

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СБОРНОЙ ОБДЕЛКИ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЛИНИСТЫХ ФОРМАЦИЯХ С УЧЁТОМ ВОЗМОЖНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Беляков Н.А., Мовчан Е.И.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: хранилище радиоактивных отходов, напряжённно-деформированное состояние, сборная обделка, сейсмическое воздействие, квазистатический расчёт, динамический расчёт, демпфирование, контактное взаимодействие

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена ростом производимых промышленностью объемов радиоактивных отходов и необходимостью обеспечения долговременной безопасности объектов подземного захоронения радиоактивных отходов. Целью работы является оценка несущей способности сборной блочной обделки тоннеля, расположенного в инженерно-геологическом элементе, представленном протерозойскими глинами, при воздействии землетрясения интенсивностью 7, 8, 9 баллов. Для этого разработана методика численного моделирования с применением квазистатического и динамического подходов. Научная новизна заключается в комплексной оценке влияния ключевых факторов формирования напряжённно-деформированного состояния обделки: учёт контактного взаимодействия между вмещающим породным массивом и обделкой, между отдельными секциями обделки, учёт демпфирования породного массива. По результатам расчётов были сделаны выводы о том, что учёт контактного взаимодействия и демпфирования грунта существенно повышает достоверность результатов, приближая динамический расчёт к квазистатическому. Выявлены аналитические зависимости приращений напряжений в критических узлах обделки от балльности сейсмического воздействия и разработан общий алгоритм решения задачи оценки сейсмостойкости обделки хранилища радиоактивных отходов.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR FORECASTING THE STRESS-STRAIN STATE OF A PREFABRICATED LINING IN A RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL SITE WITHIN CLAY FORMATIONS, ACCOUNTING FOR SEISMIC IMPACT

Belyakov N.A., Movchan E.I.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: radioactive waste repository, stress-strain state, prefabricated lining, seismic impact, quasi-static calculation, dynamic calculation, damping, contact interaction.

Abstract. The relevance of the study is driven by the increasing volumes of radioactive waste generated by industry and the necessity to ensure the long-term safety of underground radioactive waste disposal facilities. The aim of the work is to assess the bearing capacity of a prefabricated block tunnel lining located in an engineering-geological element represented by Proterozoic clays under the impact of earthquakes with intensities of 7, 8, and 9 points. For this purpose, a numerical modeling methodology using quasi-static and dynamic approaches has been developed. The scientific novelty lies in a comprehensive assessment of the influence of key factors shaping the lining's stress-strain state: accounting for contact interaction between the host rock mass and the lining, between individual lining segments, and accounting for damping of the rock mass. Based on the calculation results, it was concluded that accounting for both contact interaction and soil damping significantly increases the reliability of the results, bringing the dynamic calculation closer to the quasi-static one. Analytical dependencies of stress increments in the critical nodes of the lining on the intensity of the seismic impact were identified, and a general algorithm for solving the problem of assessing the seismic stability of the radioactive waste repository lining was developed.

Введение

В настоящее время вопрос утилизации и хранения радиоактивных отходов (РАО) является одним из ключевых. Это можно объяснить увеличением объёма ядерной энергетики, а также распространением использования радиоизотопов в медицине, промышленности. На сегодняшний день в результате работы производственных предприятий атомной

промышленности на территории Российской Федерации накоплено радиоактивных отходов около 500 млн. м³ [1].

По своей природе радиоактивные отходы являются материалом, который содержит радиоактивные изотопы, и отличаются длительным периодом полураспада, а также могут негативно влиять на состояние окружающей среды и здоровья человека. РАО могут стать причиной радиационного загрязнения, последствия которого можно характеризовать, как долгосрочными и необратимыми, что создаёт необходимость в формировании упорядоченной системы управления отходами [2].

Хранение радиоактивных отходов представляет собой сложный процесс, связанный с рядом технических и экологических рисков. Поэтому грамотное проектирование и расчет обделок являются необходимыми этапами обеспечения безопасности всего комплекса работ по сооружению и эксплуатации подземных объектов подобного назначения [3].

Рассматривая аспект классифицирования инженерных барьеров безопасности (ИББ), прежде всего необходимо ориентироваться на последние достижения науки и техники в области создания ИББ и передовые решения по реализованным проектам приповерхностных захоронений радиоактивных отходов (ППЗРО) [4].

Рассматривая различные типы ППЗРО, выделим следующие: наземные; полузаглубленные; подземные.

Наземные ППЗРО размещаются на уровне земной поверхности, что ограничивает поступление подземных грунтовых вод в зону захоронения РАО. Это становится возможным благодаря исключению инфильтрации осадков через верхний покрывающий экран и капиллярное поднятие грунтовых вод через нижний подстилающий экран. Данная конструкция широко применяется на территории Франции, Бельгии, Испании, Литве [4]. К плюсам такой концепции в первую очередь относят менее жёсткие требования к геологии участка, в отличие от двух других конструкций. Минусы рассматриваемого сооружения заключается в необходимости учёта значительного влияния сезонных колебаний температур,

Полузаглубленная конструкция подразумевает размещение контейнеров с радиоактивными отходами на некоторой глубине (в районе нескольких метров). Применение таких систем целесообразно, когда в геологической обстановке на рассматриваемом полигоне присутствуют грунты с низкой или хорошей водопроницаемостью. В большинстве случаев такое решение может быть использовано в районе с глинистыми грунтами, которые обладают хорошими изоляционными свойствами.

Так в практике отечественной компании АО «РАОПРОЕКТ» был реализован план захоронения РАО 3-4 классов в ЗАТО Северск. Безопасность такого хранилища обеспечивается за счёт последовательной реализации концепции глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров, которые препятствуют распространению радиоактивных веществ в природную окружающую среду (рис. 1).

