

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ ПОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРА ПЛОЩАДКИ КОНТАКТА МЕЖДУ СЕГМЕНТАМИ

А.И. Тхориков¹, М.Г. Попов¹, С.А. Гладышев¹

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

Аннотация: Проведен анализ влияния размера площадки контакта тубингов на величину их раскрытия при действии на них сейсмической нагрузки. Анализ был проведен на основании объемной модели обделки тоннеля, выполненной по методу конечных элементов в программном комплексе Abaqus CAE. Нагрузка на крепь моделировалась как сейсмическое воздействие, действующее в массиве. Сейсмическая нагрузка была заменена на эквивалентную нагрузку от землетрясения, характерную для южных регионов России. Было проведено сравнение различных вариантов размеров площадки контакта между сегментами обделки. Проводилось сравнение при размерах площадки контакта от 20 до 90% размера боковой грани сегмента. Данный интервал позволяет рассмотреть весь реалистичный диапазон размеров площадок контактов и исключить нереалистичные варианты. Проведенное компьютерное моделирование позволило получить данные о величинах смещений сегментов колец друг относительно друга, напряжений на краях площадок контактов, а также выяснить величину овализации кольца обделки и раскрытия сегментов. Анализ полученных данных позволяет сделать выводы об оптимальной форме и размерах площадок контактов и о влиянии размера площадки на устойчивость сегментов в кольцевой обделке тоннеля. Рассмотрены возможности реального применения предложенных вариантов конфигурации сегментов обделки при строительстве тоннелей круглого сечения.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние массива, сейсмостойкость, кольцевая обделка, объемная постановка, овализация, сейсмическое воздействие, тоннель, поле напряжений.

Для цитирования: Тхориков А. И., Попов М. Г., Гладышев С. А. Анализ поведения обделки тоннеля под сейсмической нагрузкой в зависимости от размера площадки контакта между сегментами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 84–99. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_84.

Analysis of tunnel lining behavior under seismic load depending on size of contact area between lining segments

A.I. Tkhorikov¹, M.G. Popov¹, S.A. Gladyshev¹

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

Abstract: The influence of the contact area size on the disengagement of tubing segments under seismic loading is analyzed. The analysis included 3D finite element-based model of tunnel lining in Abaqus CAE. The lining load was modeled as seismic forces effective in rock mass. The seismic load was replaced by an equivalent earthquake effect typical of the southern regions in Russia. Different versions of sizes of contact areas between the lining segments were compared. The comparison was carried out for the contact area sizes from 20 to 90% of the size of the segment side face. This interval enables considering the whole realistic range of contact area sizes and avoiding non-realistic variants. The computer modeling produced the data on the displacements of the segment rings relative to one another as well as on the stresses at the edges of the contact areas, and revealed the values of ovalization of segment rings and disengagement of the segments. The obtained data analysis allows concluding on the optimized shape and size of contact areas, and on the influence of the contact area size on the stability of segmental tunnel lining. Possible applicability of the proposed shapes of lining segments in construction of circular tunnels is discussed.

Key words: stress-strain behavior of rock mass, seismic stability, O-ring lining, 3D formulation, ovalization, seismic effect, tunnel, stress field.

For citation: Tkhorikov A. I., Popov M. G., Gladyshev S. A. Analysis of tunnel lining behavior under seismic load depending on size of contact area between lining segments. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):84-99. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_84.

Введение

Сейсмостойкость является одним из ключевых факторов, которые необходимо учитывать при строительстве тоннелей в сейсмических районах. Землетрясения могут иметь катастрофические последствия для инфраструктуры [1, 2], и тоннели, ввиду своего подземного расположения, могут быть особенно уязвимы к сейсмическим воздействиям. В случае землетрясения тоннель может быть подвергнут значительным динамическим нагрузкам, которые могут привести к его разрушению или деформации, что, в свою очередь, может вызвать человеческие жертвы, нарушение транспортного потока и дальнейшую невозможность его эксплуатации. Кроме того, восстановление тоннеля после землетрясения может быть сложным и дорогостоящим процессом [3, 4]. Поэтому проектирование и строительство сейсмостойких тоннелей является важной задачей для инженеров и строителей, чтобы обеспечить безопасность и надежность

инфраструктуры в сейсмически активных районах.

При проектировании тоннелей в сейсмических районах использование современных подходов является критически важным для обеспечения безопасности и надежности инфраструктуры [5, 6]. Современная нормативная база частично устарела. Она основана на эмпирических формулах и упрощенных моделях, точность которых может быть недостаточна для учета сложных сейсмических нагрузок, которые могут возникать в результате землетрясений, или для учета сложных горно-геологических условий, в которых строится тоннель.

Вместо этого современные подходы, такие как компьютерное моделирование и анализ методом конечных элементов, позволяют инженерам более точно моделировать поведение тоннеля при сейсмических воздействиях, например, корректировать различные параметры крепления для обеспечения максимальной сейсмостойкости.

Компьютерное моделирование играет особенно важную роль в проектировании тоннелей [7], устойчивых к сейсмическому воздействию, поскольку оно позволяет инженерам моделировать поведение тоннеля при различных сценариях землетрясений и анализировать его реакцию на различные варианты конфигураций сейсмических нагрузок. Моделирование также позволяет прогнозировать различные последствия действия сейсмической нагрузки на тоннель. Например, можно спрогнозировать величины смещений тоннеля в массиве горных пород, величины раскрытия контактов между сегментами обделки, величины деформаций и напряжений в конструкции тоннеля, а также другие параметры, которые могут повлиять на подземное сооружение. Также моделирование позволяет учесть не только характер землетрясения, но и такие параметры, как тип грунта, глубина залегания тоннеля и тип конструкции обделки.

