

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ПОРОДНЫЙ МАССИВ, ВМЕЩАЮЩИЙ ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

А.П. Господариков¹, М.А. Зацепин¹, Я.Н. Выходцев², Нгуен Чи Тхань³

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

² T-Systems Multimedia Solutions, Санкт-Петербург, Россия

³ Ханойский университет горного дела и геологии, Ханой, Вьетнам

Аннотация: В настоящее время для решения транспортной проблемы в столице Социалистической Республики Вьетнам городе Ханой полностью спроектирована и построена система тоннелей метрополитена. Некоторые объекты инженерной инфраструктуры метрополитена расположены под землей на глубине до 20 м. Для обеспечения их надежной и безопасной работы необходимо учесть сейсмические волны землетрясений и оценить их влияние на подземные сооружения. Территория современного Вьетнама занимает северную и северо-восточную часть сейсмически активной Зондской плиты (плита Сунда). Большую опасность представляют тектонические разломы, проходящие по всей территории Вьетнама и вызывающие возмущения земной коры большой интенсивности. В середине восьмидесятых годов прошлого века в пределах Ханойской агломерации было зафиксировано множество землетрясений магнитудой 5÷8 баллов по шкале Рихтера, повредившие некоторые здания и сооружения на поверхности. Сопоставление натуральных замеров и результатов численного моделирования воздействия сейсмических волн землетрясений на подземные объекты метрополитена Ханоя является важной и актуальной задачей. Решение такой геодинамической задачи с определенной степенью достоверности получаемых результатов базируется на разработанном и апробированном (модификация известного метода) численно-аналитическом методе расчета, который позволяет также учесть влияние стыков между частями обделок тоннелей метрополитена. Результаты математического моделирования позволили установить закономерности изменения основных параметров напряженного состояния обделок тоннелей Ханойского метрополитена и обосновать выбор как самого материала для обделок тоннелей, так и необходимых параметров обделки с учетом воздействия на нее сейсмических волн землетрясений. При ведении буровзрывных работ на горных предприятиях возникают сейсмозрывные волны, которые могут привести к негативным последствиям, в частности, к деформациям и нарушению целостности массива горных пород, вмещающего горные выработки различного назначения. Так, например, открытая разработка Хибинского месторождения апатит-нефелиновых руд связана с проведением буровзрывных работ и выделением большого количества энергии, обуславливающей образование значительных деформаций и напряжений, от которых напрямую зависят безопасность и устойчивость горной выработки. Поэтому возникает необходимость разработки и дальнейшего совершенствования универсальных методов численного математического моделирования и создания на их основе вычислительных комплексов. В настоящей работе приведена разработанная математическая модель воздействия сейсмозрывной волны от проведения буровзрывных работ на неоднородный породный массив, вмещающий горизонтальную выработку.

Реализация метода расщепления С. К. Годунова по разработанному авторами численному алгоритму позволила составить вычислительную программу, при помощи которой удалось получить результаты численного моделирования указанных геодинамических процессов, что позволило обеспечить безопасность и сохранность подземных сооружений при ведении буровзрывных работ.

Ключевые слова: напряженное состояние, метрополитен Ханоя, буровзрывные работы, сейсмические волны, натурные замеры, численное моделирование, вычислительная программа, прогноз воздействия сейсмических и буровзрывных волн на подземные сооружения.

Благодарность: Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год №FSRW-2020-0014.

Для цитирования: *Господариков А. П., Зацепин М. А., Выходцев Я. Н., Нгуен Чи Тхань* Численное моделирование воздействия сейсмических волн на породный массив, вмещающий подземные сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 116–130. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_116.

Numerical modeling of seismic wave impact on enclosing rock mass surrounding underground structures

A.P. Gospodarikov¹, M.A. Zatsepin¹, Ya.N. Vykhodtsev², C.T. Nguyen³

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

² T-Systems Multimedia Solutions, Saint-Petersburg, Russia

³ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

Abstract: Currently Hanoi, the capital city of Vietnam, is solving the problem connected with traffic congestion thanks to the designed and built metro system. Some infrastructure objects of the metro are situated at a depth down to 20 m below ground surface. In order to ensure safe and reliable operation of underground structures, it is required to estimate impact of seismic waves induced by earthquakes. Modern Vietnam occupies the north and northeast of the Sunda Plate which is a seismically active structure. In the mid-1980s many Richter magnitude 5–8 earthquakes were recorded within the boundaries of the city agglomeration of Hanoi, which damaged some buildings and structures on ground surface. It is important and relevant to undertake and compare in-situ measurement and numerical modeling of seismic wave impacts on underground structures of the Hanoi Metro. Solution of such geodynamic problem at a certain confidence of the result uses the developed and approved numerical-and-analytical approach (modification of a known method) which includes influence of junctions in the metro tunnel lining in calculation. Mathematical modeling describes the behavior of the main stress state parameters in the tunnel lining in the Hanoi Metro, and enables justification of the choice of both lining material and lining parameters with regard to the impact of seismic waves generated by earthquakes. Drilling in mines also induces adverse seismic waves which can cause deformation and disintegration in enclosing rock mass surrounding various-purpose underground openings. For instance, surface mine operations at the Hanoi apatite–nepheline deposit involves drilling and blasting connected with high energy release. The latter provokes considerable stresses and straining which directly affect safety and stability of underground openings. In this respect, it is necessary to develop and improve universal methods of numerical and mathematical modeling and to create computing systems on this basis. This article describes the developed mathematical modeling of blasting-induced seismic wave impact on a nonuniform enclosing rock mass surrounding an underground tunnel. Application of Godunov’s splitting using the authors’ numerical algorithm made it possible to design a computer program for the numerical modeling

of geodynamic processes towards safety and integrity of underground structures during drilling and blasting.

Key words: stress state, Hanoi Metro, drilling and blasting, seismic waves, in-situ measurements, numerical modeling, computation program, prediction of blasting-induced and seismic wave impact on underground structures.

Acknowledgements: The study was supported under the state contract for scientific research in 2021, Contract No. FSRW-2020-0014.