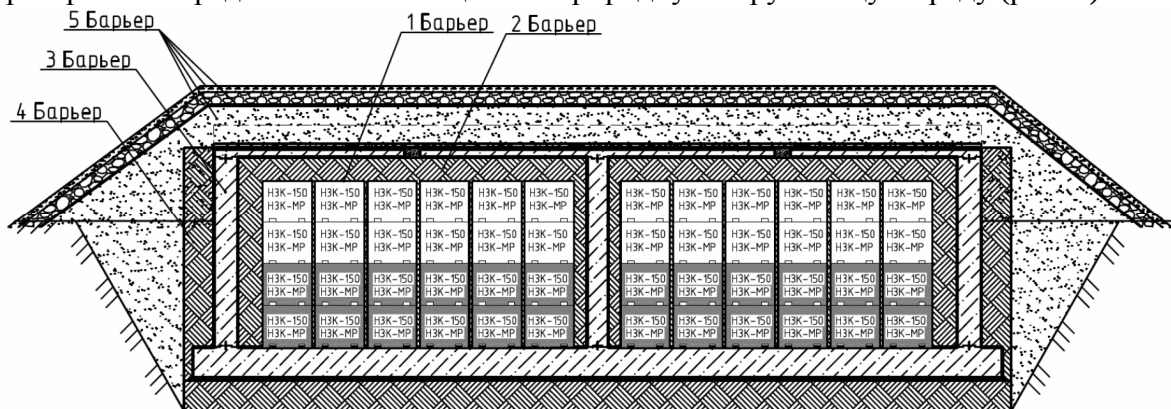


Рис. 1. Конструкция барьеров защитного покрывающего экрана: 1 барьер – стенки контейнеров, 2 барьер – глинопоршок марки СБМК, служащий в качестве буферного материала в течении, как минимум, 300 лет, 3 барьер – бетонные стены и перекрытия, 4 барьер – глиняный замок из мягкой жирной глины, распределённый по стенкам и дну сооружения, 5 барьер – покрывающий кран [5]

Методика расчёта обделки ПЗРАО на сейсмические нагрузки

Формулировка задачи

Для осуществления расчёта обделки ПЗРАО на сейсмические нагрузки зададимся типовой глубиной заложения равной 60 м. Породный массив представлен протерозойскими глинами, которые имеют форму толщи маловлажных глинистых пород с наличием тонких прослоек сцементированного тонкозернистого песка. По структуре это слоистая разность, ориентированная в горизонтальном направлении, и только на границе с четвертичными отложениями имеет перемятую структуру [9].

Протерозойские глины относятся к разряду пылеватых алевролитовых глин и, согласно классификации В.Д. Ломтадзе, плотность данных горных пород варьируется в диапазоне от 2,08 до 2,25 кг/м³. Согласно лабораторным исследованиям, для расчёта принимаем модуль деформации равным 610 МПа, а коэффициент поперечной деформации – 0,3 [10].

В качестве обделки тоннеля, в котором планируется расположить контейнеры невозвратного типа с РАО, была выбрана блочная обделка, разжатая в породе 5БНЛ-10, которая состоит из 8 секций 5БН-10 и двух лотковых блоков 5БЛ-10. Обделка изготовлена из бетона класса В25. Соединение блоков в обделке выполнено стальными шпильками диаметром 38 мм, длиной 200 мм из Ст. 30 (рис. 3).

Проверка прочности ранее описанной обделки производится при сейсмическом воздействии интенсивностью 7, 8 и 9 баллов, которое формируется через набор акселерограмм, сгенерированных и отредактированных с помощью программных пакетов GOSS и DeepSoil (рис. 4).

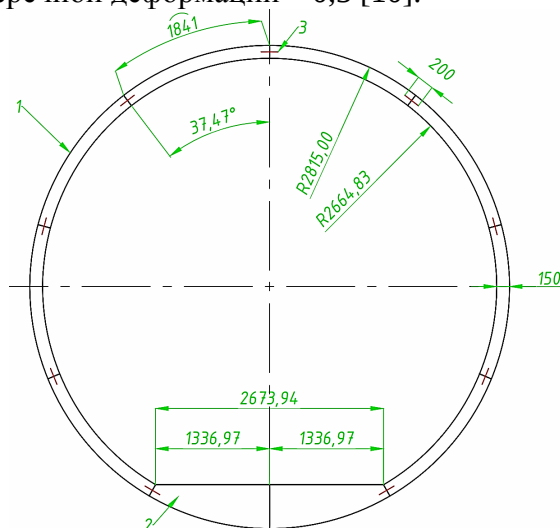
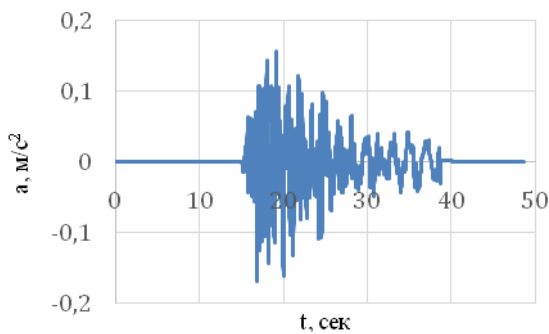
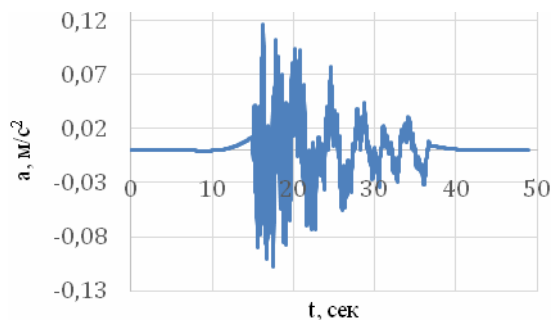