Благодаря компьютерному моделированию можно оценить эффективность различных конструктивных решений и материалов [8, 9], а также оптимизировать конструкцию тоннеля для обеспечения максимальной сейсмостойкости при минимальных затратах [10, 11]. Кроме того, компьютерное моделирование позволяет инженерам быстро и эффективно тестировать различные варианты сочетания нагрузок и проектных решений, что ускоряет процесс проектирования и позволяет проработать огромное количество сценариев работы обделки тоннеля.

В рамках данного исследования авторами была создана горногеомеханическая модель массива с выработкой круглого сечения. В качестве крепления в выработке использовалась тубинговая крепь. Основная цель работы — оценить влияние различных конфигураций площадок контактов между сегментами

обделки на устойчивость тоннеля, для чего авторы провели серию компьютерных экспериментов на данной модели, в ходе которых протестировали различные конфигурации площадок контактов между сегментами обделки. Результаты, представленные в статье, могут использоваться при проектировании обделок тоннелей и при строительстве в сейсмически опасных районах. Также созданная модель может использоваться в образовательном процессе при чтении дисциплины «Сейсмостойкость подземных сооружений».

Методика и методы

В современной нормативной базе, регламентирующей проектирование и строительство тоннелей в сейсмических районах, основным документом является СП 14.13330.2018 «Здания и сооружения в сейсмических районах». Данный документ не учитывает всех факторов, влияющих на сейсмостойкость тоннеля [12], и не позволяет провести детальный анализ поведения конструкции под воздействием сейсмической нагрузки [13]. В связи с этим было решено использовать компьютерное моделирование — как более эффективный и точный метод оценки сейсмостойкости тоннеля при различных размера площадок контакта между сегментами (геометрические области, по которым происходит взаимодействие сегментов между собой). Благодаря этому подходу стало возможным смоделировать различные конфигурации площадок контактов между сегментами обделки и проанализировать полученные деформации и напряжения в них, что невозможно выполнить при использовании только нормативных документов.

Для проведения компьютерного моделирования поведения тоннеля под воздействием нагрузок, вызванных сейсмическими событиями [14], необходимо

выбрать программный пакет, который может достоверно и эффективно моделировать сложное взаимодействие между тоннелем и массивом горных пород. Существует несколько программных пакетов, которые могут быть использованы для этой цели, таких как ANSYS, LS-DYNA, OpenFOAM и Abaqus CAE [15]. Каждый из этих пакетов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор оптимального пакета зависит от конкретных задач и требований моделирования. После анализа возможных вариантов был сделан выбор в пользу программного пакета Abaqus CAE, который является одним из наиболее мощных и универсальных инструментов для моделирования сложных процессов в области геомеханики и сейсмостойкости сооружений.

Программный комплекс Abaqus CAE обладает рядом особенностей, которые делают его удобным инструментом для решения подобной задачи [16]. Одним из основных преимуществ Abaqus CAE является возможность очень подробного конфигурирования модели, что позволяет точно учитывать сложные геометрические и физические параметры тоннеля и массива горных пород. Также Abaqus CAE позволяет выводить огромное количество различных данных, включая деформационные характеристики, напряжения и перемещения, что позволяет получить полную картину поведения тоннеля в массиве горных пород. Это дает возможность получить более точные результаты [17, 18] и провести более детальное исследование поведения тоннеля [19], что невозможно при использовании других программных пакетов. Также данный программный комплекс поддерживает экспорт из других программных пакетов, что позволило создать сложную геометрию обделки тоннеля и затем использовать ее в модели.

Для моделирования поведения тоннеля под воздействием сейсмической нагрузки была создана горногеомеханическая модель с достаточной степенью детализации [20]. Модель была выполнена в объемной постановке, что позволило учесть сложные геометрические и физические параметры тоннеля и массива горных пород. Размеры модели составляют 100 м по горизонтали и 80 м по вертикали. Глубина модели равна 1,5 м, что эквивалентно глубине одного кольца обделки тоннеля. В центре модели расположена выработка диаметром 4,8 м. Описанные ранее размеры были выбраны с учетом необходимости обеспечения адекватности и точности моделирования. Это позволяет исключить влияние граничных условий на результаты моделирования, что является важным фактором для получения достоверных результатов.

Вместо прямого динамического воздействия в модели была использована эквивалентная сейсмическая нагрузка [21, 22], которая прикладывалась к граням модели. Эквивалентная нагрузка включает в себя касательную и нормальную составляющие, что позволяет учитывать сложный характер воздействия сейсмической нагрузки на массив. Этот подход позволяет сократить время расчетов, что является важным фактором при моделировании сложных систем. Однако необходимо учитывать, что использование эквивалентной нагрузки упрощает итоговую модель и не дает той же детализации, как если бы сейсмическая нагрузка задавалась напрямую. Также в модели была учтена и нагрузка от веса вышележащего слоя пород за счет введения компоненты гравитации [23, 24].

В центре модели расположена выработка с тубинговой обделкой, диаметром 4,8 м в черне (см. рис. 1, 2). Тубинговая обделка имеет толщину 300 мм. Закреп-

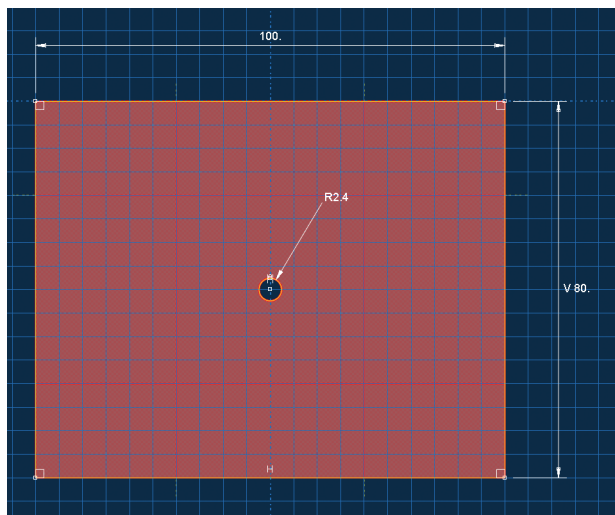


Рис. 1. Основные геометрические размеры модели [составлено авторами]
 Fig. 1. Basic geometric dimensions of the model [compiled by the authors]

ное пространство представлено бетонным кольцом толщиной 100 мм. Такое детализированное описание выработки позволяет более точно моделировать поведение системы и получать более надежные результаты [25, 26].