For citation: Gospodarikov A. P., Zatsepin M. A., Ya.N. Vykhodtsev, Nguen C. T. Numerical modeling of seismic wave impact on enclosing rock mass surrounding underground structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):116-130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_116.

Введение

Инфраструктура объектов первой линии метрополитена Ханоя, находящаяся в сложных горно-геологических условиях (ГГУ), состоит из наземной и подземной частей. Первая линия метрополитена Ханоя начинается от станции Нхон и заканчивается станцией Ханой. Длина наземного участка первой линии метрополитена, включающего восемь станций, составляет 8,5 км. Подземный участок длиной 4 км насчитывает четыре станции (рис. 1) и располагается под землей на глубине до 20 м. Планируется увеличение общей длины первой линии метро до 38,5 км. Обделка тоннелей подземной части первой линии метрополитена выполнена из железобетонных и бетонных элементов. Тоннели пройдены на глубине до 20 м и имеют диаметр 6,3 м. Массив горных пород (МГП), вмещающий подземные сооружения Ханойского метрополитена, представляет собой анизотропную многослойную среду, ко-

торая в данной статье замещается эквивалентной однородной средой. Скорость сейсмической волны сдвига в этом случае определяется по формуле:

$$C_s = \frac{\sum_{k=1}^l h_k}{\sum_{k=1}^l \frac{h_k}{C_{Sk}}}, \quad (1)$$

где h_k — мощность k -го слоя, м; l — общее число слоев грунта; C_{Sk} — скорость сейсмической волны сдвига k -го слоя, м/с. Среднее значение модуля Юнга грунта равно:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^l E_k h_k}{\sum_{k=1}^l h_k}, \quad (2)$$

где E_k — модуль Юнга k -го слоя, МПа.

К особенностям инженерно-геологических условий метрополитена Ханоя можно отнести четвертичные осадочные породы, для которых характерен массив горных пород, сложенный мягкими под-

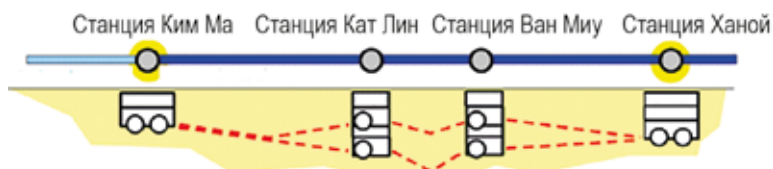


Рис. 1. Схема четырех подземных станций Ханойского метрополитена

Fig. 1. Scheme of four stations of the Hanoi Metro

вижными несвязными грунтами небольшой мощности, залегающими на относительно небольшой глубине. Воздействие сейсмических волн в районе города Ханой и во всем Вьетнаме в целом таково, что максимальное ускорение движения массива горных пород с учетом сложных геологических условий принимают равным $a_g = 0,2g$, при этом гипоцентр землетрясений может находиться на удалении до 70 км [1].

Во многих работах, в том числе и ученых Горного университета, было установлено, что при определении напряженного состояния вокруг тоннелей в случае $L/(2R) > 3$, где L — длина волны, м; R — радиус тоннеля, м; можно перейти от динамического процесса деформирования горных пород к методам и формулам, характерными для квазистатического случая [2]. Отметим, что в данной работе с учетом исследований [3] длина волны принята $L = 200$ м.

Методы расчета параметров геомеханических процессов, протекающих в массиве горных пород

В механике деформируемого твердого тела, как и в геомеханике, принято рассматривать два основных метода моделирования: моделирование методом аналогий и физическое моделирование [4–6]. В первом случае на моделях изучаются явления природы, не связанные с «натурой», хотя эти явления и можно описать аналитическими зависимостями. Во втором случае в модели сохраняется «масштаб» природы, когда модель «М» и натура «Н» различаются только размерами. В рамках моделирования удается получить решение ряда задач о параметрах модели и величинах перехода. Так, например, наличие зависимостей между «М» и «Н» позволяет установить характер связи между величинами для «М» и «Н». Для таких зависимостей

между величинами имеет место соотношение вида:

$$A^H = m_A \cdot A^M, \quad (3)$$

где преобразования m_A определяют соответствие A^M .

Из соотношения (3) можно определить и тип соответствия, а именно: соответствие подобия, геометрическое соответствие, функциональное соответствие, операторное соответствие и т.д.

Очевидно, что масштабы моделирования m_A (преобразования) для рассматриваемых величин (скалярные, векторные или тензорные) являются величинами постоянными в пространстве и времени, а также для их компонент. В частности, имеют место формулы:

$$T^H = m_T \cdot T^M; P_i^H = m_P \cdot P_i^M; U_i^H = m_U \cdot U_i^M,$$

где T — температура (скаляр); P и U — сила и перемещения (векторы). Аналогично выписываются формулы и для тензоров напряжений и деформаций.

Метод эквивалентных материалов (МЭМ) — один из методов теории механического подобия, является в настоящее время наиболее востребованным и перспективным [7]. В качестве эквивалентных материалов могут выступать не только минеральные цементируемые порошки, получаемые измельчением горных пород, но и различные материалы органического происхождения с добавлением минеральных добавок, например, гипсобетонные составы и другие. При расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, вмещающего выработки неглубокого заложения, нагрузка на изучаемые элементы модели обеспечивается собственным весом материала. При этом удобно осуществлять исследования на плоских стендах, оборудованных необходимыми регистрирующими приборами и аппаратурой, поскольку на таких глубинах деформации и напряжения связаны ли-

нейными зависимостями. В частности, при решении ряда динамических задач МЭМ хорошо себя зарекомендовал, особенно в экспериментальных исследованиях геомеханических процессов в неоднородных средах. К числу преимуществ МЭМ относится возможность получения значений основных параметров НДС в тех областях массива горных пород, которые в шахтных условиях получить не представляется возможным, в силу проявления опасных по динамическим явлениям событий. Несмотря на большую область применения МЭМ, он имеет ряд недостатков, к числу которых можно отнести невозможность получить результаты исследований с пригодной для инженерной практики точностью. Поэтому исследователи вынуждены получать приближенные решения геомеханических задач с помощью применения современных численных методов определения НДС массива горных пород, вмещающего подземные сооружения. При наличии разработанных вычислительных универсальных программ