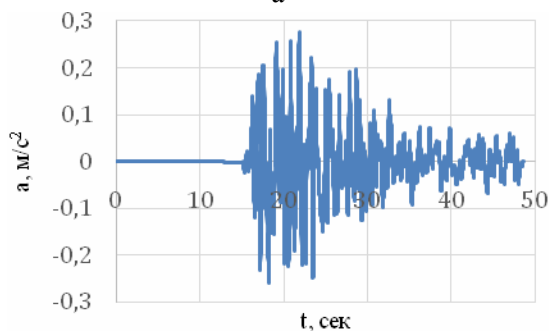
Рис. 3. Схема обделки тоннеля: 1 – сегмент обделки 5БН-10, 2 – лотковый блок 5БЛ-10; 3 – металлическая шпилька



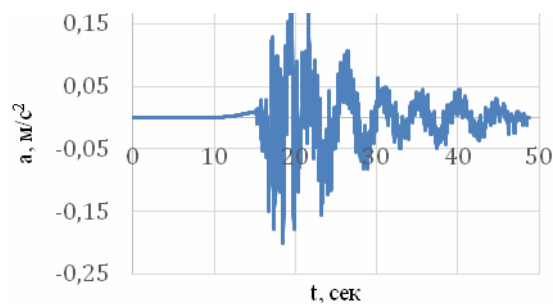
а



б



в



г

Рис. 4. Акселерограммы в направлении осей x и z: а, б – для 7-балльной сейсмической волны в направлении x и z соответственно; в, г – для 8-балльной сейсмической волны в направлении x и z соответственно

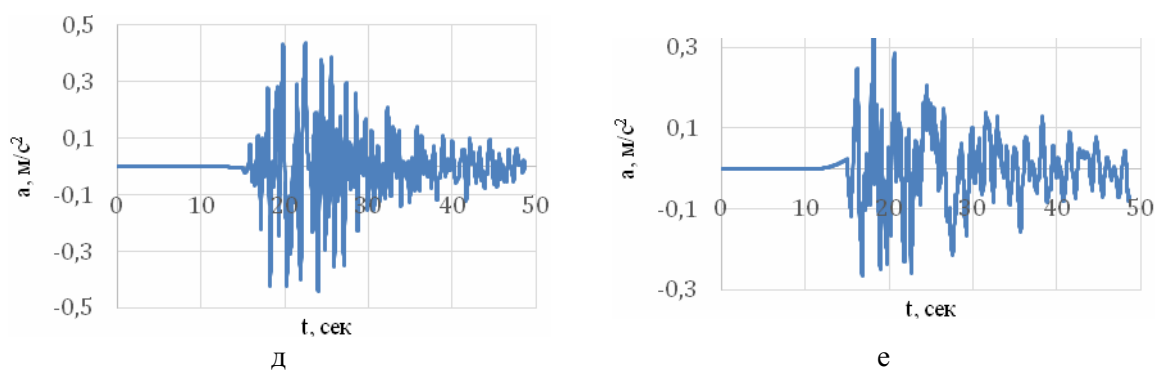


Рис. 4. Акселерограммы в направлении осей x и z : д, е – для 9-балльной сейсмической волны в направлении x и z соответственно

Описание модели

Для решения задачи прогноза напряженно-деформированного состояния обделки ПХРАО был использован метод конечных элементов. Для осуществления расчёта необходимо создать модель, состоящую из обделки тоннеля хранилища (ПХРАО), массива, размеры которой должны обеспечить достаточное пространство для полноценного анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС). Последний необходимо разделить на три части для возможности реализации следующих действий: поворота сечения тоннеля на некоторый угол, для учёта возможности прохождения сейсмических волн с разных направлений по отношению к вертикальной оси тоннеля; создания специальных граничных условий на границе расчетной области, позволяющих исключить дополнительные нагрузки на обделку, проявляющиеся в результате отражения сейсмических волн; приложение сейсмического воздействия (рис. 5). Основные физико-механические свойства частей модели представлены в таблице 1.