При моделировании горного массива были использованы следующие параметры. Модуль упругости породного

массива был принят равным 27,4 МПа, коэффициент Пуассона — равным 0,38. Эти параметры были выбраны на основе данных о геологической структуре массива и его механических свойствах, полученных при строительстве автодорожного тоннеля на юге России [27]. Кроме того, для кольца закрепного пространства был использован бетон класса В25, а для крепи — бетон В45. Данные параметры были выбраны исходя из рекомендаций, представленных в СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автодорожные».

Расчетная схема решаемой задачи представлена на рис. 3.

Данная расчетная схема была реализована в программном комплексе Abaqus CAE, она представлена на рис. 4.

Фиолетовыми стрелками показаны нормальная и касательная нагрузки, эквивалентные нагрузкам P и Q из расчетной схемы. Желтые стрелки представляют собой нагрузку от собственного веса пород и обделки. Оранжевыми стрелками показано закрепление или же граничные условия, приложенные к границам модели (см. рис. 4).

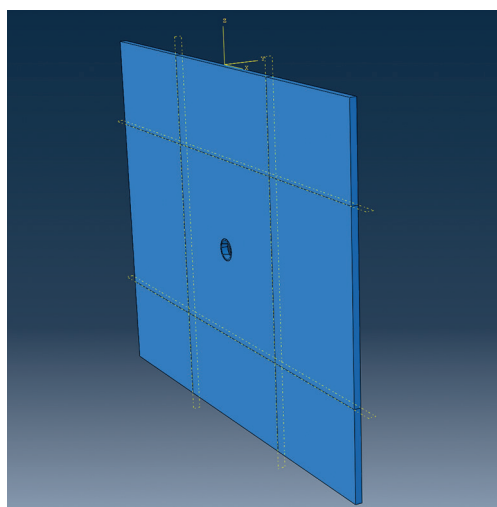


Рис. 2. Общий вид модели [составлено авторами]
 Fig. 2. General view of the model [compiled by the authors]

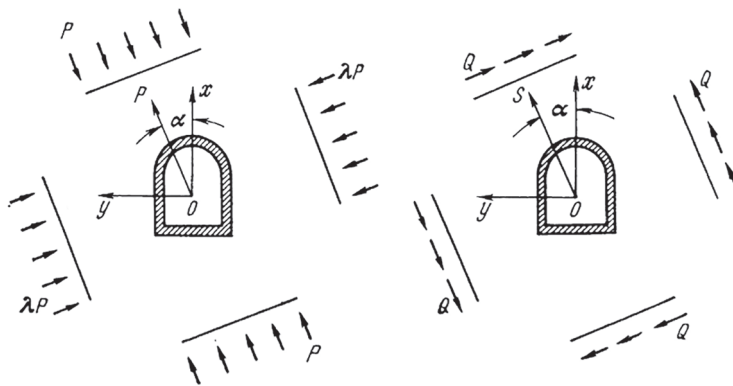


Рис. 3. Расчетная схема решаемой задачи [28]
 Fig. 3. Calculation chart of the problem being solved [28]

Оригинальная задача, представленная в нормативной документации, решается по принципу суперпозиции путем сложения напряжений, полученных от воздействия сейсмической нагрузки и нагрузки от вышележащего слоя пород [29]. Так как возможности программного комплекса позволяют, то в модели все эти нагрузки были реализованы одновременно.

Значения нагрузок, приложенных к краям объемной горногеомеханической модели, основаны на данных, характерных для сейсмически активного юга России. Были использованы результаты сейсмических исследований, проведенных в этом регионе, и получены эквивалентные нагрузки, которые были применены к краям объемной модели для моделирования поведения горного массива в условиях сейсмически активного региона. Эти нагрузки представляют собой экстремальные значения, возможные при землетрясении, характерном для данного района, и вычисляются по следующим формулам [30]:

$$\sigma_{\max \min} = \pm P = \pm 1/2\pi K_c \cdot \gamma \cdot C_p \cdot T_0;$$

$$\tau_{\max \min} = \pm Q = \pm 1/2\pi K_c \cdot \gamma \cdot C_s \cdot T_0.$$

Данные формулы учитывают такие параметры, как T_0 — преобладающий период колебаний грунта, коэффициент

K_c — коэффициент сейсмичности, а также C_p и C_s — скорости распространения продольных и поперечных волн в массиве. Эти параметры используются в аналитической методике для того, чтобы задать землетрясение в неявном виде. Следует отметить, что при подобной схеме из-за упрощенной постановки задачи не будут учтены внутренние меха-

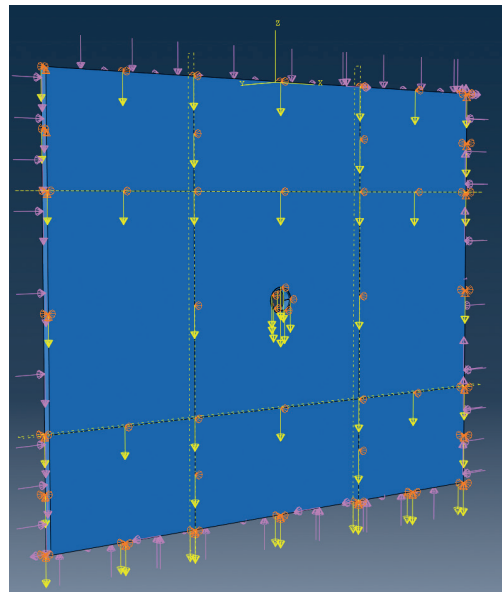


Рис. 4. Схема задания нагрузок и граничных условий в модели [составлено авторами]
 Fig. 4. Scheme for specifying loads and boundary conditions in the model [compiled by the authors]