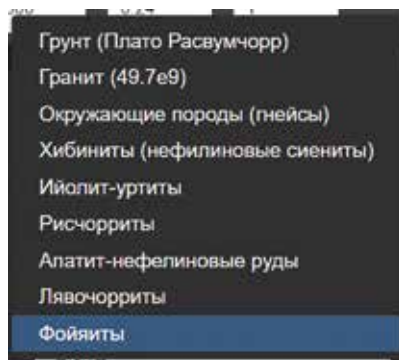


Рис. 2. Выбор типа грунта

Fig. 2. Selecting type of soil

ханических задач с помощью применения современных численных методов определения НДС массива горных пород, вмещающего подземные сооружения. При наличии разработанных вычислительных универсальных программ

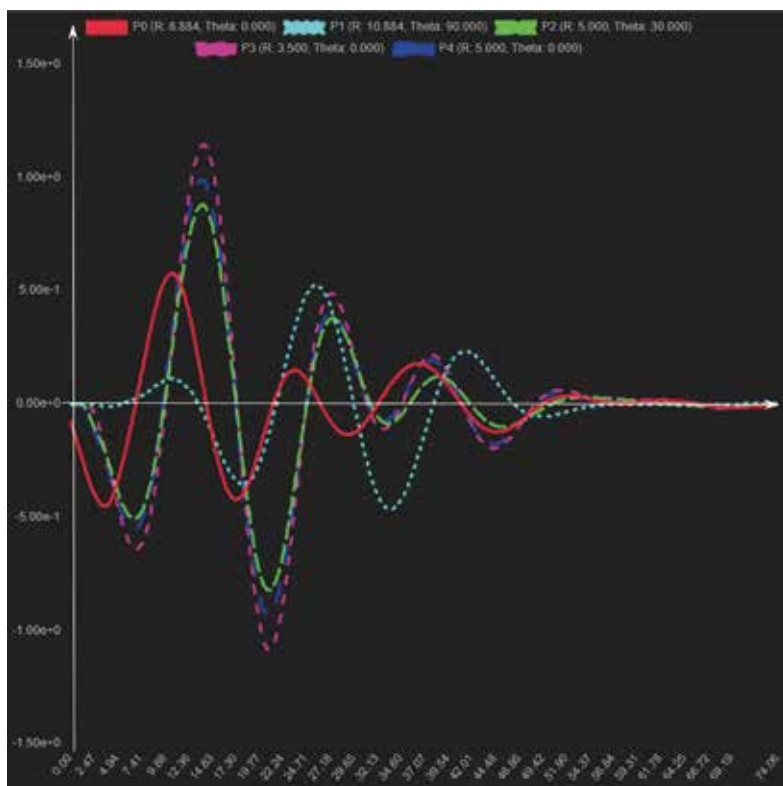


Рис. 3. Компонента вектора скорости смещения грунта v_{11}

Fig. 3. PPV vector component v_{11} in soil

и комплексов, — это удается особенно эффективно [8, 9].

Так, например, в случае применения разработанной математической модели (воздействия сейсмозрывной волны взрыва на породный массив, включающий горную выработку) авторы статьи учитывали модифицированный метод конечных объемов (МКО), предложенный в работе [10]. Система дифференциальных уравнений в частных производных динамической теории упругости в координатах Мизеса с учетом разработанных необходимых модификаций, приведена в работах [11, 12].

Для численного решения сформулированной краевой задачи была разработана расчетная разностная схема, для которой предварительно операторное уравнение, символизирующее математи-

ческую модель описанного выше процесса, записывается в дивергентной форме:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(BU)}{\partial x} + \frac{\partial(pCU)}{\partial y} + TU = 0, \quad (4)$$

где

$$p = \frac{1}{H}; q = \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x};$$

H — коэффициент Ламе; $T = qQ - \frac{\partial p}{\partial y} C$,

Q, B и C — постоянные матрицы пятого порядка; U — вектор неизвестных.

Для проведения математического моделирования была создана вычислительная программа, реализующая разработанную математическую модель [13, 14]. После задания входных параметров (показатели сейсмозрывной волны, механические характеристики и количество слоев породного массива, геометриче-