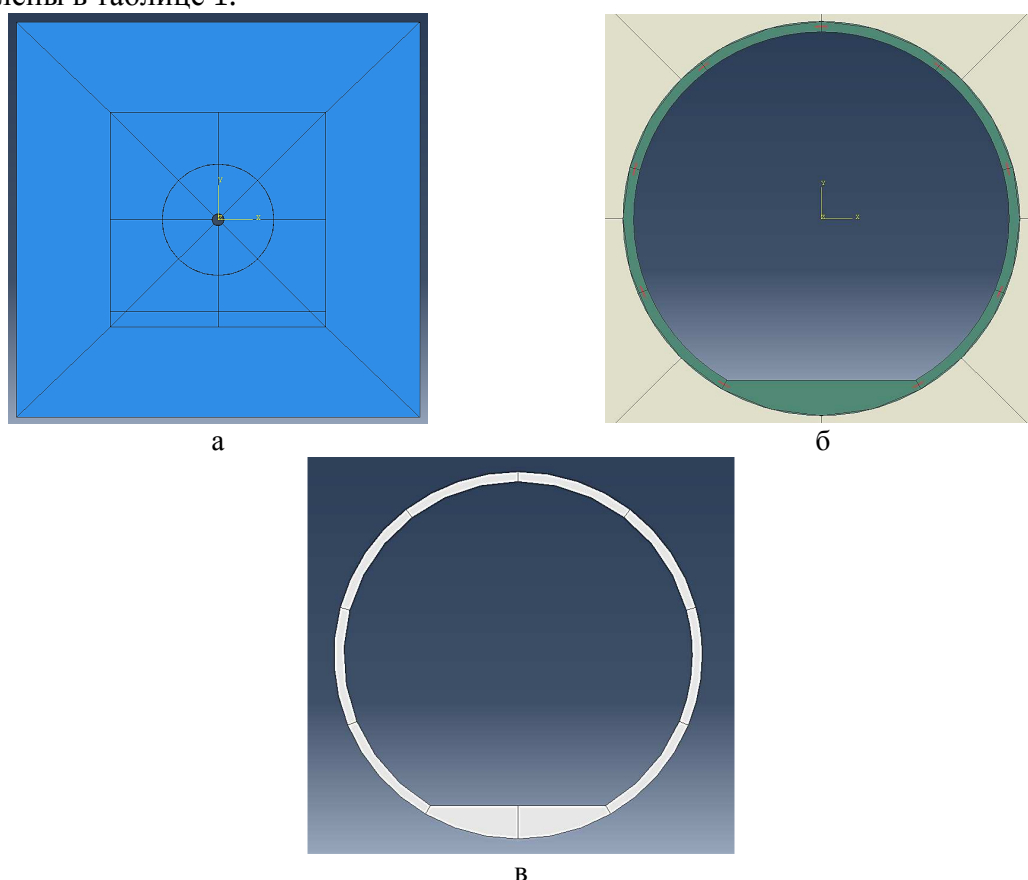


Рис. 5. Расчётная модель: а – общий вид, б – обделка 5БНЛ-10 для решения задачи с учётом контактного взаимодействия, в – обделка 5БНЛ-10 для решения задачи без учёта контактного взаимодействия

Табл. 1. Основные физико-механические параметры материалов

Условия Составляющая модели	Для задачи без учета демпфирования	Для задачи с учетом демпфирования
Обделка	Плотность: $\rho = 2430 \text{ г/м}^3$; модуль Юнга: $E = 30000 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона: $\nu = 0,2$.	
Породный массив	$\rho = 2100 \text{ г/м}^3$; $E = 610 \text{ МПа}$; $\nu = 0,3$.	$\rho = 2100 \text{ г/м}^3$; $E = 610 \text{ МПа}$; $\nu = 0,3$. Коэффициенты демпфирования в модели Релея: инерционный коэффициент: $\alpha = 0,03736$; коэффициент пропорциональности жёсткости: $\beta = 0,0008603$.
Шпильки (для задачи с контактным взаимодействием)	$\rho = 7826 \text{ г/м}^3$; $E = 205 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,3$.	

В качестве контактных условий между массивом горных пород и обделкой зададим условие совместности деформаций [11]. Рассматривая сопряжение сегментов, проанализируем два варианта:

- между блоками задано условие совместности деформаций;
- контакт задан как контакт трения с коэффициентом трения 0,4.

Далее при задании действующих нагрузок существует вариативность в алгоритме создания модели.

А) Для решения задачи с учётом/без учёта контактного взаимодействия необходимо задать параметры естественного напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива, определённые по зависимостям (1) и (3).

Горизонтальные напряжения σ_{11} и σ_{33} :

$$\sigma_{11} = \sigma_{33} = \lambda \gamma H, \quad (1)$$

где λ – коэффициент бокового давления, определяемый согласно гипотезе А.Н. Динника:

$$\lambda = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (2)$$

γ – удельный вес породного массива (протерозойской глины); H – глубина заложения выработки.

Вертикальные напряжения σ_{22} :

$$\sigma_{22} = \gamma H. \quad (3)$$

Б) Квазистатический расчёт подразумевает задание напряженно-деформированного состояния (НДС) массива с учётом действующей сейсмической волны – квазистатического поля напряжений, задаваемым эквивалентными компонентами напряжений, для расчёта которых были использованы зависимости, описанные в методике Н.С. Булычёва [12]:

$$\sigma_{\max, \min} = \pm \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma \nu_p T_0 K_h, \quad (4)$$

$$\tau_{\max, \min} = \pm \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma \nu_s T_0 K_h, \quad (5)$$

где $\sigma_{\min, \max}$ – максимальное/минимальное эквивалентное нормальное напряжение; $\tau_{\min, \max}$ – максимальное/минимальное эквивалентное касательное напряжение; A – условное сейсмическое ускорение частиц пород в долях g (ускорение свободного падения), данный показатель принимает значения равный 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для расчётной

сейсмичности 7, 8, 9 баллов; K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения обделок тоннелей; v_p – скорость распространения продольной волны (волна растяжения):

$$v_p = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (6)$$

v_s – скорость распространения поперечной волны (волна сдвига):

$$v_s = \sqrt{\frac{Eg}{2\gamma(1+\nu)}}, \quad (7)$$

T_0 – преобладающий период собственных колебаний частиц породы (с):

$$T_0 = \frac{1}{f(n)}, \quad (8)$$

где $f(n)$ – частота колебаний частиц породы (Гц) [13]:

$$f(n) = \frac{v_s}{4H}, \quad (9)$$

K_h – коэффициент, учитывающий глубину заложения сооружений.

Обсуждение результатов

Поставленная задача, как говорилось ранее, была решена в двух постановках – квазистатической и динамической. Предполагается, что результаты квазистатического расчёта являются более консервативными, поэтому результаты, полученные в динамической постановке, будут анализироваться с точки зрения сравнения с ними.

В первую очередь необходимо сравнить эпюры распределения вертикальных (рис. 6) и горизонтальных (рис. 7) напряжений в массиве горных пород при квазистатическом и динамическом расчётах.

