

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ КРЕПИ ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ

А.И. Тхориков¹, П.К. Тулин¹, И.В. Третенков¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru

Аннотация: Проведено сравнение методик оценки напряжений на контуре обделки тоннеля, возникающих в результате действий сейсмической нагрузки. Проведено сопоставление результатов расчетов напряжений по аналитической методике, представленной в СП 268.1325800.2016 «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования», и выполненных на базе моделирования по методу конечных элементов в программном комплексе Abaqus CAE. Проведено сравнение результатов действия сейсмической нагрузки на крепь горных выработок при различных методах решения данной задачи. Аналитические расчеты, выполненные в программном комплексе MathCAD, сопоставлены с результатами моделирования в программном комплексе Abaqus CAE для аналогичных горногеомеханических моделей. Расчеты, выполненные в MathCAD, отражают квазистатическую постановку, а компьютерное моделирование проведено в квазистатической и динамической постановках. Аналитические расчеты и компьютерное моделирование позволили получить напряжения в характерных точках на контуре обделки горной выработки и сопоставить их величины. Сравнение выполнено для эквивалентных условий землетрясения (9 баллов по шкале Рихтера). Рассмотрены возможные области применения разработанной горногеомеханической модели для анализа воздействия сейсмической нагрузки на крепь горной выработки в динамической постановке, проанализированы ее преимущества перед аналитическим расчетом.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние массива, сейсмостойкость, квазистатическая постановка, динамическая постановка, крепь, горная выработка, горногеомеханическая модель, поле напряжений.

Для цитирования: Тхориков А. И., Тулин П. К., Третенков И. В. Сравнительный анализ методик оценки сейсмостойкости конструкций крепи подземного сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 270–287. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_270.

Comparative analysis of methods for assessing the seismic resistance of structures of the lining of an underground structure

A.I. Tkhorikov¹, P.K. Tulin¹, I.V. Tretenkov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru

Abstract: The article compares the methods for estimating stresses on the contour of the tunnel lining, resulting from the actions of a seismic load. The results of stress calculations were

compared using the analytical method presented in SP 268.1325800.2016 «Transport facilities in seismic regions. Design Rules», and performed on the basis of finite element modeling in the Abaqus CAE software package. The paper compares the results of the action of seismic load on the lining of mine workings with different methods for solving this problem. Analytical calculations performed in the MathCAD software package are compared with the results of modeling in the Abaqus CAE software package for similar mining geomechanical models. The calculations performed in MathCAD reflect the quasi-static formulation, and computer simulations were carried out in the quasi-static and dynamic formulation. Analytical calculations and computer modeling made it possible to obtain stresses at characteristic points on the contour of the mine working lining and compare its values. The comparison is made for equivalent earthquake conditions (9 points on the Richter scale). Possible areas of application of the developed mining geomechanical model for analyzing the impact of seismic load in a dynamic formulation are considered, its advantages over analytical calculation are analyzed.

Key words: stress-strain state of the massif, seismic resistance, quasi-static setting, dynamic setting, lining, mine working, mining geomechanical model, stress field.

For citation: Tkhorikov A. I., Tulin P. K., Tretenkov I. V. Comparative analysis of methods for assessing the seismic resistance of structures of the lining of an underground structure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):270-287. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_270.

Введение

Оценка последствий землетрясения для подземных сооружений представляет собой сложную многофакторную горногеомеханическую задачу. Она требует учета множества переменных, которые могут существенно повлиять на результат решаемой задачи. Подземные сооружения могут быть подвержены различным уровням риска в зависимости от их конструкции, материалов, использованных при строительстве и горногеологических условий в месте их расположения [1].

С целью минимизации, а в идеале — предотвращения разрушений, вызванных сейсмической активностью, на сегодняшний день ведется обширная работа по разработке и внедрению разнообразных методов оценки сейсмоустойчивости. Эти методы базируются на современных научных исследованиях и учитывают множество факторов, включая интенсивность ожидаемых землетрясе-

ний, свойства грунтов (горных пород) и геологическую структуру региона [2].

На основе этих методов разрабатываются и внедряются новые технологии и строительные нормы, которые повышают уровень сейсмостойкости сооружений. Это относится не только к самим зданиям (сооружениям), но и к инфраструктуре вокруг них, такой как дороги, мосты и системы коммуникаций.

Использование современных технологий и инженерных решений в области сейсмостойкости позволяет значительно повысить уровень безопасности жизнедеятельности человека. Это особенно важно в регионах с высокой сейсмической активностью, где землетрясения могут привести к серьезным разрушениям и иным социальным последствиям. Кроме того, эти технологии предоставляют возможность защитить значимые объекты от ущерба при возникновении сейсмических опасностей. Это очень важно, поскольку многие из таких объ-

ектов имеют огромное значение для экономики и социальной стабильности общества [3].

При проектировании подземного сооружения в сейсмически опасной зоне выполнение точных и надежных расчетов конструкций на сейсмическое воздействие является законодательно нормируемым для различных областей жизнедеятельности человека [4]. Такие оценки критически важны для обеспечения безопасности и долговечности сооружения, а также для защиты людей и окружающей среды от возможных негативных последствий сейсмической активности [5].

На сегодняшний день один из основных подходов к расчетам сейсмического воздействия — это аналитический подход. Он подробно описан в методическом пособии под названием «Руководство по расчету и проектированию транспортных тоннелей для районов с повышенной сейсмичностью» [6, 7]. Этот подход основан на математических моделях и теоретических принципах, которые позволяют оценить сейсмическое воздействие на конструкции и их «отклик» на него.

Наряду с этим для оценки напряженно-деформированного состояния массива и подземных сооружений все большую популярность приобретает компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов (МКЭ). Этот метод позволяет моделировать поведение конструкции под нагрузкой, учитывая ее геометрию, свойства материалов и условия окружающей среды.

Компьютерное моделирование может быть использовано как для прогноза напряженно-деформированного состояния массива [8–10], так и для оценки влияния сейсмической нагрузки на подземные сооружения [11]. Это предоставляет конструкторам и инженерам возможность виртуально «протестировать» конструкции в различных условиях и

«сценариях», что оказывается весьма полезным при разработке и обоснованном принятии рациональных параметров проектных решений. Однако все принимаемые параметры должны соответствовать законодательно нормируемым величинам.