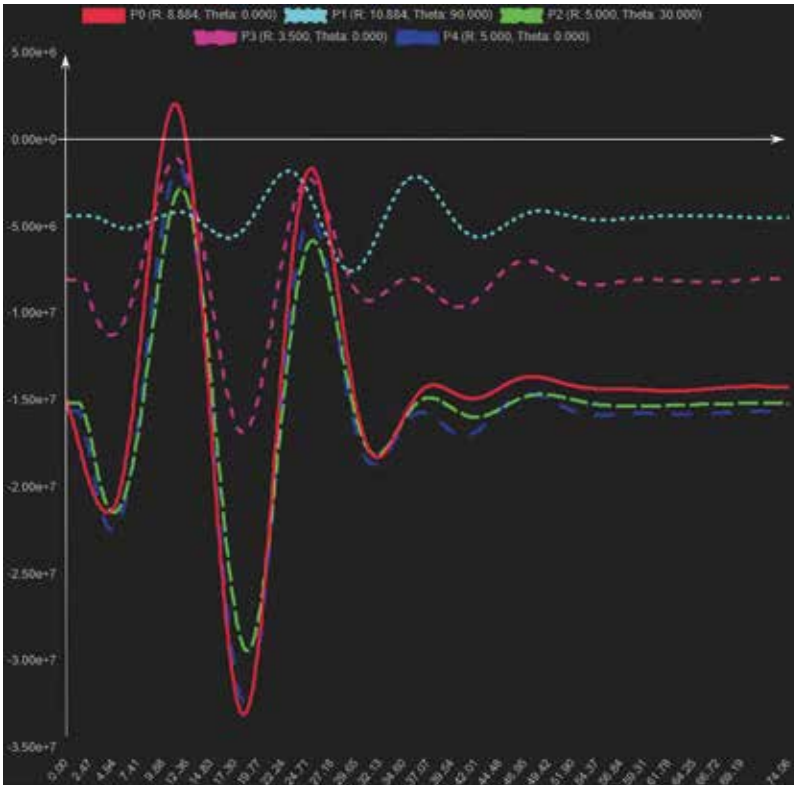


Рис. 4. Проекция тензора напряжений σ_{11}

Fig. 4. Projections of stress tensor σ_{11}

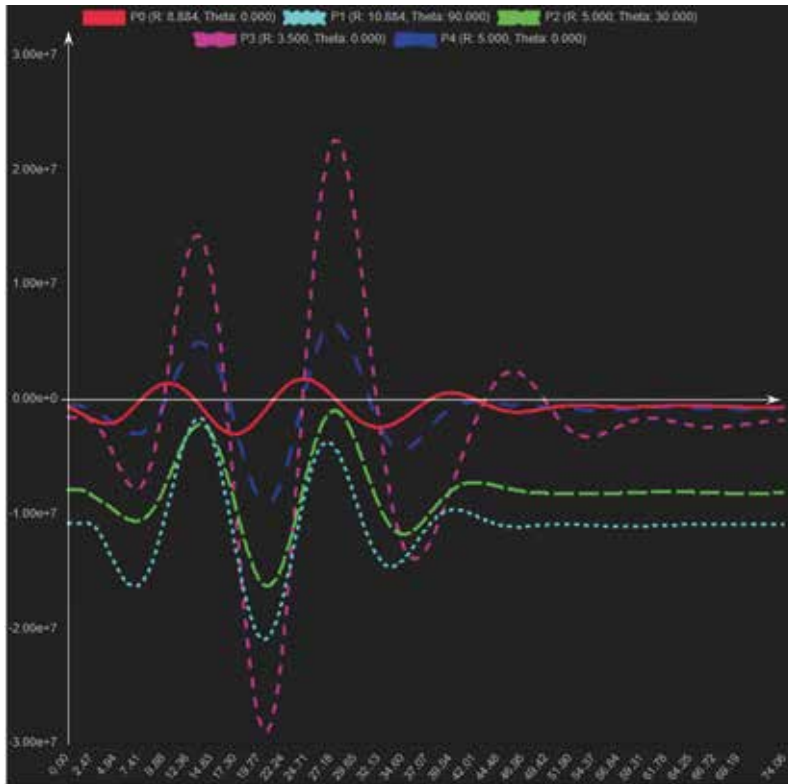


Рис. 5. Проекция тензора напряжений σ_{22}
 Fig. 5. Projections of stress tensor σ_{22}

ская форма горной выработки и начальное распределение поля напряжений) вычислительная программа автоматически рассчитывает и выводит на экран основные параметры расчета. Отметим, что в качестве окружающих выработку породных слоев, в программе могут быть выбраны различные типы грунтов, в том числе и для апатит-нефелинового месторождения Кольского полуострова (рис. 2).

Выходными параметрами программы являются графики проекций вектора скорости v_{11} и проекций тензора напряжений σ_{11} , σ_{22} (представлены на рис. 3, 4 и 5 соответственно) слоев, прилегающих к горной выработке. Последние, в конечном итоге, определяют как устойчивость подземной выработки в течение всего времени эксплуатации, так и

необходимые параметры используемой крепи. Приведем пример использования разработанной вычислительной программы в условиях Кукисвумчоррского месторождения апатит-нефелиновых руд.

Основные параметры численного моделирования следующие:

- угол падения волны 0° ;
- приближенная энергия, выделяемая при взрыве 2 ГДж;
- приближенный радиус взрыва 50 м;
- начальные напряжения 13 МПа;
- масса взрывчатого вещества при ведении буровзрывных работ 51 т;
- глубина заложения горной выработки 500 м;
- количество слоев, окружающих выработку, характеристики которых учитывались — 3;
- размеры выработки $8 \times 5 \text{ м}^2$.

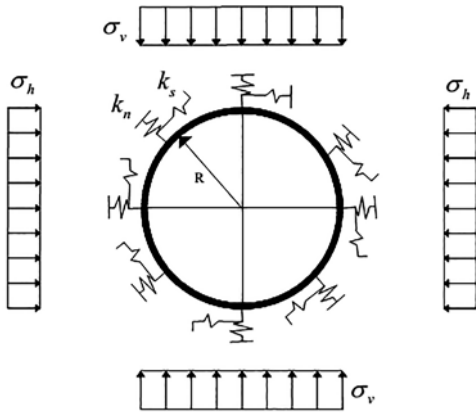


Рис. 6. Расчетная схема МГР: R – радиус обделки тоннеля; k_n и k_s – коэффициенты нормальной и касательной жесткости пружин; σ_v и σ_h – вертикальное и горизонтальное напряжения

Fig. 6. Analytical model: R – tunnel lining radius; k_n and k_s – normal and shear stiffness coefficients of springs; σ_v and σ_h – vertical and horizontal stresses

Рис. 3 показывает, что компонента вектора скорости v_{11} не превышает 125 см/с, а значит, учитывая исследования работы [15], полученные результаты соответствуют 4-му уровню обеспечения безопасности. При таком уровне обеспечения безопасности возможны лишь незначительные повреждения горной выработки (увеличение диаметра трещин и заколов с возможным обрушением отдельных кусков породы в выработку).

Большой интерес исследователей вызывает метод гиперстатических реакций (МГР), – один из современных эффективных методов расчета напряженного состояния различных строительных конструкций, в том числе, обделок тоннелей метрополитена [16, 17]. В зарубежной

научной литературе данный метод принято обозначать HRM (Hyperstatic Reaction Method). Для учета влияния стыков между сегментами обделки в рассматриваемом методе обделки тоннеля разделяются на сегменты [18]. Зависимость между параметрами напряженного состояния каждого сегмента обделки, рассчитанными в локальной системе координат, устанавливается при помощи формул перехода к глобальной системе координат. Определение вектора перемещений обделок тоннеля устанавливается формированием глобальной матрицы жесткости всей рассматриваемой конструкции с учетом наличия стыков и влияния окружающего породного массива. Поэтому, глобальная матрица жесткости получена с учетом локальных матриц жесткости каждого отдельного сегмента рассматриваемой конструкции [19]. Расчетная схема, применяемого в статье метода [16], с учетом введенных необходимых модификаций, представлена на рис. 6.