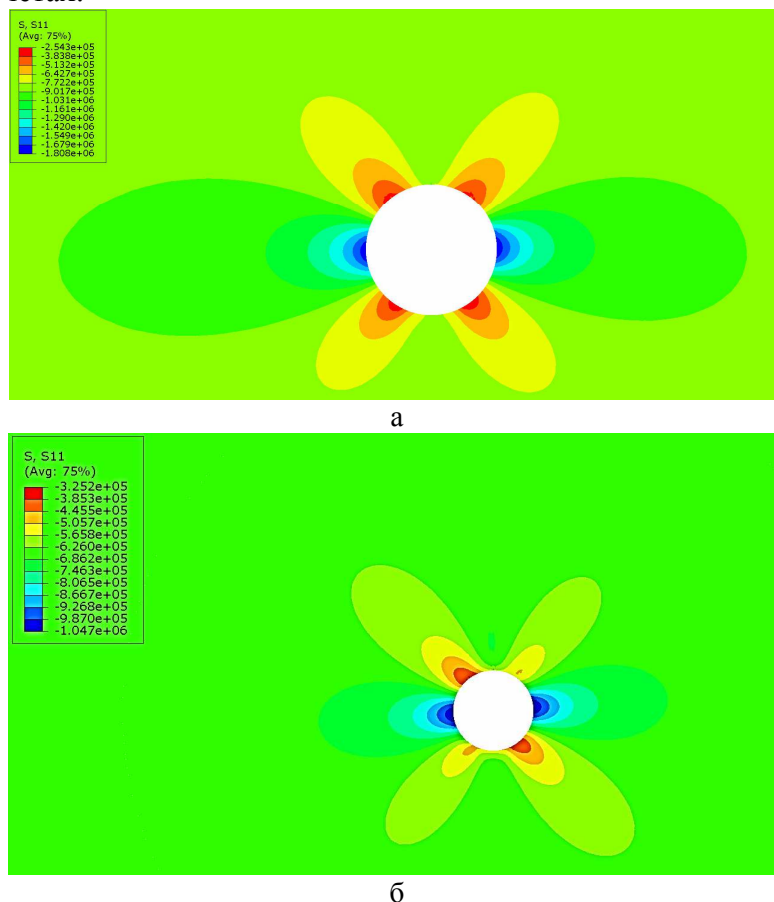


Рис. 6. Эпюра распределения горизонтальных напряжений (в МПа) в горном массиве при 7 баллах, в случае, когда выработка находится в начальном положении ($\alpha = 0^\circ$): а – при динамическом расчёте, б – квазистатическом расчёте

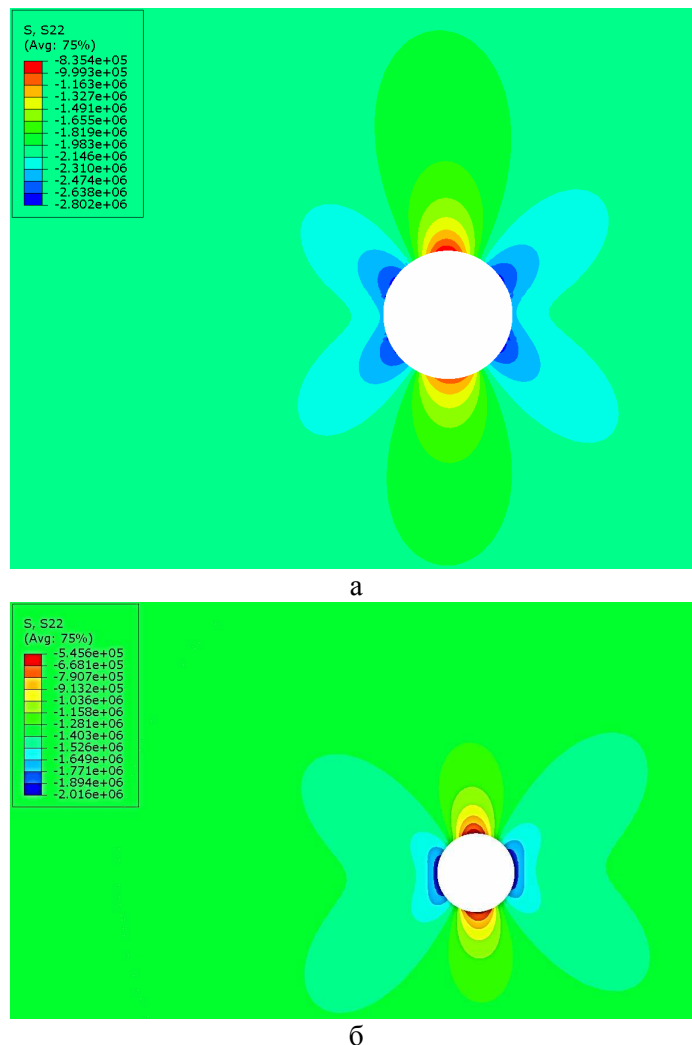


Рис. 7. Эпюры распределения вертикальных напряжений (в Па) в горном массиве при 7 баллах, в случае, когда выработка находится в начальном положении ($\alpha = 0^\circ$): а – при динамическом расчёте, б – квазистатическом расчёте

Как видно по приведённым эпюрам, картина распределения напряжений горизонтальных (рис. 6, а, б) и вертикальных схожа (рис. 7, а, б), основное отличие заключается в нарушении симметрии распределения эпюр относительно центра. Это связано с тем, что в квазистатической постановке при задании естественного НДС массива рассчитывались эквивалентные касательные и нормальные напряжения, в формульном представлении которых заложены различные характеристики прилагаемой сейсмической волны.

По полученным результатам расчётов при интенсивности сейсмического воздействия 7 баллов были построены эпюры распределения напряжений, где удалось проанализировать не только отклонения результатов квазистатического и динамического расчётов, но и влияние различных факторов на значения напряжений, возникающих в крепи обделки. К таковым относятся: контактное взаимодействие между сегментами крепи, демпфирование грунта (рис. 8).