В рамках данной работы авторами был проведен сравнительный анализ между аналитическим решением и результатами компьютерного моделирования на основе МКЭ. Это сравнение позволило оценить рациональность и точность каждого подхода (на основании полученных напряжений в характерных точках), а также выявить их преимущества и недостатки. В каждом из подходов была оценена возможность визуализации полученных результатов и при использовании моделирования, появляется возможность получения не только единичных (максимальных) численных значений, но и площади зон развития напряжений (растяжения и сжатия по всему поперечному сечению крепи выработки и вмещающего массива). В дальнейшем, полученные результаты могут помочь улучшить методы расчета и проектирования, и в конечном итоге повысить устойчивость подземных сооружений, строящихся в сейсмически опасных районах. Они могут быть использованы и в учебном процессе при чтении различных дисциплин.

Методика и методы

Для выполнения аналитических расчетов был выбран программный комплекс MathCAD, который широко используется в профессиональной среде для решения математических задач и явного отражения расчетных формул. MathCAD обладает необходимыми инструментами для аналитических расчетов и предоставляет возможность визуализации данных [12].

Важным руководством для написания программы аналитического расчета

служило методическое пособие к СП 268.1325800.2016, в котором представлена расшифровка всех величин, используемых в ходе исследования. Это пособие подробно описывает все параметры и переменные, которые были перенесены в программный комплекс, и предоставляет подробные объяснения и инструкции по их использованию. В рамках данного программного комплекса были выполнены все необходимые для исследования расчеты по аналитической методике, фрагмент которых представлен на рис. 1. При этом в указанной методике ведется расчет нагрузок на крепь (обделку) тоннеля именно только от сейсмического воздействия. А учет гравитационного поля напряжений (либо иного исходного поля — например тектонического, в котором горизонтальная составляющая напряжений может превышать вертикальную) или иных полей напряжений (например, техногенных — влия-

ние соседних выработок) рассматривается отдельно, и указывается, что суммарная нагрузка на крепь рассчитывается на базе метода суперпозиции (сложение указанных составляющих). Полученные результаты аналитических расчетов затем сравнивались с данными, полученными при компьютерном моделировании в программном комплексе Abaqus CAE. Важной особенностью Abaqus CAE является его гибкость и возможность применения в различных областях исследований. Он способен моделировать как статические, так и динамические процессы, что позволяет его использование в областях, где требуется точное моделирование и анализ различных физических взаимодействий. Это может включать области, такие как автомобильная промышленность, аэрокосмическая промышленность, строительство, оценка горномеханических условий при строительстве горных предприятий и при ве-

Промежуточные величины	Переменные
$r := \frac{R_1}{R_0} = 0.876$	$R_0 := 5.65$
$\chi_0 := 3 - 4 \cdot \nu_0 = 1.8$	$R_1 := 4.95$
$\chi_1 := 3 - 4 \cdot \nu_1 = 2.4$	$E_0 := 700 \cdot 10^6$
$\beta := \frac{E_1 \cdot (1 + \nu_0)}{E_0 \cdot (1 + \nu_1)} = 50.87$	$E_1 := 31500 \cdot 10^6$
$\xi := \frac{\nu_0}{1 - \nu_0} = 0.429$	$\nu_0 := 0.3$
	$\nu_1 := 0.15$
	$\gamma := 26200$
	$T_0 := 0.5$
	$A := 0.4$
	$K_0 := 1$
	$K_1 := 0.25$
$d := \frac{1 - \beta}{1 + \chi_1} = -14.668$	$t := \frac{1 + \chi_0 \cdot \beta}{1 + \chi_1} = 27.225$
$s := 1 - t = -26.225$	$l := 1 - d = 15.668$
	$g := 9.81$
$Q := \sqrt[2]{\frac{1 - 2 \cdot \nu_0}{2 \cdot (1 - \nu_0)}} = 0.535$	$c_1 := \sqrt{\frac{E_0 \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1 - \nu_0}{(1 + \nu_0) \cdot (1 - 2 \cdot \nu_0)}} = 593.991$
$P := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot A \cdot K_1 \cdot K_0 \cdot \gamma \cdot c_1 \cdot T_0 = 1.238 \cdot 10^5$	

Рис. 1. Фрагмент расчета в программном комплексе MathCAD [составлено авторами]

Fig. 1. A fragment of the calculation in the MathCAD software package [compiled by the authors]

дении очистных работ и многие другие [13].

Abaqus CAE, являющийся мощным программным комплексом для проведения конечно-элементного анализа, представляет собой современный инструмент, который обладает широкими возможностями в области моделирования сложных физических процессов и взаимодействий. Этот комплекс способен обрабатывать и анализировать данные больших объемов, моделировать и визуализировать сложные геометрические формы и сложные физические взаимодействия. Это делает его мощным инструментом для инженеров-исследователей, работающих в области оценки механических процессов различных средах [14].

Важно отметить, что в случае необходимости оценки сейсмического воздействия на сложные «комплексы выработок», находящиеся в зоне «влияния выработанных пространств» значительных размеров необходимо моделировать значительные массивы горных пород (зачастую до поверхности), учитывать гравитационное поле напряжений, использовать специальные способы задания граничных условий, а при моделировании динамических задач необходимо обосновывать еще и способы задания волновых сейсмических нагрузок на разработанную модель таким образом, чтобы они не «искажали» картину распределения напряжений в рассматриваемой области и не «отражались» от границ модели, что может полностью изменить «физическую суть рассматриваемого процесса».

В данной работе не рассматриваются все указанные аспекты, а обосновывается возможность использования современных пакетов моделирования (AbaqusCAE) для решения «сравнительно простых задач» по оценке сейсмического воздействия на горные выработки.

Моделирование производится в статической постановке для сопоставления результатов с аналитическим решением, представленным в СП 268.1325800.2016. А моделирование в динамической постановке используется для определения степени расхождения результатов моделирования в упрощенной квазистатической задаче и динамического моделирования, в котором сейсмическая нагрузка задается в явном виде, путем приложения ускорений в узлах модели с частотой, соответствующей реальному землетрясению.

Необходимо отметить, что сейсмические нагрузки на объекты рассматриваемого типа обычно задаются с учетом наличия в районе определенных эпицентров землетрясений и расстояния до таких эпицентров. В зависимости от глубины заложения объекта, расстояния до эпицентра, возможной силы землетрясения, коэффициента затухания (характеризующего горно-геологическое строение региона) оценивается «энергетическая характеристика воздействия землетрясения на рассматриваемый объект». Это могут быть определенные коэффициенты, используемые в специально разработанных методиках, а может быть и «реальная запись» изменения во времени определенных величин, регистрируемых в месте заложения рассматриваемого тоннеля — например величин перемещений (сейсмограмма), скоростей (велосигграмма), ускорений (акселерограмма). Методические аспекты, используемые в данной работе, раскрываются в описании разработанной модели.