В исследованиях некоторых ученых как в России, так и за рубежом в новом варианте МГР для учета относительной жесткости сегмента и вращательной жесткости каждого концевое соединения вводится «фактор неподвижности» [19]. Данная величина широко применяется в задачах строительной механики, и для полужесткого соединения рассчитывается по формуле:

$$r_k = \frac{K_{RO}L_k}{K_{RO}L_i + 3E_sJ_s}, \quad (5)$$

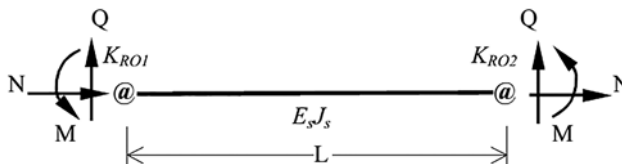


Рис. 7. Расчетная схема сегмента (балки-элемента)

Fig. 7. Computation model of beam element

где K_{RO} – вращательная жесткость пружины концевое соединения; E_s – модуль Юнга материала сегмента; J_s – момент инерции сегмента; L_k – длина k -го сегмента (рис. 7).

Таким образом, значение r_k для полужесткого соединения зависит от вращательной жесткости каждого концевое соединения и находится в интервале $r_k \in (0, 1)$.

Отметим, что в МГР сегментные части обделки взаимодействуют по принципу полужесткого соединения, когда изменения жесткости конструкции под действием различных нагрузок происходит непрерывно.

В матрицу жесткости k -го балки-элемента C_k (иногда ее называют матрицей коррекции) с двумя полужесткими концевыми соединениями на основе полученной расчетной схемы вносятся незначительные изменения, тогда она задается в виде [16]:

$$C_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4r_2 - 2r_1 + r_1r_2}{4 - r_1r_2} & \frac{-2L_k r_1(1 - r_2)}{4 - r_1r_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6(r_1 - r_2)}{L_k(4 - r_1r_2)} & \frac{3r_1(2 - r_2)}{4 - r_1r_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4r_1 - 2r_2 + r_1r_2}{4 - r_1r_2} & \frac{2L_k r_2(1 - r_1)}{4 - r_1r_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6(r_1 - r_2)}{L_k(4 - r_1r_2)} & \frac{3r_2(2 - r_1)}{4 - r_1r_2} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

В статье напряжение сдвига определяется по формуле [15]:

$$\tau = G \gamma_c, \quad (7)$$

где G – модуль сдвига грунта, МПа; γ_c – деформация сдвига, %.

В статье, с учетом используемого метода, реализовано узловое соединение между собой сегментов. Так динамические нагрузки от воздействия сейсмических волн на сжатие приложены вдоль направления балки, а на растяжение – в перпендикулярном направлении, то наибольшие нагрузки, возникающие от сдвиговых напряжений, полученные предложенным методом отличаются от значений, полученных другими авторами по другим методам [20, 21]. На основе используемой схемы действия сейсмических нагрузок на обделку тоннеля в МГР горизонтальные нагрузки действуют в противоположных направлениях,

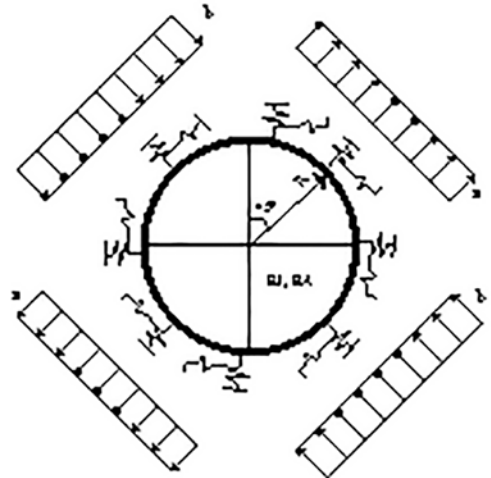


Рис. 8. Параметры внешних сил a и b
Fig. 8. External force parameters a and b

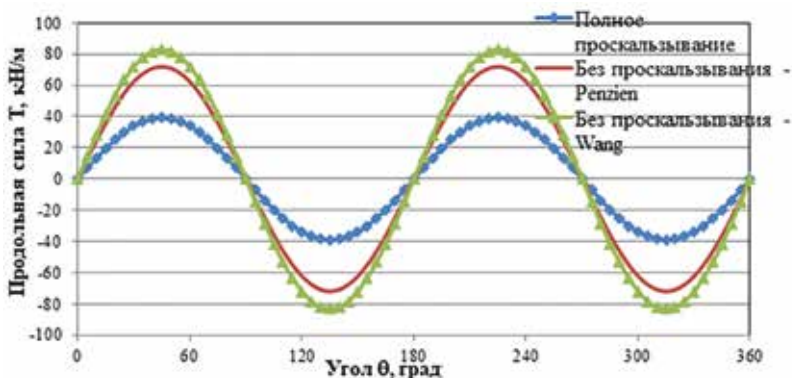


Рис. 9. Зависимость продольной силы T , кН/м от угла θ , град.

Fig. 9. Longitudinal force T , kN/m, versus angle θ , degrees

а все внешние нагрузки поворачиваются против часовой стрелки на угол, равный 45° . Для учета внешних нагрузок при сейсмическом воздействии на обделку тоннеля в МГР вводятся параметры a и b (рис. 8).

Анализ расчетов значений параметров a и b , учитывающих внешние нагрузки, вызванные сейсмическим воздействием напряжений сдвига τ показал, что параметр b равен $(5/4)\tau$, а параметр a зависит от радиуса тоннеля и определяется из следующего соотношения (эмпирические значения параметров a и b приняты как в работах [1, 18, 20]):

$$a = (0,885 - 0,7 \ln R) \cdot \tau. \quad (8)$$

Численный расчет и полученные результаты

В метрополитенах крупных мегаполисов применяется большое разнообразие типов обделок тоннелей. В качестве обделок тоннелей мелкого заложения метрополитена Ханоя применяются сборные железобетонные блоки. Значение модуля Юнга материала обделок принимается равным $E_1 = 36\,750$ МПа; величина коэффициента Пуассона составляет $\nu_1 = 0,151$; толщина обделок метрополитена равна $l = 0,35$ м.

