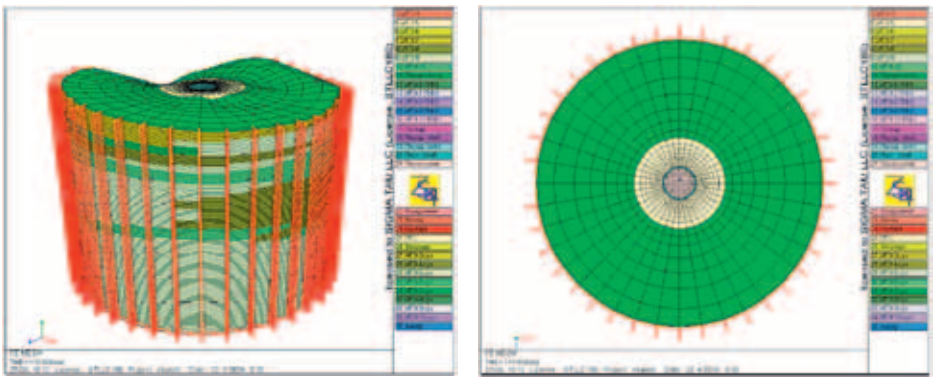

Рис. 1. МКЭ-модель в постановке «вертикальный шахтный ствол водозабора – вмещающий массив»

Fig. 1. A FEM-model in the "vertical shaft of water intake – host rock mass" formulation

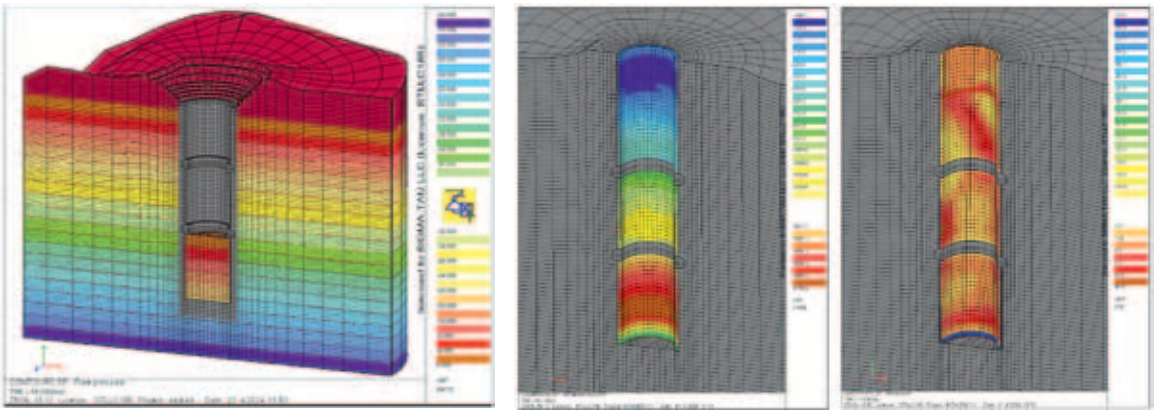

Рис. 2. Конечные фрагменты моделирования (поровое давление в грунте на этапе 59 и этапе 110 – полное возведение чистовой обделки при заполненном стволе водозабора (продольные силы и изгибающие моменты в вертикальном (кольцевом) направлении)

Fig. 2. Finite modeling fragments (soil pore pressure at stage 59 and stage 110 – complete erection of the finishing lining with the filled-up water intake shaft (longitudinal forces and bending moments in the vertical (annular) direction)

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Инженерно-геологические элементы (ИГЭ) выделены с помощью встроенной функции *ZSoil* путем задания колонок скважин и пространственной аппроксимации методом кригинга.

В плане окружность обделки разбита на 40 КЭ. В окрестности выработки характерный размер КЭ в кольцевом направлении $\pi \cdot 15{,}6/40 = 1{,}225$ м (где 15,6 м – диаметр проходки), в радиальном направлении характерный размер КЭ 1,0 м концентрически увеличивается до 7,8 м у границы модели.

Диаметр модели – 124,8 м, расстояние от обделки до границы модели – 54,6 м (3,5 диаметра выработки). В вертикальном направлении размеры КЭ определяются высотой заходки шахтного ствола, которая равна 4,2 м. Предусмотрено 4 КЭ по высоте заходки, что соответствует характерному размеру КЭ в вертикальном направлении – 1,05 м.

Модель предусматривает реализацию 110 расчетных этапов, которые воспроизводят следующую технологическую последовательность:

– разработка котлована до опорного кольца;

– устройство опорного кольца и противофильтрационной завесы (ПФЗ) по контуру выработки;

– проходка заходками по 4,2 м до нижнего опорного венца с устройством черновой обделки и опорных венцов;

– устройство ПФЗ по площади выработки;

– проходка до фундаментной плиты с устройством черновой обделки;

– возведение фундаментной плиты;

– возведение чистовой обделки до отметки опорного кольца и дна котлована;

– возведение обделки в уровне котлована;

– обратная засыпка.