Для проведения моделирования в программном комплексе Abaqus CAE, была создана плоская горногеомеханическая модель массива горных пород, вмещающая тоннель круглого сечения. Эта модель представляла собой массив горных пород, размером 100×100 м [15]. Эти размеры были приняты, исходя из

необходимости исключения влияния граничных условий на контуре модели, на исследуемую область в зоне проведения тоннеля (размер модели в 10 раз больше диаметра тоннеля).

В центре моделируемого горного массива была построена выработка круглого сечения. Геометрические параметры выработки были выбраны с учетом исходных данных, которые были приняты в аналитическом расчете. Так, выработка была создана с внешним радиусом, который составлял 5,65 м, и внутренним радиусом, равным 4,95 м. Геометрические параметры горной выработки и толщина крепи соответствовали примеру, представленному в пособии к СП 268.1325800.2016.

Все представленные принятые решения, касающиеся геометрии модели, позволяют минимизировать в необходимой степени возможное влияние граничных условий на результаты, получаемые в процессе моделирования. Этот подход позволяет исключить искажения данных, возникающих в процессе расчета, и обеспечить необходимую степень точности результатов моделирования (см. рис. 2) [16].

Необходимым условием при разработке подобных горногеомеханических моделей является обоснованный выбор параметров модели массива горных пород (геометрия и механические свойства), в результате моделирования на котором достоверно отражаются реальные процессы, протекающие в горном массиве при сейсмическом воздействии на него. Это позволяет получить необходимую точность результатов, которые в последующем анализируются и позволяют сделать выводы, которые могут быть применены в практической деятельности.

Для моделирования в программном комплексе Abaqus CAE, были использованы следующие параметры породного массива: модуль упругости и коэффициент Пуассона. В частности, модули упругости для крепи и массива составили 31,5 ГПа и 0,7 ГПа соответственно. Кроме того, коэффициент Пуассона, который представляет собой фундаментальное свойство в изучении механического поведения материалов, также был учтен в процессе моделирования. Для крепи этот коэффициент был установлен на уровне 0,15, в то время как для массива горных пород он составил 0,3.

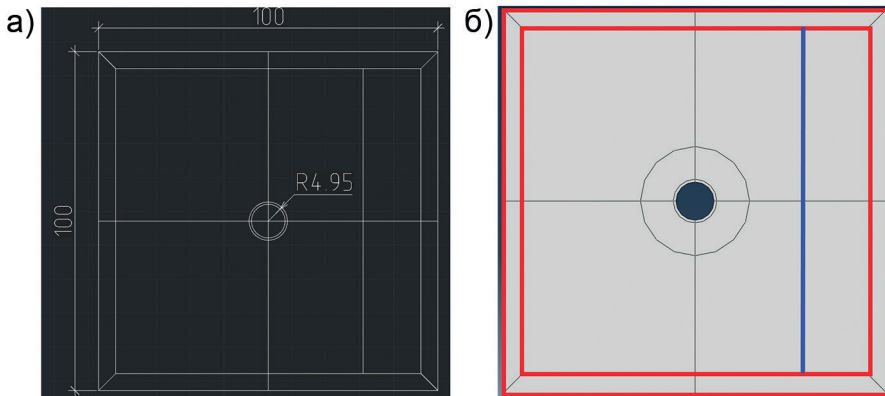


Рис. 2. Параметры модели: геометрические параметры модели (а); дополнительные геометрические построения, выполненные для разбивки сетки конечных элементов и задания граничных условий (б) [составлено авторами]

Fig. 2. Various parameters of the model: geometric dimensions of the model (a); additional geometric constructions made to split the mesh of finite elements and defining boundary conditions (b) [compiled by the authors]

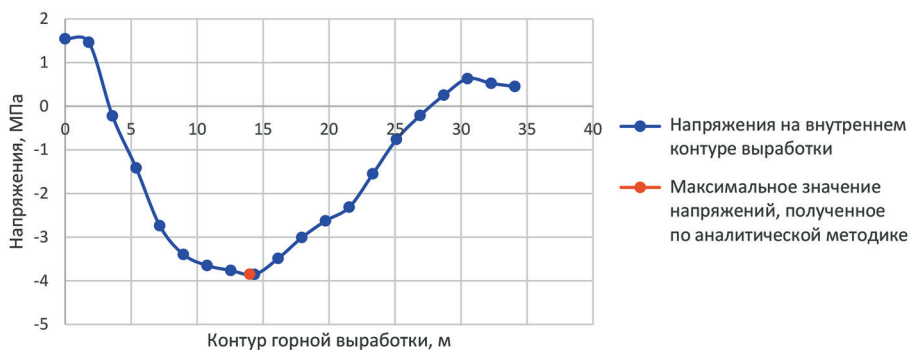


Рис. 3. Напряжения на внутреннем контуре горной выработки [составлено авторами]

Fig. 3. Finite element mesh [compiled by the authors]

Представленные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона соответствовали их значениям, использованным в примере, решенном в пособии к СП 268.1325800.2016. Также в программном комплексе был задан объемный вес грунта γ , значение которого аналогично примеру.

Помимо упомянутых выше величин, использованных в аналитическом расчете, в нем также присутствуют: T_0 — преобладающий период колебаний грунта, A — расчетной ускорение колебаний грунта в долях от силы тяжести, которое зависит от бальности землетрясения, и коэффициенты K_0 и K_1 — которые учитывают возможную величину повреждений крепи выработки и назначение сооружения. Эти параметры используются в аналитической методике для того, чтобы задать землетрясение в неявном виде. В связи с тем, что в программном комплексе Abaqus CAE землетрясение задается в явном виде, необходимости в них при моделировании нет. Также следует отметить то, что данная постановка задачи не учитывает внутренних механических потерь в грунте.

Для интерпретации результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования, была задана полярная система координат [17–20]. Это было необходимо для возможности сравнительного

анализа результатов моделирования с результатами аналитического расчета (результатами аналитического расчета являются напряжения в полярной системе координат). В комплексе Abaqus CAE были визуализированы поля нормальных радиальных и нормальных тангенциальных напряжений в характерных точках модели.

Важно отметить, что эти значения отличались от аналитических результатов на 3–5% (рис. 3). Такое небольшое отклонение подтверждает корректность и точность разработанной горногеомеханической модели в комплексе Abaqus CAE [21–23]. Это свидетельствует о высокой надежности использованных аналитических и конечно-элементных методик и подходов, что в свою очередь обеспечивает достаточную точность результатов и возможность их применения для дальнейших исследований.