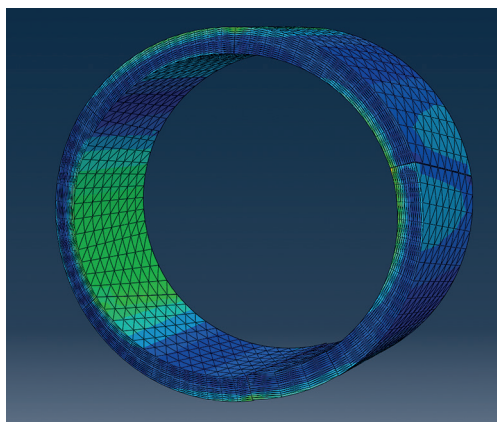


Рис. 5. Визуализация полей напряжений в кольцевой обделке [составлено авторами]

Fig. 5. Visualization of stress fields in a ring lining [compiled by the authors]

нические потери в грунте [31].

После создания конечно-элементной сетки в модели она была отправлена на расчет и были получены следующие данные:

- величина напряжений, возникающих в обделке в результате действия сейсмических сил;
- величина раскрытия сегментов обделки тоннеля под действием нагрузок;
- смещения, возникающие в обделке тоннеля под действием нагрузок.

На основании данных моделирования после обработки результатов моделирования различных конфигураций площадок контактов были также получены данные об оваллизации тоннеля и о возможной потере устойчивости выработки

[32, 33]. Эпюра полей напряжений в кольцевой обделке представлена на рис. 5.

Важно отметить, что размер площадок контактов задавался не за счет изменения геометрических характеристик сегментов обделки, а за счет исключения пар поверхностей на гранях сегментов обделки (рис. 6). На рис. 6 каждая область, разграниченная горизонтальными полосами, соответствует примерно 7,5% от площади поверхности ребра сегмента обделки (шаг, с которым задавался размер площадки контакта, представлен в таблице с результатами), выделение нескольких секций на площадке контакта позволяет гибко настраивать площадь контакта между сегментами (программный комплекс Abaqus CAE требует отдельно задавать характер взаимодействия между элементами модели, а также геометрическую область, по которой происходит взаимодействие).

Анализ результатов моделирования кольцевой обделки тоннеля в объемной постановке

В результате моделирования были получены различные данные, которые помогают лучше понять поведение сегментов обделки тоннеля при воздействии эквивалентных сейсмических нагрузок и нагрузки от веса горных пород [34, 35]: в частности, были получены данные об оваллизации сечения тонне-

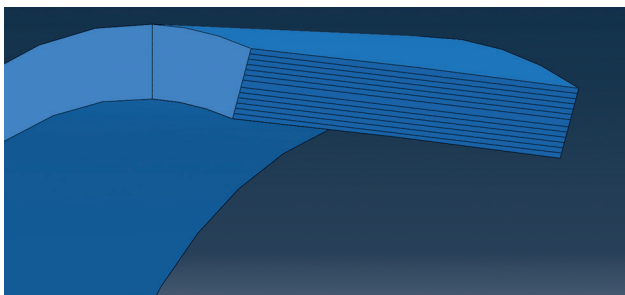


Рис. 6. Поверхности контакта на грани сегмента обделки [составлено авторами]

Fig. 6. Contact surfaces on the edge of the lining segment [compiled by the authors]

ля, которые показали, что приложенные нагрузки могут привести к изменению формы тоннеля, но незначительно; о величине раскрытия сегментов обделки, которые взаимосвязаны с деформациями тоннеля.

Кроме того, были получены данные о напряжениях на площадках контактов, которые указывают на то, что сейсмические нагрузки могут вызвать увеличение напряжений в этих зонах. Полученные данные будут использоваться для дальнейшего анализа и интерпретации результатов моделирования.

Согласно проведенному анализу, можно сделать следующие выводы: овализация тоннеля присутствует, но в незначительной степени; хотя размер площадки контакта и оказывает влияние, однако совокупность других факторов и контактов позволяет удерживать кольцо обделки в устойчивом состоянии. Данные о зависимости овализации от размера площадки контакта представлены в таблице. Также было выдвинуто предположение о том, что значительную роль сыграл тот факт, что площадки контакта моделировались не за счет точной геометрии, а за счет исключения пар контактов (это упрощает модель и расчет).

Анализ данных по напряжениям на площадках контактов между сегментами обделки тоннеля показал, что максимальные значения напряжений наблюдались в области площадок контакта замкового тьюбинга на краях площадки контакта. Данные свидетельствуют о том, что чем меньше площадка контактов, тем выше напряжения на ней. Согласно полученным данным, при определенной конфигурации размера площадок будет присутствовать явление разрушения бетона по площадке контакта с последующей потерей устойчивости обделки тоннеля. Результаты также показали, что значения напряжений на площадках контактов тесно взаимосвязаны с величинами раскрытия сегментов обделки. Подробное распределение напряжений на площадках контактов представлено на рис. 7–9. На данных рисунках представлено распределение полей напряжений при площадках от 10 до 90% грани сегмента обделки (область настраиваемого взаимодействия между сегментами обделки, показанная на рис. 6).