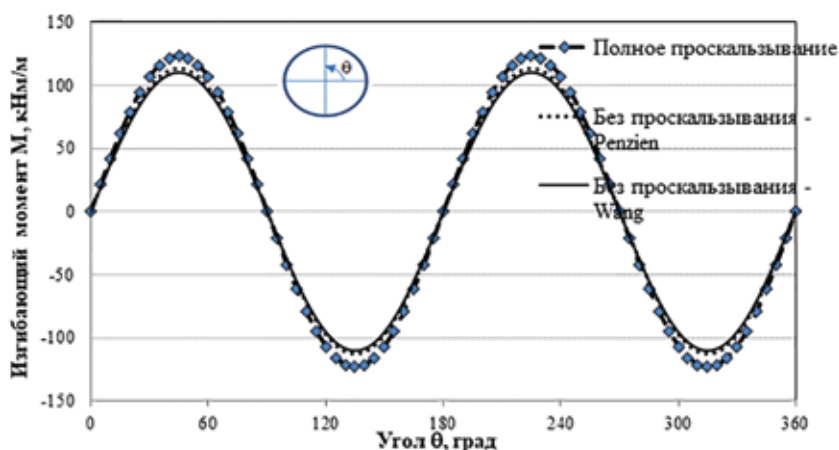


Рис. 10. Зависимость изгибающего момента M , кНм/м от угла θ , град.

Fig. 10. Bending moment M , kNm/m, versus angle θ , degrees

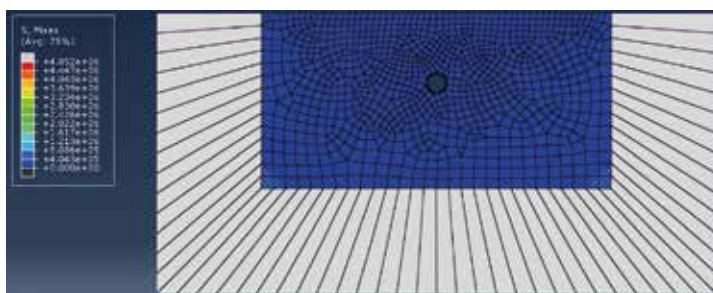


Рис. 11. Двумерный вариант конечно-элементной модели тоннеля
 Fig. 11. Two-dimensional variant of finite element model of tunnel

В статье определено напряженное состояние цилиндрической тоннельной обделки. Результаты численных расчетов изгибающих моментов и продольных сил в тоннельных обделках приведены на рис. 9 и 10. Полученные численные результаты деформаций и напряжений обделок тоннелей метрополитена Ханоя под воздействием сейсмических волн землетрясений широко сравнивались с результатами, полученными разными учеными по другим методам расчета [22 – 24].

Метод гиперстатических реакций применялся для расчета напряженного состояния обделки тоннелей в двух вариантах (либо обделка тоннеля представляет собой монолит, либо имеются стыки). Результаты многочисленных расчетов для этих случаев перемещений, сил и

моментов приведены в работах [1, 18]. Для полученных численных расчетов была разработана и успешно апробирована конечно-элементная модель с реализацией последней в программной среде SIMULIA ABAQUS (рис. 11). При этом отметим, что породный массив моделируется как бесконечная область.

На рис. 12 и 13 приведены результаты численных расчетов. За основу взяты точные механические и геометрические характеристики тоннелей Ханойского метрополитена.

Применяя усовершенствованный численно-аналитический метод [18], удалось определить максимальные значения нормального напряжения $\sigma_{\max} = 5,757$ МПа. Аналогичная задача решалась и при помощи численного метода конечных элементов, реализованного

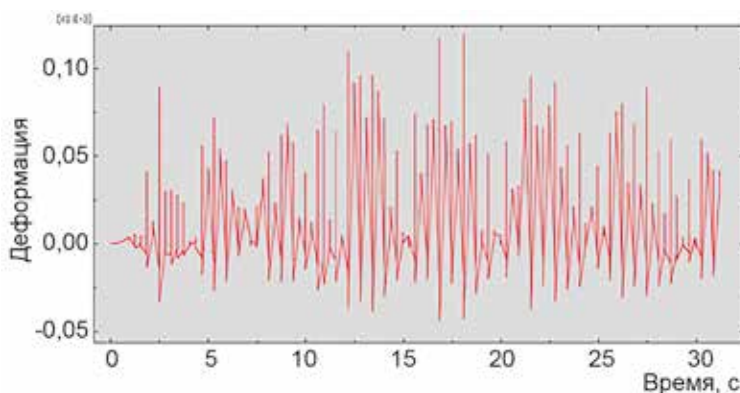


Рис. 12. Зависимость деформаций обделки тоннеля от времени
 Fig. 12. Time history of strains in tunnel lining

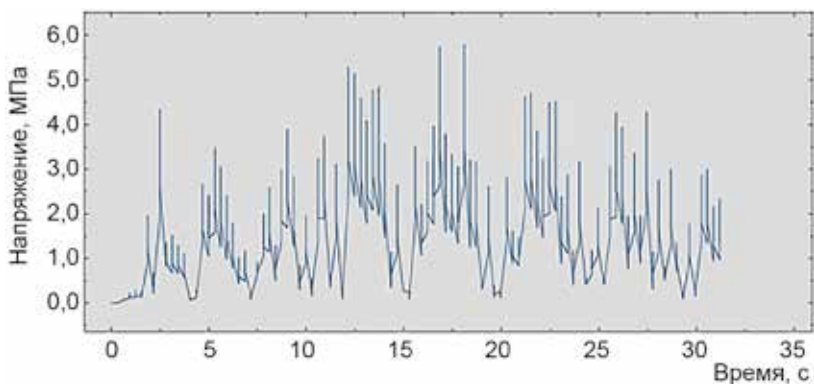


Рис. 13. Зависимость возникающих в обделке тоннеле нормальных напряжений от времени
 Fig. 13. Time history of normal stresses in tunnel lining

в известном программном комплексе ABAQUS, при этом максимальное нормальное напряжение составило $\sigma_{\max} = 5,782$ МПа. Значит, применение указанных методов при решении ряда важных прикладных задач геодинамики вполне оправдано, так как полученная погрешность не превышала 5%. Сравнение полученных результатов показывает, что рассчитанные максимальные напряжения в тоннельной обделке метрополитена соответствуют безопасному уровню работы сооружения, определяемому нормативными документами. Таким образом, тоннели Ханойского метрополитена находятся в надежном состоянии и устойчивы к землетрясениям магнитудой до 8 баллов по шкале Рихтера [25].