На рис. 4 мы видим подробное представление сетки конечных элементов, которая использовалась в процессе моделирования. Эта сетка отличается высокой детализацией в области контакта массива горных пород и горной выработки круглого сечения, что позволяет получить достаточно достоверные результаты при компьютерном моделировании. Необходимо отметить наличие в представленной модели бесконечных элемен-

тов, которые расположены по ее краям [24]. Такие элементы играют важную роль в обеспечении точности и надежности результатов моделирования.

Бесконечные элементы представляют собой особый тип конечных элементов, который применяется при моделировании бесконечных или очень больших областей. Особенностью этих элементов является то, что при разбивке сетки они должны контактировать с границей модели [25]. Использование таких элементов является важной частью процесса моделирования, поскольку оно обеспечивает корректный учет влияния бесконечных элементов на общую картину распределения напряжений и деформаций в моделируемой области.

Это требование выполнено в нашем случае, что хорошо видно на представленных рис. 2 и 4 (область построения бесконечных элементов выделена жирной красной линией на рис. 2, б). Толщина бесконечных элементов на данной сетке соответствует условиям их использования. При несоблюдении данного условия бесконечные элементы в модели не будут работать корректно, а также есть вероятность того, что они не будут работать вовсе и расчет не будет выполнен. В целом, использование такой сетки и включение в нее бесконечных элементов позволяет достичь необходимой точности результатов моделирования, исключив влияние краевых частей модели на исследуемую область. Благодаря описанному подходу можно моделировать воздействие сейсмической нагрузки на выработку, соответствующей реальным условиям.

В ходе последующих исследований, проведенных для разработанной горно-геомеханической модели, была решена сложная и важная задача, связанная с определением напряженного деформированного состояния (НДС) массива в условиях динамической постановки. Ре-

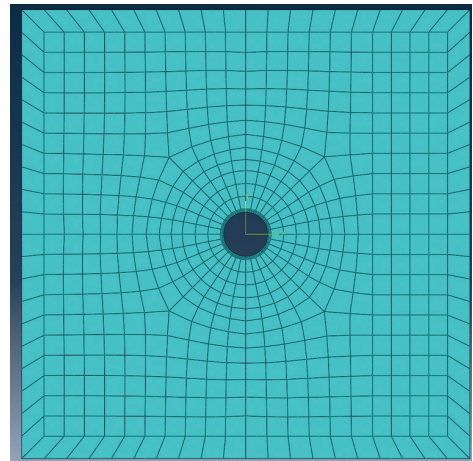


Рис. 4. Сетка конечных элементов [составлено авторами]

Fig. 4. Finite element mesh [compiled by the authors]

шение задачи в такой постановке представляет собой ключевой этап в анализе сейсмического влияния на горные выработки.

Для симуляции сейсмической нагрузки, которая является одним из основных факторов, определяющих распределение НДС в исследуемом массиве, к внутренней грани модели (синяя линия на рис. 2, б) были приложены акселерограммы реальных землетрясений [26 – 28]. Эти акселерограммы представляют собой записи ускорений, происходящих во время землетрясений, и они включают в себя все важные параметры таких событий, включая максимальное ускорение, продолжительность и частотный спектр.

Выбор акселерограмм был проведен с большой тщательностью, чтобы они как можно точнее соответствовали параметрам землетрясения, использованным в аналитическом расчете [29]. Это обеспечивает согласованность методов аналитических и конечно-элементных расчетов и позволяет получить наиболее сопоставимые результаты.

Для исключения возможного искажения результатов моделирования, которое

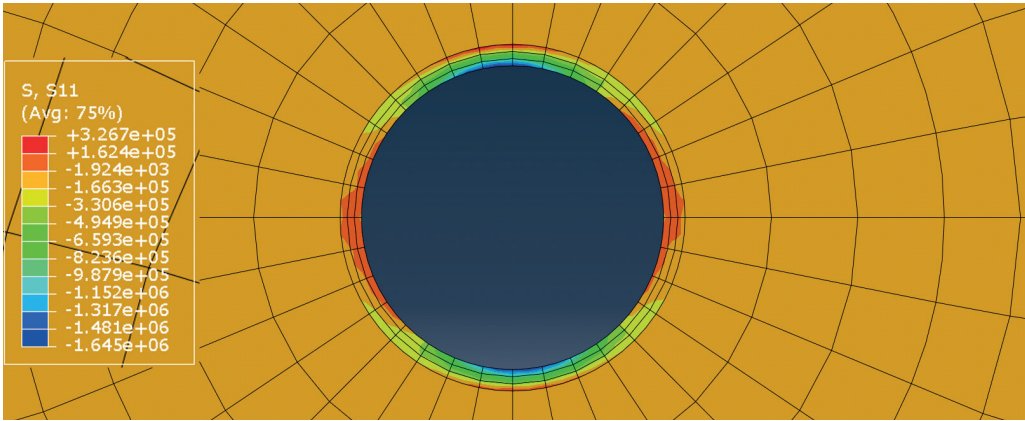


Рис. 5. Поле напряжений σ_x в декартовой системе координат [составлено авторами]
 Fig. 5. Stress field σ_x in Cartesian coordinates [compiled by the authors]

могло бы произойти из-за прохождения сейсмических волн через массив и их последующего отражения на границе, был применен специальный подход, описанный выше. По краям модели были использованы упомянутые ранее бесконечные элементы [30]. Это как раз и позволило смоделировать процесс ухода сейсмических волн далее в массив горных пород, что соответствует реальным условиям и обеспечивает корректное моделирование процесса. Использование граничных элементов исключает отражение сейсмических волн и позволяет смоделировать их прохождение через

объект исследования (горную выработку в массиве).

В результате решения этой сложной задачи в программном комплексе Abaqus CAE были получены детальные поля напряжений и перемещений (рис. 5 и 6). Эти поля были представлены полярных координатах, что облегчает анализ нормальных радиальных и нормальных тангенциальных напряжений. А представление в декартовых координатах упрощает анализ пространственного распределения тензора напряжений и вектора перемещений [31]. Такой подход обеспечивает максимально комфортную визуализа-

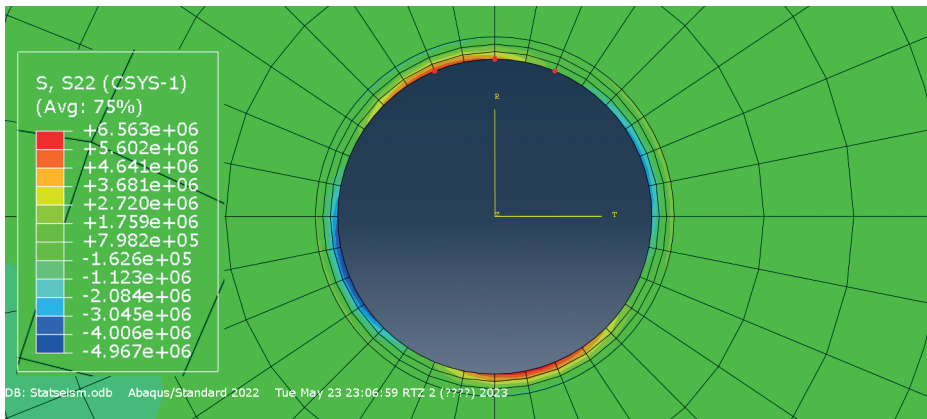


Рис. 6. Поле напряжений σ_θ в полярной системе координат [составлено авторами]
 Fig. 6. Stress field σ_θ in polar coordinates [compiled by the authors]

цию результатов моделирования процессов, происходящих в массиве во время действия сейсмической нагрузки.