По результатам моделирования также возможно было проанализировать величины раскрытия сегментов обделки. Программный комплекс Abaqus CAE позволяет выводить конкретно значения

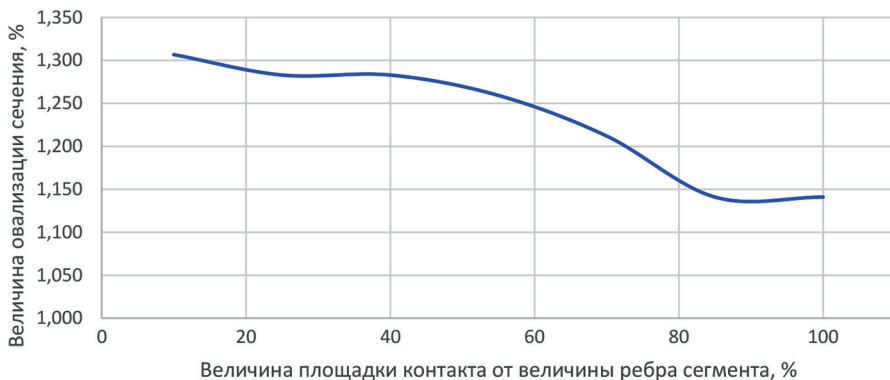


Рис. 7. График зависимости величины овализации обделки тоннеля в зависимости от размера площадки контакта [составлено авторами]

Fig. 7. Graph of the dependence of the amount of ovalization of the tunnel lining depending on the size of the contact area [compiled by the authors]

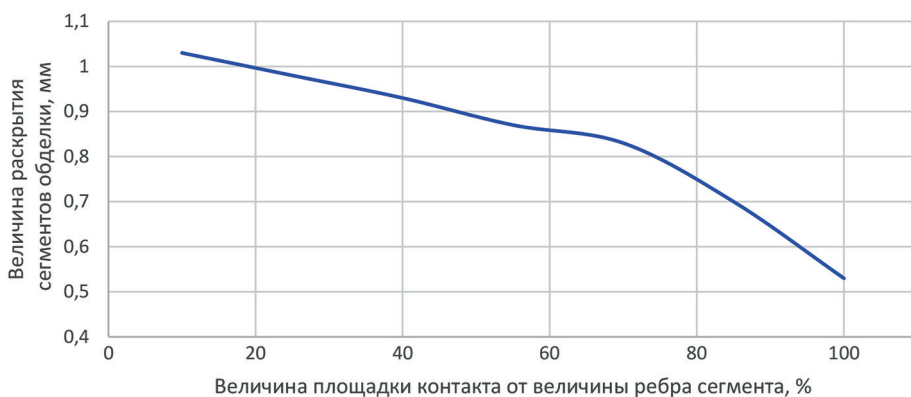


Рис. 8. График зависимости величины раскрытия сегментов от размера площадки контакта [составлено авторами]

Fig. 8. Graph of the size of the segment opening depending on the size of the contact area [compiled by the authors]

смещения контактирующих поверхностей друг относительно друга, в данном случае смещение площадок контактов друг относительно друга. Согласно полученным данным, зависимость между величиной раскрытия сегментов и размером площадки есть, и она представлена на рис. 8.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что величина раскрытия контактов варьируется от 0,4 до

1 мм. Такая величина раскрытия может быть компенсирована обычными резиновыми прокладками, которые устанавливаются в тубинговой обделке. Можно предположить, что для получения более достоверных данных о величине раскрытия все же стоит провести серию компьютерных опытов на модели с более высокой детализацией (сделать геометрически точную модель сегментов с выступающими площадками контакта).

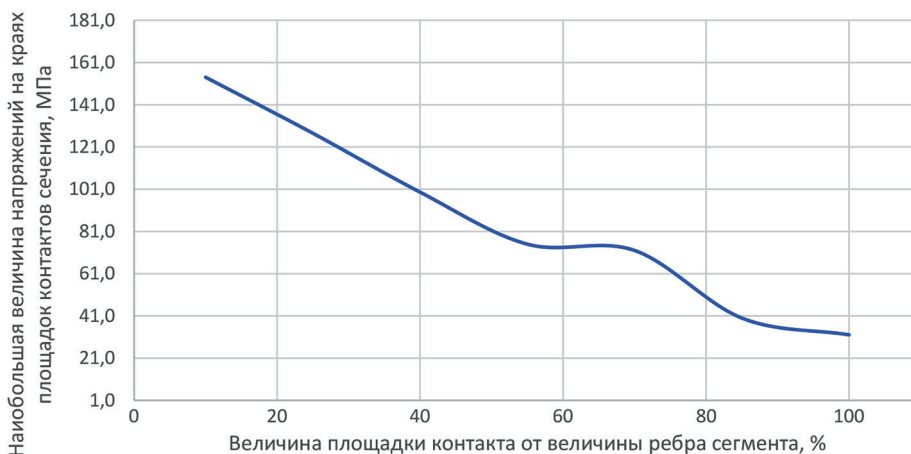


Рис. 9. График зависимости напряжений в обделке тоннеля на контакте площадок сегментов в зависимости от размера площадки контакта [составлено авторами]

Fig. 9. Graph of the stress dependence in the tunnel lining at the contact of the segment pads, depending on the size of the contact area [compiled by the authors]

Полученные значения напряжений и их порядок в целом отражают реальную величину, ожидаемую для проходки тоннеля в реальных условиях. Это связано с тем, что, несмотря на некоторые упрощения при моделировании, полученная модель все еще учитывает широкий спектр факторов, влияющих на поведение тоннеля при эквивалентных сейсмических нагрузках, включая нелинейные эффекты и взаимодействие между различными компонентами тоннеля. Однако, несмотря на все вышесказанное, порядок цифр, полученных в модели, совпадает с порядком цифр, полученным в аналогичных исследованиях или литературных источниках [34].

Кроме того, использование современных методов моделирования и высокоточных алгоритмов обеспечивает высокую точность результатов (это подтверждают также и исследования по данной тематике, результаты которых сопоставимы с полученными). Таким образом, полученные данные валидны и могут быть использованы для принятия обоснованных решений при проектировании и строительстве тоннелей в сейсмически активных регионах.