Осуществив составление и анализ получившегося набора эпюр, построенных по значениям напряжений сформировавшихся в центральных точках элементов крепи, можно сделать следующие выводы.

1. Из рисунка 8, а, где анализировалось влияние учёта коэффициентов демпфирования грунта α и β при динамической подходе к решению рассматриваемой задачи, видно, что последние значительно приблизили картину распределения тангенциальных напряжений к итоговой эпюре квазистатического расчёта. Наиболее значимое изменение напряжений $\tau_{\min}$ наблюдается в узле сопряжения лоткового сегмента и нормальной секции крепи обделки.

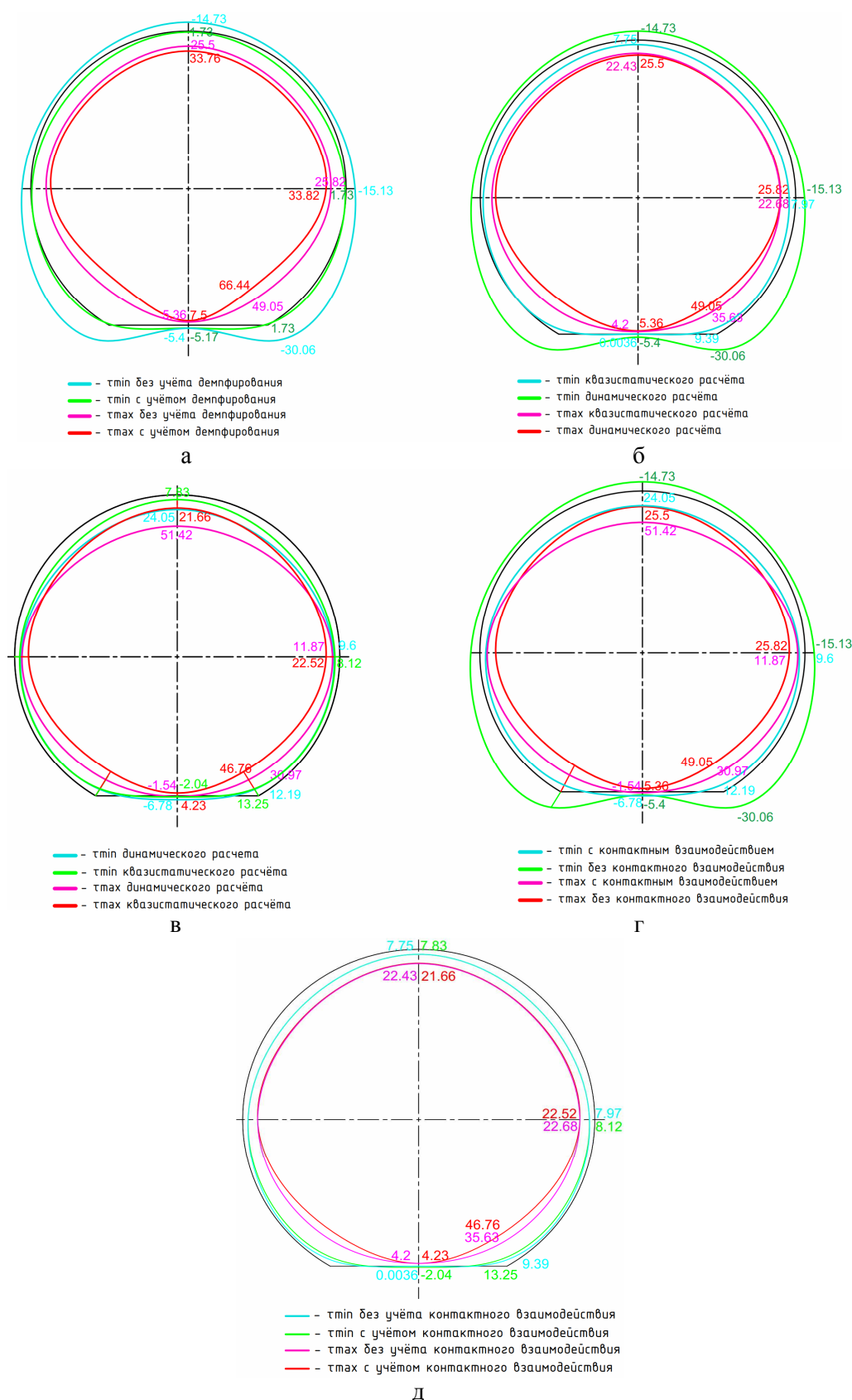


Рис. 8. Эпюры распределения максимальных и минимальных значений напряжения $\tau = \sigma_{\max} + \sigma_{\min}$ в узлах в масштабе значений 1:10 (МПа): а – по результатам расчёта модели с/без учёта демпфирования, б – по результатам квазистатического и динамического расчёта без учёта контактного взаимодействия, в – по результатам квазистатического и динамического расчёта с учётом контактного взаимодействия, г – по результатам динамического расчёта с/без учётом (-а) контактного взаимодействия, д – по результатам квазистатического расчёта модели с/без учётом (-а) контактного взаимодействия

2. Основываясь на результатах, отражённых в эпюре на рисунке 8, г, видно, что учёт контактного взаимодействия между сегментами крепи тоннеля также значительно влияет на достоверность результатов динамического расчёта, приближая их к квазистатическим (рис. 8, в).

3. Основное отличие, построенных эпюр, полученных в результате реализации двух подходов с учётом контактного взаимодействия (рис. 8, в), наблюдается в своде крепи тоннеля.

4. Также стоит заметить, что на рисунке 8, д, где сравниваются касательные напряжения с и без учёта контактного взаимодействия при квазистатическом подходе, последний фактор практически не повлиял на результаты расчёта.