Сопоставление результатов решения задачи в динамической и статической постановке

Методика моделирования с использованием метода конечных элементов в динамической постановке представляет собой весьма эффективный подход, позволяющий определить распределение напряжений в крепи выработки на протяжении всего времени действия сейсмической нагрузки. Этот период, составляющий 140 с, значительно превышает возможности анализа методик, используемых в статической постановке (в статической постановке возможно исключительно рассмотрение состояния модели в какой-то конкретный момент времени — квазистатическая постановка).

Согласно методикам, представленным в СП 268.1325800.2016, можно вычислить только максимальные значения напряжений на внешнем и внутреннем контуре крепи выработки, исходя из принятых параметров землетрясения. Моделирование в динамической постановке (задание граничных условий в виде ак-

селерограмм землетрясения (рис. 7) позволяет получить более информативные результаты об изменениях напряжений в любой момент времени с учетом отражения и наложения волн, и, в частности, выделить максимальные значения напряжений в крепи выработки.

В рамках проведенного исследования было выполнено сопоставление результатов для точек с наибольшими значениями напряжений на внутреннем и внешнем контуре крепи выработки. Этот аспект был учтен при сравнении двух подходов: динамического и статического [32, 33].

Применение динамического моделирования позволило выявить зоны с максимальными напряжениями. В этих зонах были построены графики, отражающие изменение величины напряжений в течение всего периода действия акселерограммы (см. рис. 8 и 9). На основе этих графиков были определены максимальные значения сжимающих и растягивающих напряжений для внешнего и внутреннего контура крепи выработки.

Интересно отметить, что, как видно из представленных графиков, напряжения в выбранных точках массива колеблются от $-6,2$ МПа (сжатие) до $5,9$ МПа

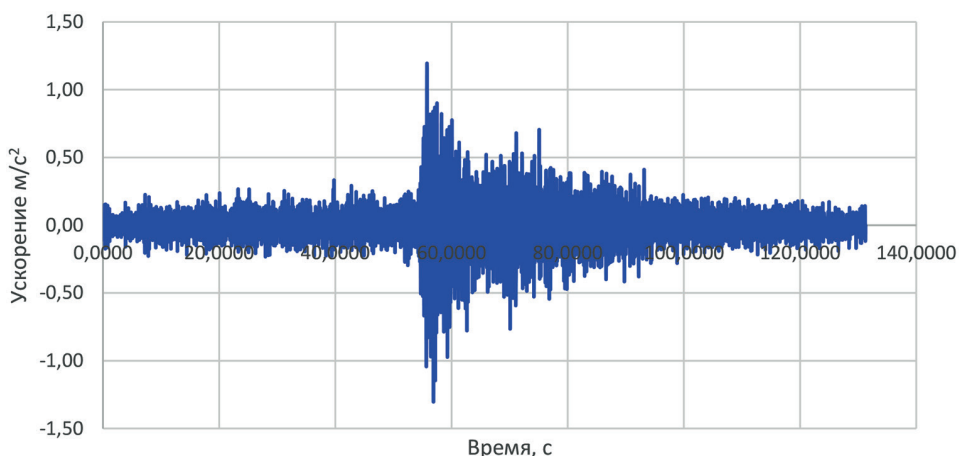


Рис. 7. Акселерограмма, использованная при моделировании [составлено авторами]

Fig. 7. Accelerogram used in simulation [compiled by the authors]

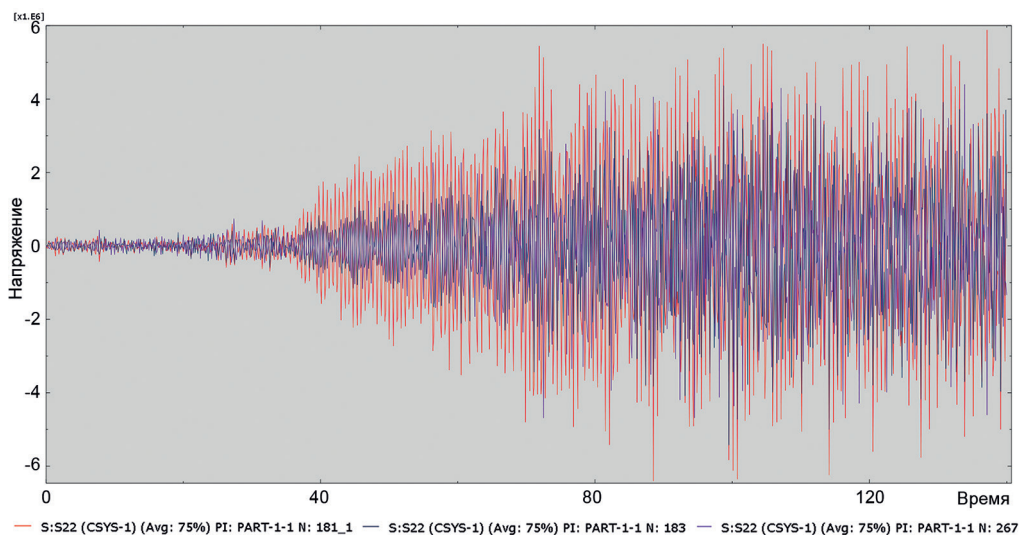


Рис. 8. Значения напряжений σ_θ в 3-х точках на внутреннем контуре крепи выработки [составлено авторами]

Fig. 8. Stress values σ_θ at 3 points on the inner contour of the working support [compiled by the authors]

(растяжение) с периодом, измеряемым долями секунды. Полученные значения соответствуют представлению механических процессов, данные о которых получают в результате натуральных наблюдений.