Заключение

В таблице представлены основные результаты моделирования, которые позволяют оценить поведение тоннеля при эквивалентных сейсмических нагрузках. Согласно проанализированным результатам, можно предположить, что модель с подобной детализацией не дает точных данных о величине раскрытия и овализации сечения тоннеля. Это связано с тем, что деформационные характеристики тоннеля зависят от множества факторов, и для того, чтобы учесть их в полной мере, необходимо, как минимум, улучшить геометрические характеристики модели обделки тоннеля. Тем не менее, результаты моделирования позволяют

Основные результаты моделирования [составлено авторами] Main results of the simulation [compiled by the authors]

Величины раскрытия сегментов по площадкам контактов в зависимости от размера площадки контакта	
Величина раскрытия, мм	Площадка контакта от величины ребра сегмента, %
1,03	10
0,98	25
0,93	40
0,87	55
0,83	70
0,7	85
0,53	100
Величина овализации обделки тоннеля в зависимости от размера площадки контакта	
Величина овализации сечения, мм	Площадка контакта от величины ребра сегмента, %
1,307	10
1,283	25
1,283	40
1,259	55
1,212	70
1,141	85
1,141	100
Значения напряжений в обделке тоннеля на контакте площадок в зависимости от размера площадки контакта	
Величина напряжений, МПа	Площадка контакта от величины ребра сегмента, %
154,0	10
127,5	25
99,6	40
75,0	55
72,0	70
40,0	85
32,1	100

сделать однозначные выводы о вероятности потери устойчивости выработки при определенном размере площадки контакта (согласно приведенным в таблице данным, на площадках контакта будут возникать напряжения, превышающие предел прочности бетона и приводящие к разрушению обделки и, как следствие, к потере устойчивости выработки), что является важным фактором при проектировании и строительстве тоннелей в сейсмически активных регионах.

В данных условиях компьютерное моделирование, основанное на конечно-элементном анализе, демонстрирует себя как отличный инструмент для исследования поведения тоннеля при эквивалентных сейсмических нагрузках. Полученные результаты свидетельствуют о том, что данное моделирование позволяет достичь высокой степени точности и детализации в оценке параметров процессов, протекающих в массиве горных пород при сейсмическом воздействии. Подобная модель может дополнять существующие аналитические методики и учитывать те факторы, которые они учесть не в состоянии.

При решении данной инженерной задачи компьютерное моделирование играет ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности при проектировании сооружений. Моделирование обеспечивает 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.

Также необходимо подчеркнуть, что соответствие данных моделирования с данными натурных исследований является обязательным условием для обеспечения достоверности и точности результатов компьютерного моделирования.

Несмотря на отсутствие данных натурных исследований, результаты данной работы сравнивались с аналогичными работами, выполненными в данной области, и, исходя из этого, можно сказать, что полученные результаты достоверны. Однако стоит также отметить один немаловажный факт — результаты соответствуют ожидаемым только в части получившихся в обделке напряжений, результаты же полученных величин раскрытий сегментов обделки получились слишком малыми для того, чтобы делать однозначные выводы о зависимости от размеров площадки контакта (в случае размеров площадок контактов менее 50% от величины ребра ожидалось более серьезные смещения и величины раскрытий).

Необходимо отметить, что при решении инженерной задачи, связанной с компьютерным моделированием, правильная постановка задачи играет решающую роль (корректное задание свойств материала обделки и массива, правильные граничные условия, создание верной расчетной схемы и т.д.). Она позволяет определить цели и задачи моделирования, выбрать соответствующие методы и алгоритмы, а также обеспечить корректность и достоверность получаемых результатов. Ошибочные решения в данном случае могут привести к получению некорректных или неадекватных результатов, что может иметь серьезные последствия для безопасности и надежности капитальных сооружений. Согласно вышеописанным результатам, можно предположить, что предложенный учет особенностей геометрии при такой постановке задачи дает верное представление о формируемых полях напряжений в обделке, однако величины раскрытий и смещений отражает не совсем корректно. Поэтому постановка задачи является ключевым этапом в моделировании, который напрямую влияет на

качество и достоверность полученных результатов и, соответственно, на принятие обоснованных инженерных решений.

Таким образом, компьютерное моделирование становится неотъемлемым и обязательным элементом при проектировании и позволяет принимать обоснованные решения, что имеет решающее значение в обеспечении безопасности и надежности капитальных сооружений, и его важность невозможно переоценить.

В связи с недостаточно удовлетворительными результатами определения величин раскрытия сегментов обделки

продолжением данного исследования будет улучшение детализации геометрических характеристик тоннеля и анализ результатов уже в уточненной постановке. Такая задача является более ресурсоемкой и продолжительной, однако ее необходимо выполнить для того, чтобы получить более подробную картину формирования раскрытия сегментов обделки. Также возможно в дальнейшем, что эквивалентная нагрузка будет заменена на прямое динамическое воздействие. Это позволит учесть более широкий спектр факторов, влияющих на условия проведения тоннеля в сейсмически опасных районах строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорман И. Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей. — М.: ТИМР, 2000. — 307с.
2. Амузин Б. З., Булычев Н. С., Оловянный А. Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. — М.: Недра, 1974. — 320 с.
3. Lindsay M. L., Mark W., Wesseloo H. Wesseloo J. Complexities of underground mining seismic sources // *Philosophical Transactions A*. 2021, vol. 379(2196), pp. 1–24. 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. Соколов О. Л. Пространственный расчет обделок тоннелей мелкого заложения // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. — 2009. — № 14(33). — С. 59–65.
6. Карасев М. А., Петрушин В. В. Методические вопросы определения исходных параметров модели деформирования каменной соли как поликристаллической дискретной среды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2024. — № 9. — С. 47–64. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_47.
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. Страданченко С. Г., Плешко М. С., Армейсков В. Н. Разработка эффективных составов фибробетона для подземного строительства // *Инженерный вестник Дона*. — 2013. — № 4(27). — С. 61.
9. Русанов В. Е. Эффективность применения фибронабрызгбетона в мосто- и тоннелестроении // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. — 2012. — № 5(27). — С. 65–68.
10. Usarov M. K., Mamatisaev G. I. Calculation on seismic resistance of box-shaped structures of large-panel buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 971, no. 3, article 032041. DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/032041.
11. Вербилло 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. Беликов А. А., Беяков Н. А. Метод численного моделирования реологических процессов на контуре одиночной горной выработки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2024. — № 1. — С. 94–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_94.