Заключение

В работе рассмотрено математическое моделирование воздействия сейсмических волн на породный массив, включающий подземное сооружение, в двух вариантах: антропогенный процесс (сейсмическая волна возникает при

ведении буровзрывных работ) и эндогенный процесс (сейсмическая волна возникает от тектонического движения земной коры).

В первом случае, авторами построена математическая модель воздействия сейсмозрывной волны на слоистый массив горных пород, включающий горизонтальную горную выработку. На основе полученной математической модели разработана вычислительная программа для определения основных параметров НДС слоистого массива горных пород с горизонтальной выработкой при воздействии сейсмозрывной волны.

Во втором случае, модифицирован и успешно апробирован численно-аналитический метод расчета воздействия сейсмических волн землетрясений на обделки тоннелей метрополитена с учетом влияния стыков между их частями. Численные расчеты воздействия сейсмических волн землетрясений с максимальной интенсивностью показали удовлетворительную сходимость с имеющимися натурными замерами землетрясения (Ханой, 1983).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Господариков А. П., Нгуен Чи Тхань О некоторых подходах определения напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя с учетом влияния сейсмических

волн землетрясений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 6. — С. 244–252.

2. *Protosenya A. G., Verbilov P. E., Karasev M. A.* Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018, no. 11, pp. 1962–1972.

3. *Трушко В. Л., Протосеня А. Г.* Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 162–166. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162.

4. *Зуев Б. Ю.* Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 542–552. DOI:10.31897/PMI.2021.4.7.

5. *Cai W., Dou L., Si G., Hu Y.* Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses // Engineering. 2021, vol. 7, no. 5, pp. 687–700. DOI: 10.1016/j.eng.2020.03.017.

6. *Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S.* Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // Eurasian Mining. 2019, no. 1, pp. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02.

7. *Глушихин Ф. П., Кузнецов Г. Н., Шклярский М. Ф., Павлов В. Н., Золотников М. С.* Моделирование в геомеханике. — М.: Недра, 1991. — 240 с.

8. *Господариков А. П., Выходцев Я. Н., Зацепин М. А.* Математическое моделирование воздействия сейсмозрывных волн на горный массив, включающий выработку // Записки Горного института. — 2017. — Т. 226. — С. 405–411. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.405.

9. *Карасев М. А., Сотников Р. О.* Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 626–638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

10. *Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. Н.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. — 400 с.

11. *Bo Yan, Xinwu Zeng, Yuan Li* Subsection forward modeling method of blasting stress wave underground // Mathematical Problems in Engineering. 2015, vol. 2015, article 678468. DOI: 10.1155/2015/678468.

12. *Валландер С. В.* Лекции по гидроаэромеханике. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. — 304 с.

13. *Литвиненко В. С., Двойников М. В.* Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 105–112. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.105.

14. *Nguyen Tai Tien, Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D.* Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

15. *Эткин М. Б., Азаркович А. Е.* Взрывные работы в энергетическом и промышленном строительстве: Научно-практическое руководство. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 317 с.

16. *Du D., Dias D., Do N. A.* Lining performance optimization of sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method // Computers and Geotechnics. 2020, vol. 117, article 103279.

17. *Oreste P. P., Spagnoli G., Ramos C. A. L., Sebillé L.* The hyperstatic reaction method for the analysis of the sprayed concrete linings behavior in tunneling // Geotechnical and Geological Engineering. 2018, vol. 36, pp. 2143–2169.

18. *Thanh Nguyen Chi, Gospodarikov A. P.* 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, pp. 179–188. DOI: 10.1007/s11803-020-0555-0.

19. Burns S. A., Arora J. S., Balling R., Cheng F. Y., Estes A. C., Foley C. M. Recent advances in optimal structural design / Structural Optimization: Recent Developments and Applications. USA, 2002, 384 p.

20. Naggar H. E., Hinchberger S. D., Hesham M., Naggar E. I. Simplified analysis of seismic in-plane stresses in composite and jointed tunnel linings // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2008, vol. 28, no. 12, pp. 1063–1077. DOI: 10.1016/j.soildyn.2007.12.001.

21. Нгуен Тай Тиен, Карасев М. А. Расчет оптимальных геометрических параметров тоннеля квазипрямоугольного поперечного очертания по силовому фактору // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 59–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59.

22. Nguyen Tai Tien, Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior // ICE Proceedings Geotechnical Engineering. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

23. Wang J. Seismic design of tunnels. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc. New York, 1993. 159 p.

24. Penzien J., Wu C. Stresses in linings of bored tunnels // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1998, vol. 27, no. 3, pp. 283–300. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199803)27:3<283::AID-EQE732>3.0.CO;2-T.

25. He S., Chen T., Vennes I., He X., Song D., Chen J., Mitri H. Dynamic modelling of seismic wave propagation due to a remote seismic source: a case study // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, vol. 53, pp. 5177–5201. DOI: 10.1007/s00603-020-02217-w. **MIAB**

REFERENCES

1. Gospodarikov A. P., Nguyen Chi Thanh Some approaches determine the stress state of lining of underground tunnels of hanoi taking into account influence of seismic waves of earthquakes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 6, pp. 244–252. [In Russ].

2. Protosenya A. G., Verbilo P. E., Karasev M. A. Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology.* 2018, no. 11, pp. 1962–1972.

3. Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute.* 2019, vol. 236, pp. 162–166. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162.

4. Zuev B. Yu. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute.* 2021, vol. 250, pp. 542–552. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2021.4.7.