Согласно проведенному анализу, значения максимальных сжимающих и растягивающих напряжений на внешнем контуре крепи оказались в два раза ниже, чем на внутреннем контуре. Это говорит о том, что динамика напряжений, кото-

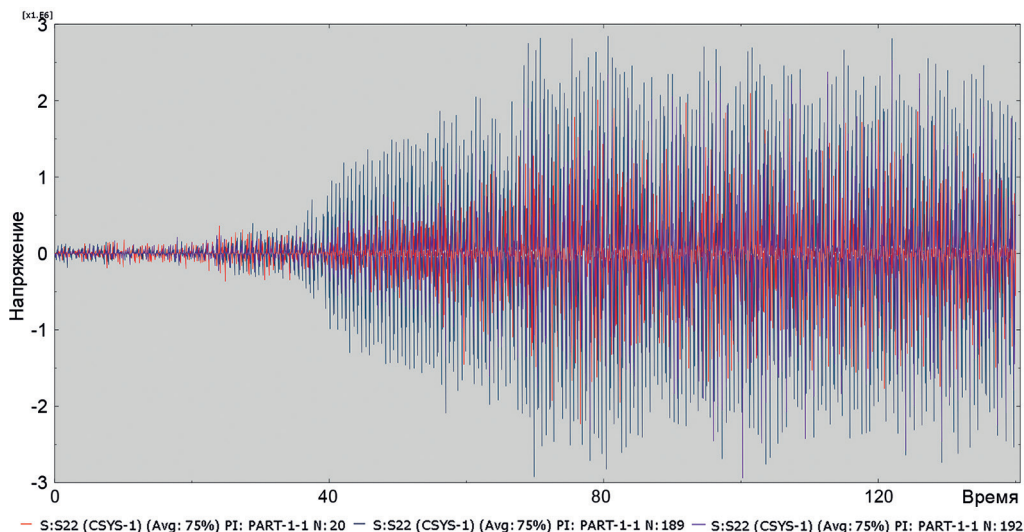


Рис. 9. Значения напряжений σ_θ в 3-х точках на внешнем контуре крепи выработки [составлено авторами]

Fig. 9. Stress values σ_θ at 3 points on the outer contour of the working support [compiled by the authors]

Величины напряжений, полученные различными методами [составлено авторами]
Stress values obtained by various methods [compiled by the authors]

Расчетный параметр	Значения напряжений, полученных по аналитической методике, МПа	Значения напряжений, полученных путем конечно-элементного динамического моделирования, МПа
Максимальные сжимающие напряжения на внутреннем контуре крепи выработки	-3,57	-6,2
Максимальные растягивающие напряжения на внутреннем контуре крепи выработки	1,68	5,9
Максимальные сжимающие напряжения на внешнем контуре крепи выработки	-1,69	-2,9
Максимальные растягивающие напряжения на внешнем контуре крепи выработки	0,017	2,8

рые испытывает крепь выработки, существенно различается по периметру данной крепи в зависимости от направления прихода сейсмической волны и результатов ее отражения.

Порядок величины напряжений, полученных при аналитическом расчете, совпадает с порядком величины напряжений, полученных при моделировании. Это подтверждает корректность используемых методик и подходов. Однако, стоит отметить, что значения напряжений, полученных при динамическом моделировании, оказались в несколько раз выше, чем значения, полученные при аналитическом расчете.

Это может объясняться тем, что моделирование в динамической постановке позволяет учесть динамическую составляющую приходящей нагрузки и взаимодействия различных факторов, влияющих на формирование напряженно-деформированного состояния горного массива. Аналитический расчет, в свою очередь, основан на упрощенных представлениях о горногеологической среде и сейсмическом воздействии, что может привести к недооценке реальных напряжений. Это подчеркивает важность использования комплексных подходов к анализу устойчивости горных массивов, включая и динамическое моделирование.

Заключение

Анализ результатов, полученных и приведенных в таблице, подтверждает, что использование аналитического метода расчета не обеспечивает необходимой для исследователя детализации распределения напряжений, которые реализуются в массиве и крепи под воздействием сейсмической активности. Хотя общий порядок величин напряжений, выявленных при помощи аналитического и конечно-элементного расчетов, демонстрирует схожесть, числовые значения этих напряжений различаются в 2–3,5 раза в определенных условиях. Это свидетельствует о том, что метод конечно-элементного моделирования в динамической интерпретации позволяет более детально анализировать параметры процессов, протекающих в реальном массиве горных пород при сейсмическом воздействии [34–35].

Конечно-элементное моделирование, кроме того, предоставляет возможность учета специфических особенностей каждого конкретного землетрясения, так как параметры его можно задать прямым образом с использованием акселерограммы, форму которой может сконструировать сам исследователь. Это отличает конечно-элементное моделирование от аналитических методов, где параметры

землетрясения выражаются через динамические коэффициенты. При использовании компьютерного моделирования у исследователя есть возможность применять значительно более широкий спектр параметров, которые можно использовать и задавать в модели [34, 35]. Более того, результаты моделирования предоставляют более обширные возможности для анализа напряженно-деформированного состояния горного массива, для оценки целостности и устойчивости как самой крепи, так и всего комплекса окружающих пород.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что для изучения воздействия сейсмической нагрузки на крепь в контексте исследовательских задач использование конечно-элементного моделирования является более предпочтительным подходом в сравнении с аналитическим методом. Это обусловлено большей точностью такого моделирования, его способностью учесть необходимое количество факторов и параметров, а также его гибкостью и возможностью визуализации более широкого спектра параметров НДС для анализа.

Согласно полученным результатам исследования, мы можем сделать определенные выводы о применении аналитических методов. Эти методы, которые в настоящее время заложены во все нормативные документы, могут быть пересмотрены и скорректированы на основании результатов компьютерного моделирования. Это может быть выпол-

нено в различных сценариях и ситуациях, в зависимости от конкретных потребностей и целей исследования.

Однако, необходимо подчеркнуть, что любая подобная корректировка должна быть строго обоснована и подкреплена проверкой достоверности получаемых результатов компьютерного моделирования. Это значит, что данные, полученные в результате компьютерного моделирования, должны быть сопоставлены и коррелированы с данными натурных исследований, которые проводятся на специально оборудованных стендах или в действующих подземных сооружениях.

Важным аспектом этого процесса является постановка и решение специальных научных задач, которые помогают уточнить и улучшить процедуру сопоставления данных и валидации результатов, полученных по различным методикам.