13. Колюхов Д. С., Казаченко С. А. Основные факторы, влияющие на сходимость расчетных и фактических значений деформаций существующих зданий // Горная промышленность. — 2022. — № 2. — С. 103–111. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-103-111.
14. Коваль С. Б., Молодцов М. В. Раннее нагружение бетона в условиях различной влажности // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. — 2011. — № 12. — С. 15–17.
15. Холиерова Х. К. Вопросы оптимального проектирования подземных сооружений // *Universum: технические науки*. — 2022. — № 10-1(103). — С. 14–16.
16. Онищенко А. О., Аль-Машвали С. М., Томарева И. А. Анализ технологий строительства подземных нефтегазопроводов в сейсмически опасных районах // *Инженерный вестник Дона*. — 2021. — № 6(78). — С. 355–363.
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. Набатов В. В., Вознесенский А. С. Геомеханический анализ влияния строительства новых тоннелей в окрестности действующих подземных сооружений метрополитена на состояние грунтового массива // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 264. — С. 926–936.
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, pp. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123.
20. Холиерова Х. К., Якубов С. Х., Латипов З. Ё. Математические модели оптимизации цилиндрических оболочек с подкрепленными ребрами жесткости // *Universum: технические науки*. — 2021. — № 2(83). — С. 31–33.
21. Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S., Rivaz B. Hybrid precast tunnel segments in fiber reinforced concrete with glass fiber reinforced bars // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 86, pp. 100–112. DOI: 10.1016/j.tust.2019.01.016.
22. 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. DOI: 10.21660/2020.75.78558.
23. 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.
24. Chi T. N., Alexandr G. Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2020, vol. 19, no. 1, pp. 179–188. DOI: 10.1007/s11803-020-0555-0.
25. Деев П. В., Петрухин М. А. Расчет обделок тоннелей мелкого заложения на сейсмические воздействия землетрясений / *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы конференции*. Т. 1. — Тула: ТулГУ, 2018. — С. 206–214.
26. Nguyen C. T., Do N. A., Pham V. V., Nguyen P. T., Alexandr G. Prediction of blast-induced the area of the tunnel face in underground excavations using fuzzy set theory ANFIS and artificial neural network ANN // *International Journal of GEOMATE*. 2022, vol. 23, no. 95, pp. 136–143. DOI: 10.21660/2022.95.3327.
27. Страданченко С. Г., Молев М. Д., Дмитриенко В. А. Моделирование смещений грунтового контура подземных сооружений // *Инженерный вестник Дона*. — 2023. — № 6(102). — С. 611–620.
28. Цыганков Д. А. Расчет временной крепи тоннеля, проходимого в сейсмически активной зоне // *Успехи современного естествознания*. — 2020. — № 5. — С. 108–114. DOI: 10.17513/ise.37400.
29. Wang J., Huo Q., Song Z., Zhang Y. Study on adaptability of primary support arch cover method for large-span embedded tunnels in the upper-soft lower-hard stratum // *Advances in Mechanical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814018825375.
30. Жалалдинов М. М., Дуйшеев С. Д., Турабыев Ч. К., Эркали У. У. Методы расчета инженерных сооружений с учетом сейсмических сил // *Известия вузов Кыргызстана*. — 2022. — № 1. — С. 22–25. DOI: 10.26104/IVK.2022.45.557.
31. Муравьева Е. А., Манько А. В. Эндогенные геодинамические процессы: причины и воздействия на подземные сооружения // *Экономика строительства*. — 2023. — № 3. — С. 88–93.

32. Бутунов Ж. Р., Хамидов С. Процесс распространения сейсмической волны, воздействующей на подземное сооружение // Экономика и социум. — 2022. — № 6-1 (97). — С. 463–470.
33. Тутов С. С. Строительство тоннелей // Достижения науки и образования. — 2021. — № 3 (75). — С. 30–31.
34. Саммаль А. С., Павлова Н. С., Тормышева О. А. Расчет обделки тоннеля, сооружаемого вблизи границы раздела двух типов пород // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 2. — С. 344–360.
35. Попов М. Г., Синегубов В. Ю. Исследование свойств двухслойных бетонно-фибробетонных конструкций при различных соотношениях толщины слоев // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 70–82. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-70-82. **WAS**