Кроме того, был также осуществлён расчёт НДС обделки при 8 и 9 баллах интенсивности сейсмической волны, по результатам которых построены графики зависимости приращений напряжения $\Delta\sigma$ от интенсивности сейсмического воздействия для четырех узлов обделки тоннеля: центральная точка свода, центральная точка стены, узел соединения лоткового сегмента 5БЛ-10 с сегментом крепи 5БН-10, точка сопряжения лотковых блоков (рис. 9).

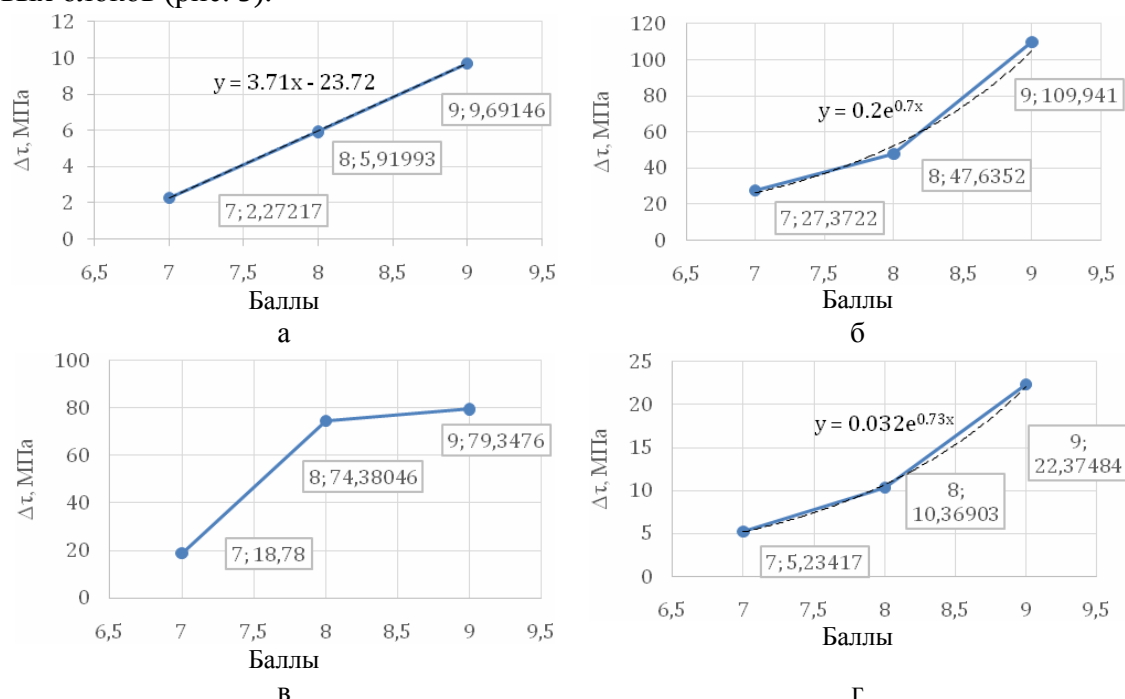


Рис. 9. Графики зависимости $\Delta\tau$ – баллы, где а – график изменения $\Delta\tau$ в центральной точке свода, б – график изменения $\Delta\tau$ в центральной точке стены, в – график изменения $\Delta\tau$ в узле соединения секции свода обделки и лотковой секции, г – график изменения $\Delta\tau$ в лотковом блоке крепи

Анализируя характер полученных графиков, можно сделать следующие наблюдения: приращения напряжений с увеличением балльности в своде изменяются по линейной зависимости, которую можно представить в следующем виде, где x характеризует интенсивность сейсмической волны:

$$y = 3,71x - 23,72. \quad (10)$$

Рассматривая графики на рисунках 9 б, г, видно, что картина изменения приращений напряжений схожи и можно утверждать, что это изменение можно описать следующими экспоненциальными зависимостями для лоткового блока:

$$y = 0,032e^{0,73x}, \quad (11)$$

$$y = 0,2e^{0,7x}. \quad (12)$$

Исходя из проведённого анализа, были сделаны следующие выводы.

1. Учёт параметров демпфирования грунта и контактного взаимодействия между секциями крепи в динамической задаче значительно влияет на достоверность результатов НДС обделки, приближая их к итогу квазистатического расчёта.

2. Как видно из графиков на рисунке 9, с увеличением интенсивности сейсмической волны увеличиваются и напряжения в обделке, причём при переходе от 7 к 8 баллам в точках свода, бокового сегмента и лоткового блока приращение напряжений меньше, чем при переходе от 8 к 9 баллам. Отличается от общей картины ситуация в узле стыка нормального сегмента крепи и лоткового блока, в этой точке наибольшее приращение наблюдается при первом росте интенсивности сейсмической волны.

3. Стоит отметить, что характер изменения напряжений в своде имеет линейный характер (10), а в боковом сегменте и лотковом блоке приближен к экспоненциальной зависимости (11), (12).

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет установить существенное влияние рассматриваемых факторов на формирование напряжённо-деформированного состояния обделки. При динамическом расчёте без учёта демпфирования массива и контактного взаимодействия элементов было выявлено, что максимальные сжимающие напряжения в узле сопряжения лоткового блока с нормальной секцией возникают при ориентации выработки под углом 90° , тогда как максимальные растягивающие напряжения наблюдаются при угле 120° . Учёт демпфирования и контактного взаимодействия приводит к качественному изменению картины напряжений. В том же критическом узле при угле поворота 90° происходит смена знака напряжений со сжимающих на растягивающие. Аналогичный переход от сжатия к растяжению при данной ориентации зафиксирован и в точках свода обделки и нормального блока. Сохраняющиеся растягивающие напряжения при нулевой ориентации выработки (0°) отмечены в центральной части лоткового блока.