При обосновании параметров для крупных и особо ответственных сооружений, компьютерное моделирование становится не просто полезным инструментом, но и обязательной составляющей всего комплекса горногеомеханических исследований. При обосновании безопасных параметров таких сооружений, компьютерное моделирование играет ключевую роль, обеспечивая более точные и достоверные результаты, которые могут быть использованы для повышения безопасности и надежности сооружений. Таким образом, его значимость и важность в этом процессе не может быть недооценена или проигнорирована.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорман И. Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей. — М.: ТИМР, 2000. — 307 с.
2. Амосин Б. З., Булычев Н. С., Оловянный А. Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. — М.: Недра, 1974. — 320 с.
3. Linzer L. M., Hildyard M. W., Wesseloo J. Complexities of underground mining seismic sources // Philosophical Transactions of The Royal Society. A Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2021, vol. 379, no. 2196. DOI: 10.1098/rsta.2020.0134.

4. *Jing-Qi H., Xiu-Li D., Mi Zhao, Xu Zhao* Impact of incident angles of earthquake shear (S) waves on 3-D non-linear seismic responses of long lined tunnels // *Engineering Geology*. 2017, vol. 222, pp. 168–185. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.03.017.

5. *Фотиева Н. Н., Саммаль А. С., Булычев Н. С.* Расчет тоннельных обделок переменной толщины на сейсмические воздействия с учетом влияния земной поверхности // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2004. — № 12. — С. 192–195.

6. *Третенков И. В., Лукьянов В. Г.* Устойчивость горных выработок. — Томск: Издательский Дом Томского гос. ун-та, 2015. — 132 с.

7. *Литвинский Г. Г., Смекалин Е. С., Кладко В. И.* Методика оценки и критерии устойчивости горных выработок // *Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»*. — 2020. — № 19. — С. 5–14.

8. *Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А.* Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (теории и заблуждения). — М.: МГСУ, 2014. — 192 с.

9. *Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G.* Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field // *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109–122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.

10. *Вербило П. Э., Вильнер М. А.* Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 6-2. — С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47.

11. *Вербило П. Э., Иовлев Г. А., Петров Н. Е., Павленко Г. Д.* Применение технологий информационного моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 6-2. — С. 60–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_60.

12. *Trushko V., Protosenya A., Verbilo P.* Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite-nephelinic ores // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, vol. 13, no. 8, pp. 2864–2872.

13. *Morozov K. V., Shabarov A. N., Kuranov A. D., Belyakov N. A., Zuev B. Y., Vlasenko D. S., Bakhtin E. V.* Geodynamic monitoring and its maintenance using modeling by numerical and similar materials methods // *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 129, no. 5, article 01012. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901012.

14. *Protosenya A. G., Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A.* Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and megalopolises // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019, no. 5, vol. 9, pp. 1005–1014.

15. *Господариков А. П., Зацепин М. А.* Математическое моделирование прикладных задач механики горных пород и массивов // *Записки Горного института*. — 2014. — Т. 207. — С. 217–221.

16. *Komolov V., Belikov A., Demenkov P.* Research on load-bearing constructions behavior during pit excavation under «slurry wall» protection // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022, vol. 180, pp. 313–323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_29.

17. *Карасев М. А., Тиен Тай Нгуен* Метод прогноза напряженного состояния обделки подземных сооружений квазипрямоугольной и арочной форм // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 257. — С. 807–821. DOI: 10.31897/PMI.2022.17.

18. *Карасев М. А., Сотников Р. О.* Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // *Записки Горного института*. — 2021. — Т. 251. — С. 626–639. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2

19. *Mkrtychev O., Sidorov D., Bulushev S.* Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength // *MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 117, article 00123. DOI: 10.1051/matecconf/201711700123.

20. Трушко О. В. Виды и конструкции сейсмостойких крепей, применяемых при разработке рудных месторождений // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2016. — № 1. — С. 120–130.

21. Nguen T. T., Karasev M. A. Numerical investigation of the horseshoe tunnels structural behavior // Indian Geotechnical Journal. 2022, no. 52, pp. 799–814.

22. Trushko O. V., Potemkin D. A., Popov M. G. Ensuring sustainability of mining workings in development of ore deposits in complex geological conditions // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018, vol. 7, no. 13, pp. 2594–2601.

23. Demenkov P. A., Goldobina L. A., Trushko O. V. Geotechnical barrier options with changed geometric parameters // International Journal of GEOMATE. 2020, vol. 19, no. 75, pp. 58–65.

24. Господариков А. П., Трофимов А. В., Киркин А. П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 539–548. DOI: 10.31897/PMI.2022.87.

25. Протосеня А. Г., Иовлев Г. А. Прогноз напряженно-деформируемого состояния в окрестности подземного сооружения в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 2. — С. 215–228.

26. Protosenya A. G., Karasev M. A., Ockurov V. I. Introduction of the method of finite-discrete elements into the Abaqus/Explicit software complex for modeling deformation and fracture of rocks // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2017, vol. 6, no. 7, pp. 11–18. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.116692.

27. Карасев М. А., Петрушин В. В., Рысин А. И. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 4. — С. 48–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

28. Karasev M. A., Nguen T. T., Do N. A., Dang V. K. Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering. 2020, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

29. Karasev M. A., Nguen T. T., Vilner M. A. Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, vol. 62, pp. 383–388.

30. Protosenya A. G., Karasev M. A., Verbilo P. E. The prediction of elastic-plastic state of the soil mass near the tunnel with taking into account its strength anisotropy // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017, vol. 11, no. 8, pp. 682–694.

31. Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 33–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.

32. Bagautdinov I. I., Kuranov A. D., Belyakov N. A., Streshnev A. A. The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite-nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state // E3S Web of Conferences. 2018, no. 56, article 01019. DOI: 10.1051/e3sconf/20185601019.

33. Протосеня А. Г., Карасев М. А., Беляков Н. А. Упруго-пластическая задача для выработок различных форм поперечных сечений при условии предельного равновесия Кулона // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 1. — С. 71–81.

34. Деменков П. А., Беляков Н. А., Очкуров В. И. Прогноз безопасной зоны влияния строительства полузаглубленных подземных сооружений на окружающую среду // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2017. — № 4. — С. 311–324.