REFERENCES

1. Dorman I. Ya. *Seysmostoykost' transportnykh tonneley* [Seismic resistance of transport tunnels], Moscow, TIMR, 2000, 307p.
2. Amusin B. Z., Bulychev N. S., Olovyanniy A. G. *Raschet krepki kapital'nykh gornykh vyrabotok* [Calculation of the lining of capital mine workings], Moscow, Nedra, 1974, 320 p.
3. Lindsay M. L., Mark W., Wesseloo H. Wesseloo J. Complexities of underground mining seismic sources. *Philosophical Transactions A*. 2021, vol. 379(2196), pp. 1–24. 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. Sokolov O. L. Spatial calculation of the lining of shallow tunnels. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. The Construction and Architecture series*. 2009, no. 14(33), pp. 59–65. [In Russ].
6. Karasev M. A., Petrushin V. V. Methodological issues in determination of initial parameters for modeling deformation of rock salt as a polycrystalline discrete medium. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 9, pp. 47–64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_47.
7. Litvinsky G. G., Smekalin E. S., Kladko V. I. Evaluation methodology and criteria for the stability of mine workings. *Sbornik nauchnykh trudov GOU VPO LNR «DonGTU»*. 2020, no. 19, pp. 5–14. [In Russ].
8. Stradanchenko S. G., Pleshko M. S., Armejskov V. N. Development of effective compositions of fiber-reinforced concrete for underground construction. *Engineering journal of Don*. 2013, no. 4(27), pp. 61. [In Russ].
9. Rusanov V. E. The effectiveness of the use of fiber-sprayed concrete in bridge and tunnel construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2012, no. 5(27), pp. 65–68. [In Russ].
10. Usarov M. K., Mamatisaev G. I. Calculation on seismic resistance of box-shaped structures of large-panel buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 971, no. 3, article 032041. DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/032041.
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. Belikov A. A., Beliakov N. A. Method of numerical modeling of rheological processes on the contour of single mine working. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 1, pp. 94–108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_94.
13. Konyukhov D. S., Kazachenko S. A. The main factors influencing the convergence of calculated and actual values of deformations of existing buildings. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 2, pp. 103–111. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-103-111.
14. Koval S. B., Molodtsov M. V. Early loading of concrete in conditions of different humidity. *Bulletin of the South Ural state university. Series: Construction engineering and architecture*. 2011, no. 12, pp. 15–17. [In Russ].
15. Kholiyorova H. K. Issues of optimal design of underground structures. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022, no. 10-1(103), pp. 14–16. [In Russ].
16. Onishchenko A. O., Al-Mashwali S. M., Tomareva I. A. Analysis of technologies for the construction of underground oil and gas pipelines in seismically hazardous areas. *Engineering journal of Don*. 2021, no. 6(78), pp. 355–363. [In Russ].

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. Nabatov V. V., Voznesensky A. S. Geomechanical analysis of the impact of the construction of new tunnels in the vicinity of existing underground subway structures on the state of the soil massif. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 926 – 936. [In Russ].

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, pp. 1 – 6. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123.

20. Kholiyorova H. K., Yakubov S. H., Latipov Z. E. Mathematical models of optimization of cylindrical shells with reinforced stiffeners. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021, no. 2(83), pp. 31 – 33. [In Russ].

21. Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S., Rivaz B. Hybrid precast tunnel segments in fiber reinforced concrete with glass fiber reinforced bars. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 86, pp. 100 – 112. DOI: 10.1016/j.tust.2019.01.016.

22. 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. DOI: 10.21660/2020.75.78558.

23. 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.

24. Chi T. N., Alexandr G. Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2020, vol. 19, no. 1, pp. 179 – 188. DOI: 10.1007/s11803-020-0555-0.

25. Deev P. V., Petrukhin M. A. Calculation of lining of shallow tunnels for seismic effects of earthquakes. *Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki: materialy konferentsii*, T. 1 [Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy: Conference proceedings, vol. 1], Tula, TulGU, 2018, pp. 206 – 214. [In Russ].

26. Nguyen C. T., Do N. A., Pham V. V., Nguyen P. T., Alexandr G. Prediction of blast-induced the area of the tunnel face in underground excavations using fuzzy set theory ANFIS and artificial neural network ANN. *International Journal of GEOMATE*. 2022, vol. 23, no. 95, pp. 136 – 143. DOI: 10.21660/2022.95.3327.

27. Stradanchenko S. G., Molev M. D., Dmitrienko V. A. Modeling displacements of the soil contour of underground structures. *Engineering journal of Don*. 2023, no. 6(102), pp. 611 – 620. [In Russ].

28. Tsygankov D. A. Calculation of the temporary support of a tunnel traversed in a seismically active zone. *Advances in current natural sciences*. 2020, no. 5, pp. 108 – 114. [In Russ]. DOI: 10.17513/use.37400.

29. Wang J., Huo Q., Song Z., Zhang Y. Study on adaptability of primary support arch cover method for large-span embedded tunnels in the upper-soft lower-hard stratum. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1 – 15. DOI: 10.1177/1687814018825375.

30. Zhaldinov M. M., Duishoev S. D., Turabyev C. K., Erkali U. Calculation of the method of engineering interaction with the calculation of seismic forces. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy Kyrgyzstana*. 2022, no. 1, pp. 22 – 25. [In Russ]. DOI: 10.26104/IVK.2022.45.557.

31. Muravyova E. A., Manko A. V. Endogenous geodynamic processes: causes and impacts on underground structures. *Construction Economy*. 2023, no. 3, pp. 88 – 93. [In Russ].

32. Butunov Zh. R., Khamidov S. The process of propagation of a seismic wave acting on an underground structure. *Economy and society*. 2022, no. 6-1 (97), pp. 463 – 470. [In Russ].

33. Tutov S. S. Construction of tunnels. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2021, no. 3 (75), pp. 30 – 31. [In Russ].

34. Sammal A. S., Pavlova N. S., Tormysheva O. A. Calculation of the lining of a tunnel constructed near the interface of two types of rocks. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, no. 2, pp. 344 – 360. [In Russ].

35. Popov M. G., Sinegubov V.Yu. Study of the properties of two-layer concrete-fiber-concrete structures at different ratio of layer thickness. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 70 – 82. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-70-82.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Тхориков Андрей Игоревич*¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0404-5690,

*Попов Михаил Григорьевич*¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: popov_mg@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4603-5757,

*Гладышев Сергей Александрович*¹ – студент,
e-mail: 190807@stud.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.I. Tkhorikov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,

e-mail: Tkhorikov_AI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0404-5690,

*M.G. Popov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,

e-mail: popov_mg@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4603-5757,

*S.A. Gladyshev*¹, Student,
e-mail: 190807@stud.spmi.ru,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

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

Получена редакцией 18.12.2024; получена после рецензии 06.02.2025; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 18.12.2024; received after the review 06.02.2025; accepted for printing 10.04.2025.