Конечные фрагменты моделирования показаны на *рис. 2*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен аналитический расчет бетонной черновой обделки ствола водозабора системы водообеспечения на горное давление и ее анкерной системы крепления. Выполненные расчеты показывают, что несущие конструкции проектируемого вертикального шахтного ствола водозабора из водохранилища удовлетворяют критериям прочности и устойчивости. Основные параметры проектного решения:

– толщина черновой обделки из сочетания бетона класса B25 с торкретбетоном 50 мм должна составлять 450 мм и дополняться анкерной системой крепления с установочным шагом 800 мм с глубиной заделки 1500 мм из арматуры 16-A500C;

– чистовая обделка из бетона класса B30 толщиной 800 мм;

– два опорных венца по высоте ствола.

Список литературы • References

1. Козлов В.В., Агафонов В.В. Обоснование метода математического моделирования для расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Уголь. 2017. № 3. С. 70-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-3-70-71.
   Kozlov V.V., Agofonov V.V. Mathematic modeling method validation for rock mass stressed-strained state computation. *Ugol'.* 2017;(3): 70-71. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2017-3-70-71.
2. Имитационное моделирование функциональных структур технологических систем угледобывающих предприятий / В.В. Агафонов, Е.В. Зайцева, В.В. Яхеев и др. // Уголь. 2022. № 2 С. 57-60. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-57-60.
   Agafonov V.V., Zaitseva E.V., Yakheev V.V., Snigirev V.V., Gurkov A.A. Simulation modeling of functional structures of technological systems of mining enterprises. *Ugol'.* 2022;(2):57-60. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790– 2022-2-57-60.
3. Панкратенко А.Н., Плешко М.В., Насонов А.А. Определение напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности подземного сооружения с анкерно-бетонной крепью // Инженерный вестник Дона. 2017. Т. 46. №. 3. С. 108.
   Pankratenko A.N., Pleshko M.V., Nasonov A.A. Determination of the stress-strain state of a rock mass in the vicinity of an underground structure with anchor-concrete support. *Inzhenernyj vestnik Dona.* 2017;46(3):108. (In Russ.).
4. Иовлев Г.А., Алексеев А.В. Адаптация модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический

бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 75-87. Iovlev G.A., Alekseev A.V. Adaptation of the Hardening Soil model for engineering and geological conditions of St. Petersburg. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byullet'*. 2019;(4):75-87. (In Russ.).

5. Цюпа Д.А. Оценка влияния технологии строительства тоннельных сооружений на породы приконтурного массива с использованием метода конечных элементов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2023. №. 3. С. 426-435. Tsyupa D.A. Assessment of the impact of tunnel construction technology on the rocks of the contour massif using the finite element method. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2023;(3):426-435. (In Russ.).
6. Liu E., Lai Y. Thermo-poromechanics-based viscoplastic damage constitutive model for saturated frozen soil. *International Journal of Plasticity*. 2020;(198):102.
7. Саммаль А.С., Анциферов С.В., Павлова Н.С. Учет влияния границы раздела слоев пород при расчете подземных сооружений / Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений. Труды VI Международной конференции. 2019. С. 64-68.
8. Zhuravkov M., Ji S., Kanavalau A. Modeling of deformation processes in rock massif in the vicinity of underground goafs considering the formation of discontinuity zones. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2020;10(2):92-97.

Authors Information
Arsenyev I.D. – Postgraduate Student of the Department of Construction of Underground Structures and Mining Enterprises, Mining Institute, National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: sps@misis.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 10.10.2024
Поступила после рецензирования: 15.11.2024
Принята к публикации: 28.11.2024

Paper info
Received October 10, 2024
Reviewed November 15, 2024
Accepted November 28, 2024

Дети «Южного Кузбасса» познакомились с работой пап и мам

МЕЧЕЛ
ЮЖНЫЙ КУЗБАСС

«Южный Кузбасс» провел традиционный детский день для двадцати мальчиков и девочек в возрасте 7-14 лет. В этот раз ребята посетили Томусинское автотранспортное управление и разрез «Красногорский».

К визиту юных гостей перед административно-бытовым комбинатом Томусинского автотранспортного управления разместили «парад» автотехники. Облачившись в каски и сигнальные жилеты, ребята поднялись в салон вахтового автомобиля, сфотографировались на фоне карьерной техники, посидели в кабине БелАЗа. В процессе экскурсии мальчишки и девчонки узнали о назначении каждого автомобиля и его месте в производственной цепочке добычи угля.

Знакомство с разрезом «Красногорский» началось с прохождения электронного турникета. В актовом зале ребята рассказали о работе родителей, посмотрели фильм «О тружениках Мечела», узнали много интересного о большой семье предприятий «Мечела», а также получили возможность заглянуть в окошечко маркшейдерского теодолита и ознакомились с коллекцией минералов.

В холле предприятия экскурсантов ждали сказочные персонажи Уголек и Огонек. Они приготовили заводную эстафету с заданиями на производственные темы. Ребята в игровой форме побывали шахтёрами, водителями, спасателями, автомеханиками, электриками. Мероприятие закончилось чаепитием и вручением памятных подарков.

«В этом году это заключительная экскурсия «На работу к папе, маме!». Уже активно готовимся к следующему сезону – в обширную программу для детей и подростков вновь войдут профориентационные экскурсии, летний досуг, познавательные уроки, конкурсы с призами и подарками и многое другое», – рассказал ***управляющий директор ПАО «Южный Кузбасс» Андрей Подсмаженко.***

ПАО «Южный Кузбасс»