35. Иовлев Г. А., Протосеня А. Г. Прогноз напряженно-деформируемого состояния в окрестности подземного сооружения в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 2. — С. 215–228. **УДК**

REFERENCES

1. Dorman I. Ya. *Seysmostoykost' transportnykh tonneley* [Seismic resistance of transport tunnels], Moscow, TIMR, 2000, 307 p.
2. Amusin B. Z., Bulychev N. S., Olovyanny A. G. *Raschet krep'i kapital'nykh gornykh vyrabotok* [Calculation of the lining of capital mine workings], Moscow, Nedra, 1974, 320 p.
3. Linzer L. M., Hildyard M. W., Wesseloo J. Complexities of underground mining seismic sources. *Philosophical Transactions of The Royal Society. A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2021, vol. 379, no. 2196. DOI: 10.1098/rsta.2020.0134.
4. Jing-Qi H., Xiu-Li D., Mi Zhao, Xu Zhao Impact of incident angles of earthquake shear (S) waves on 3-D non-linear seismic responses of long lined tunnels. *Engineering Geology*. 2017, vol. 222, pp. 168 – 185. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.03.017.
5. Fotieva N. N., Sammal' A.S., Bulychev N. S. Calculation of tunnel linings of variable thickness for seismic effects, taking into account the influence of the earth's surface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 12, pp. 192 – 195. [In Russ].
6. Tretenkov I. V., Luk'yanov V. G. *Ustoychivost' gornykh vyrabotok* [Stability of mine workings], Tomsk, 2015, 132 p.
7. Litvinsky G. G., Smekalin E. S., Kladko V. I. Evaluation methodology and criteria for the stability of mine workings. *Collection of Scientific Papers of DonSTU*. 2020, no. 19, pp. 5 – 14. [In Russ].
8. Mkrttychev O. V., Dzhinchelashvili G. A. *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seysmostoykosti (teorii i zabluzhdeniya)* [Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic resistance (theories and delusions)], Moscow, MGSU, 2014, 192 p.
9. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornikthis*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109 – 122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.
10. Verbilo P. E., Vilner M. A. Study of strength anisotropy and scale effect of a fractured rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 47 – 59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47.
11. Verbilo P. E., Iovlev G. A., Petrov N. E., Pavlenko G. D. Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 60 – 79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_60.
12. Trushko V., Protosenya A., Verbilo P. Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite-nephelinic ores. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, vol. 13, no. 8, pp. 2864 – 2872.
13. Morozov K. V., Shabarov A. N., Kuranov A. D., Belyakov N. A., Zuev B. Y., Vlasenko D. S., Bakhtin E. V. Geodynamic monitoring and its maintenance using modeling by numerical and similar materials methods. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 129, no. 5, article 01012. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901012.
14. Protosenya A. G., Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and megalopolises. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019, no. 5, vol. 9, pp. 1005 – 1014.
15. Gospodarikov A. P., Zatsepin M. A. Mathematical modeling of applied problems of mechanics of rocks and massifs. *Journal of Mining Institute*. 2014, vol. 207, pp. 217 – 221. [In Russ].
16. Komolov V., Belikov A., Demenkov P. Research on load-bearing constructions behavior during pit excavation under «slurry wall» protection. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022, vol. 180, pp. 313 – 323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_29.
17. Karasev M. A., Tien Tai Nguyen. Method for predicting the stress state of the lining of underground structures of quasi-rectangular and arched shapes. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 807 – 821. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.17.

18. Karasev M. A., Sotnikov R. O. Forecast of the stress state of the sprayed-concrete lining under multiple seismic impact. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 626–639. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2
19. Mkrtichev O., Sidorov D., Bulushev S. Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength. *MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 117, article 00123. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123.
20. Trushko O. V. Types and designs of earthquake-resistant supports used in the development of ore deposits. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2016, no. 1, pp. 120–130. [In Russ].
21. Nguen T. T., Karasev M. A. Numerical investigation of the horseshoe tunnels structural behavior. *Indian Geotechnical Journal*. 2022, no. 52, pp. 799–814.
22. Trushko O. V., Potemkin D. A., Popov M. G. Ensuring sustainability of mining workings in development of ore deposits in complex geological conditions. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, vol. 7, no. 13, pp. 2594–2601.
23. Demenkov P. A., Goldobina L. A., Trushko O. V. Geotechnical barrier options with changed geometric parameters. *International Journal of GEOMATE*. 2020, vol. 19, no. 75, pp. 58–65.
24. Gospodarikov A. P., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Evaluation of the deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 539–548. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.87.
25. Protosenya A. G., Iovlev G. A. Prediction of the stress-strain state in the vicinity of an underground structure in non-linearly deformable soil massifs. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 2, pp. 215–228. [In Russ].
26. Protosenya A. G., Karasev M. A., Ockurov V. I. Introduction of the method of finite-discrete elements into the Abaqus/Explicit software complex for modeling deformation and fracture of rocks. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 6, no. 7, pp. 11–18. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.116692.
27. Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 48–66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.
28. Karasev M. A., Nguen T. T., Do N. A., Dang V. K. Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*. 2020, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.
29. Karasev M. A., Nguen T. T., Vilner M. A. Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, vol. 62, pp. 383–388.
30. Protosenya A. G., Karasev M. A., Verbilo P. E. The prediction of elastic-plastic state of the soil mass near the tunnel with taking into account its strength anisotropy. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017, vol. 11, no. 8, pp. 682–694.
31. Belyakov N. A., Belikov A. A. Forecast of the integrity of the water-protective strata at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 33–46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.
32. Bagautdinov I. I., Kuranov A. D., Belyakov N. A., Streshnev A. A. The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite-nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state. *E3S Web of Conferences*. 2018, no. 56, article 01019. DOI: 10.1051/e3sconf/20185601019.
33. Protosenya, M. A. Karasev, and N. A. Belyakov, Elastic-plastic problem for workings of different forms of cross-sections under condition of Coulomb limit equilibrium. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016, no. 1, pp. 71–81. [In Russ].

34. Demenkov P. A., Belyakov N. A., Ochkurov V. I. Forecast of a safe zone of influence of the construction of semi-buried underground structures on the environment. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2017, no. 4, pp. 311 – 324. [In Russ].

35. Iovlev G. A., Protosenya A. G. Prediction of the stress-strain state in the vicinity of an underground structure in non-linearly deformable soil massifs. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 2, pp. 215 – 228. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тхориков Андрей Игоревич¹ — канд. техн. наук,

e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0404-5690,

Тулин Павел Кириллович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Tulin_PK@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0820-4759,

Третенков Игорь Викторович¹ — канд. геол.-минерал. наук,

доцент, e-mail: Tretenkov_IV@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1104-8080,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Тхориков А.И., e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.I. Tkhorikov¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor

e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0404-5690,

P.K. Tulin¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: Tulin_PK@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0820-4759,

I.V. Tretenkov¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),

Assistant Professor,

e-mail: Tretenkov_IV@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1104-8080,

¹ Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A.I. Tkhorikov, e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru

Получена редакцией 01.07.2023; получена после рецензии 09.08.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 01.07.2023; received after the review 09.08.2023; accepted for printing 10.08.2023.