Настоящее исследование посвящено разработке методики прогноза напряжённо-деформированного состояния (НДС) сборной блочной обделки подземного хранилища радиоактивных отходов (ПХРАО) в глинистых формациях при сейсмическом воздействии. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения долговременной безопасности объектов глубинного захоронения РАО в сейсмически активных регионах. Целью являлась оценка несущей способности обделки типа 5БНЛ-10, расположенной в массиве протерозойских глин, при землетрясениях интенсивностью 7, 8 и 9 баллов. Для её достижения разработана комплексная методика численного моделирования, основанная на сопоставлении результатов квазистатического и динамического анализа.

Полученные результаты и разработанная методика создают основу для более комплексного анализа долговременной безопасности ПХРАО. В качестве ключевых направлений для углублённого научного исследования предлагается рассмотреть оценку комбинированного воздействия термомеханических и сейсмических нагрузок, а также влияния многократного сейсмического воздействия на крепь, где предполагается исследование эффекта накопления повреждений в материале бетонной обделки и в контактных зонах между её элементами. Такой анализ позволит оценить кумулятивный эффект, приводящий к прогрессирующему снижению несущей способности.

Список литературы

1. Атомная энергетика: статьи, новости, события [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ura.news/articles/1036273427>.
2. Ключников А.А. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними / Под. ред. Ю.М. Шигеры. – Ч.: ИПБ АЭС НАН Украины, 2005. – 485 с.
3. Мосинец В.Н. Радиоактивные отходы уранодобывающих предприятий и их воздействие на окружающую среду // Атомная энергия. – 1991. – Т. 70. – С. 282-288.
4. Павлов Д.И., Сорокин В.Т. Научно-технические и проектные основы создания конструкций приповерхностных пунктов захоронения низко- и среднеактивных отходов // Радиоактивные отходы. – 2021. – №4. – С. 65-77. – doi.org/10.25283/2587-9707-2021-4-65-77.
5. Оценка долговременной безопасности приповерхностного пункта захоронения твёрдых радиоактивных отходов 3 и 4 классов (Томская область, городской округ – ЗАТО Северск) // Технический отчёт АО «РАОпроект». – СПб., 2017.

6. Протосеня А.Г., Карасев М.А. Подземное захоронение радиоактивных отходов в глинистых формациях // Записки Горного института. – 2007. – Т. 172. – С. 57-65.
7. Пункт захоронения НАО и САО в Ленинградской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atominfo.ru/newsh/o0353.htm>.
8. Мартынов В.В. Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке Енисейский // Радиоактивные отходы. – 2018. – №2. – С. 52-62.
9. Королёв К.В., Караулов А.М. Механика грунтов Т. 1 / Под. ред. С.А. Кудрявцевой. – М.: ФГБОУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2022. – 400 с.
10. Карасёв М.А. Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017. – 21 с.
11. SIMULIA User Assistance 2022. Abaqus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://help.3ds.com/>.
12. Булычёв Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: Недра, 1989. – 272 с.
13. Беляков Н.А. Разработка метода прогноза напряженно-деформированного состояния обделок транспортных тоннелей в нарушенном массиве: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2012. – 21 с.

References

1. Atomic Energy: Articles, news, events [Electronic resource]. – Access mode: <https://ura.news/articles/1036273427>.
2. Klyuchnikov A.A. Radioactive waste from nuclear power plants and methods for their management / Edited by Yu.M. Shigera. – Ch.: IPB AES NAS Ukrain, 2005. – 485 p.
3. Mosinets V.N. Radioactive waste from uranium mining enterprises and their impact on the environment // Atomic energy. 1991, vol. 70, pp. 282-288.
4. Pavlov D.I., Sorokin V.T. Scientific, technical, and design fundamentals for creating structures of near-surface disposal facilities for low- and intermediate-level waste // Radioactive Waste. 2021, no. 4, pp. 65-77. doi.org/10.25283/2587-9707-2021-4-65-77.
5. Safety assessment of a near-surface disposal facility for solid radioactive waste of classes 3 and 4 (Tomsk region, urban district – Closed administrative-territorial formation seversk) // Technical report JSC "RAOproekt". – SPb., 2017.
6. Protosenya A.G., Karasev M.A. Underground disposal of radioactive waste in clay formations // Journal of Mining Institute. 2007, vol. 172, pp. 57-65.
7. Disposal facility for LLW and ILW in the Leningrad region [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.atominfo.ru/newsh/o0353.htm>.
8. Martynov V.V. Analysis of localization and evolution scenario for a near-surface radioactive waste disposal facility at the Yeniseysky site // Radioactive Waste. 2018, no. 2, pp. 52-62.
9. Korolyov K.V., Karaulov A.M. Soil mechanics vol. 1 / Edited by S.A. Kudryavtseva. – M.: Educational and Methodological Center for Railway Transport Education, 2022. – 400 p.
10. Karasev M.A. Forecasting geomechanical processes in layered rock masses during the construction of underground structures with complex spatial configuration in conditions of dense urban development: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – SPb., 2017. – 21 p.
11. SIMULIA User Assistance 2022. Abaqus [Electronic resource]. – Access mode: <https://help.3ds.com/>.
12. Bulychev N.S. Mechanics of underground structures in examples and problems. – M.: Nedra, 1989. – 272 p.
13. Belyakov N.A. Development of a method for forecasting the stress-strain state of transport tunnel linings in a disturbed rock mass: Abstract of the diss. ... cand. tech. sc. – SPb., 2012. – 21 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Беляков Никита Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений	Belyakov Nikita Andreevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of construction of mining enterprises and underground structures
Мовчан Елизавета Игоревна – студент liza_movchan@rambler.ru	Movchan Elizaveta Igorevna – student

Получена 10.12.2025