5. Cai W., Dou L., Si G., Hu Y. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses. *Engineering.* 2021, vol. 7, no. 5, pp. 687–700. DOI: 10.1016/j.eng.2020.03.017.

6. Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining.* 2019, no. 1, pp. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02.

7. Glushikhin F. P., Kuznetsov G. N., Shklyarskiy M. F., Pavlov V. N., Zlotnikov M. S. *Modelirovanie v geomekhanike* [Modeling in geomechanics], Moscow, Nedra, 1991, 240 p.

8. Gospodarikov A. P., Vykhodtsev Y. N., Zatsepin M. A. Mathematical modeling of seismic explosion waves impact on rock mass with a working. *Journal of Mining Institute.* 2017, vol. 226, pp. 405–411. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.405.

9. Karasev M. A., Sotnikov R. O. Prediction of the stress state of the shotcreting support under repeated seismic load. *Journal of Mining Institute.* 2021, vol. 251, pp. 626–638. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

10. Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Ya., Kraiko A. N., Prokopov G. P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics], Moscow, Nauka, 1976, 400 p.

11. Bo Yan, Xinwu Zeng, Yuan Li Subsection forward modeling method of blasting stress wave underground. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015, vol. 2015, article 678468. DOI: 10.1155/2015/678468.
12. Vallander S. V. *Leksii po gidroaeromehanike* [Lectures on hydroaeromechanics], Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGU, 2005, 304 p.
13. Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V. Methodology for determining the parameters of drilling mode for directional straight sections of well using screw downhole motors. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 105–112. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.105.
14. Nguyen Tai Tien, Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.
15. Etkin M. B., Azarkovich A. E. *Vzryvnye raboty v energeticheskom i promyshlennom stroitel'stve: Nauchno-prakticheskoe rukovodstvo* [Blasting in power-generating and industrial construction. scientific and practical guidance], Moscow, Izd-vo MGGU, 2004, 317 p.
16. Du D., Dias D., Do N. A. Lining performance optimization of sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method. *Computers and Geotechnics*. 2020, vol. 117, article 103279.
17. Oreste P. P., Spagnoli G., Ramos C. A. L., Sebille L. The hyperstatic reaction method for the analysis of the sprayed concrete linings behavior in tunneling. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018, vol. 36, pp. 2143–2169.
18. Thanh Nguyen Chi, Gospodarikov A. P. 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, pp. 179–188. DOI: 10.1007/s11803-020-0555-0.
19. Burns S. A., Arora J. S., Balling R., Cheng F. Y., Estes A. C., Foley C. M. Recent advances in optimal structural design. *Structural Optimization: Recent Developments and Applications*. USA, 2002, 384 p.
20. Naggar H. E., Hinchberger S. D., Hesham M., Naggar E. I. Simplified analysis of seismic in-plane stresses in composite and jointed tunnel linings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2008, vol. 28, no. 12, pp. 1063–1077. DOI: 10.1016/j.soildyn.2007.12.001.
21. Nguyen Tai Tien, Karasev M. A. Optimization of geometry design of quasi-rectangular section tunnel by the force criterion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 6, pp. 59–71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59.
22. Nguyen Tai Tien, Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior. *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.
23. Wang J. *Seismic design of tunnels*. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc. New York, 1993. 159 p.
24. Penzien J., Wu C. Stresses in linings of bored tunnels. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1998, vol. 27, no. 3, pp. 283–300. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199803)27:3<283::AID-EQE732>3.0.CO;2-T.
25. He S., Chen T., Vennes I., He X., Song D., Chen J., Mitri H. Dynamic modelling of seismic wave propagation due to a remote seismic source: a case study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, pp. 5177–5201. DOI: 10.1007/s00603-020-02217-w.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Господариков Александр Петрович¹ — д-р техн. наук,
 зав. кафедрой, e-mail: Gospodarikov_AP@pers.spmi.ru,
 ORCID ID: 0000-0003-1018-6841,
 Зацепин Михаил Александрович² — канд. физ.-мат. наук,
 доцент, e-mail: Zatsepin_MA@pers.spmi.ru,
 ORCID ID: 0000-0002-6304-8349,

Выходцев Ярослав Николаевич — канд. техн. наук,
старший инженер-программист,
T-Systems Multimedia Solutions,
e-mail: 999fff@gmail.com,

Нгуен Чи Тхань — канд. техн. наук, доцент,
Институт морской геологии и геофизики
Ханойского университета горного дела и геологии,
e-mail: nguyenthanh.xdctn47@gmail.com,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Зацепин М.А., e-mail: Zatsepin_MA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.P. Gospodarikov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair,

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

ORCID ID: 0000-0003-1018-6841,

*M.A. Zatsepin*¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),

Assistant Professor, e-mail: Zatsepin_MA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-6304-8349,

Ya.N. Vykhodtsev, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Engineer Programmer,

T-Systems Multimedia Solutions, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: 999fff@gmail.com,

C.T. Nguen, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Institute of Marine Geology and Geophysics,

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam,

e-mail: nguyenthanh.xdctn47@gmail.com,

¹ Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: Zatsepin M.A., e-mail: Zatsepin_MA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 24.12.2021; получена после рецензии 20.04.2022; принята к печати 10.06.2022.

Received by the editors 24.12.2021; received after the review 20.04.2022; accepted for printing 10.06.2022.



ОТ РЕДАКЦИИ

В Горном информационно-аналитическом бюллетене № 6, 2022 в статье авторов Лях Д.Д., Худяковой И.Н., Иванова С.Л. «Обоснование параметров модуля формирования торфяного сырья и энергомассовых характеристик комплекса оборудования по добыче и переработке торфа» на с. 93, 183 допущены технические ошибки:

№ стр.	Опубликовано	Должно быть
93	Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery	Substantiation of parameters for the formation of peat raw materials and energy-mass characteristics of a complex of equipment for the extraction and processing of peat
183	Lyakh D.D., Khudyakova I.N., Ivanov S.L. Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery.....93	Lyakh D.D., Khudyakova I.N., Ivanov S.L. Substantiation of parameters for the formation of peat raw materials and energy-mass characteristics of a complex of equipment for the extraction and processing of peat.....93