

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ****DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL  
AND ENVIRONMENT SYSTEMS**<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352>  
УДК 51-72+622.83+539.3+004.942Оригинальная статья**С. Н. Лопатин<sup>1,2\*</sup>, М. А. Журавков<sup>1</sup>, П. С. Передрий<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, 220030, Минск, Республика Беларусь,*<sup>2</sup>*Харбинский политехнический университет,  
ул. Сидаджи, 150001, Харбин, Китайская Народная Республика***КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ  
ВЫРАБОТОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**Аннотация.** Продемонстрирована методика комплексной оценки устойчивости подземных горных выработок в массивах соляных пород. Рассмотрены различные варианты залегания пластов полезного ископаемого, а также наиболее популярные меры охраны подземных выработок, такие как анкеры, компенсационные щели и железобетонные крепи. Предлагаемая методика основана на использовании гибридного численно-аналитического метода для расчета напряженно-деформированного состояния горнотехнических систем, а также применении оригинального комплексного критерия оценки предельного состояния массивов горных пород. В результате обобщения выполненных исследований выделены основные факторы, влияющие на устойчивость подземных выработок: глубина расположения выработки, физико-механические свойства массива горных пород и его горно-геологическое строение, а также применяемые меры охраны. Установлена степень влияния каждого из этих факторов на устойчивость рассматриваемых выработок. На примере решения ряда модельных задач показано, что предлагаемая методика может использоваться для полной и достоверной оценки состояния массивов горных пород в окрестности подземных выработок, а также прогнозирования устойчивости подземных горнотехнических сооружений при различных условиях.

**Ключевые слова:** горные выработки, массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, предельное состояние, метод конечных элементов

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Лопатин Сергей Николаевич* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета; научный сотрудник, факультет мехатроники Харбинского политехнического университета. <https://orcid.org/0000-0001-5958-7799>. E-mail: [lopatisn@tut.by](mailto:lopatisn@tut.by); *Журавков Михаил Анатольевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета. <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>. E-mail: [zhuravkov@bsu.by](mailto:zhuravkov@bsu.by); *Передрий Павел Сергеевич* – стажер младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории прикладной механики Белорусского государственного университета. E-mail: [ravelpiaredriy@gmail.com](mailto:ravelpiaredriy@gmail.com)

**Вклад авторов:** *Лопатин Сергей Николаевич* – создание концепции, компьютерных моделей и проведение численных экспериментов, анализ и обобщение результатов исследования, написание и редактирование текста рукописи; *Журавков Михаил Анатольевич* – создание концепции, анализ и обобщение результатов исследования, написание и редактирование текста рукописи; *Передрий Павел Сергеевич* – построение компьютерных моделей и проведение численных экспериментов, работа с литературой и графическое оформление статьи, написание и редактирование текста рукописи.

© Лопатин С. Н., Журавков М. А., Передрий П. С., 2024

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

**Для цитирования:** Лопатин, С. Н. Комплексная оценка устойчивости подземных горных выработок при различных горнотехнических условиях / С. Н. Лопатин, М. А. Журавков, П. С. Передрий // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 340–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352>

Поступила в редакцию: 14.10.2024

Доработанный вариант: 30.11.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

### Original article

**Siarhei N. Lapatsin<sup>1,2\*</sup>, Michael A. Zhuravkov<sup>1</sup>, Pavel S. Piaredryi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Harbin Institute of Technology, Xidazhi Str., 150001, Harbin, China

## **COMPLEX ESTIMATION OF THE UNDERGROUND EXCAVATIONS STABILITY IN VARIOUS MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS**

**Abstract.** The paper demonstrates a methodology of a complex stability estimation for underground mining excavations located in salt rock masses. Various geological structures of the rock mass, as well as the most popular safety measures for underground excavations support such as anchors, expansion gaps and reinforced concrete are considered. The proposed methodology is based on a hybrid numerical-analytical method for the determination of the stress-strain state of geotechnical systems as well as on an original complex limit state criterion for rock masses. As the result of the study the main factors influencing the stability of excavations were highlighted and generalized. These factors are: mining depth, mechanical properties of rock mass, its geological structure and safety measures. The degree of the importance of each mentioned factor is established. A number of model problems are solved to prove the efficiency of the proposed method for complete and reliable estimation of rock mass state in the vicinity of underground excavations, as well as predicting the stability of geotechnical structures under various conditions.

**Keywords:** mining excavations, rock mass, stress-strain state, limit state, finite element method

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Siarhei N. Lapatsin* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics at Belarusian State University; Postdoctoral Researcher of School of Mechatronics Engineering at Harbin University of Technology. <https://orcid.org/0000-0001-5958-7799>. E-mail: lopatinsn@tut.by; *Michael A. Zhuravkov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics at Belarusian State University. <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>. E-mail: zhuravkov@bsu.by; *Pavel S. Piaredryi* – Junior Researcher trainee of the Applied Mechanics Laboratory at Belarusian State University. E-mail: pavelpiaredryi@gmail.com

**Contribution of the authors:** *Siarhei N. Lapatsin* – conceptualizing, creating computer models and conducting numerical experiments, analyzing and summarizing the results of the study, writing and editing the text of the manuscript; *Michael A. Zhuravkov* – conceptualizing, analyzing and summarizing the results of the study, writing and editing the text of the manuscript; *Pavel S. Piaredryi* – developing computer models and conducting numerical experiments, working with literature and graphic design of the article, writing and editing the text of the manuscript.

**For citation:** Lapatsin S. N., Zhuravkov M. A., Piaredryi P. S. Complex estimation of the underground excavations stability in various mining and geological conditions. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 340–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352>

Received: 14.10.2024

Modified: 30.11.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

**Введение.** Проблема прогнозирования устойчивости подземных горнотехнических сооружений, таких как горные выработки, подземные инженерные конструкции и т. д., является одной из ключевых в геомеханике и геотехнике, поскольку корректное решение данной задачи обеспечивает безопасность эксплуатации горнотехнических сооружений, а также эффективность добычи полезных ископаемых в шахтах и рудниках [1, 2].

Подходов к решению задач данного класса предложено достаточно много, вместе с тем проблема точного и достоверного прогнозирования устойчивости подземных сооружений актуальна и сегодня и широко обсуждается в научной и технической литературе [2–4]. В настоящее время при решении задач данного класса одним из наиболее популярных и эффективных методов является численное моделирование поведения массивов горных пород в окрестности горных выработок в различных горнотехнических условиях [3, 5, 6]. Помимо этого, достаточно представительным является класс работ, в которых строятся стохастические и вероятностные модели прогнозирования устойчивости выработок на основе обработки данных экспериментальных исследований (см., например, [7, 8]). Значительное количество исследований связано с совершенствованием и разработкой новых подходов и методик к решению такого типа задач, к построению новых аналитических решений [9, 10].

Несмотря на повышенный интерес к проблеме достоверного и надежного прогнозирования устойчивости и долговечности подземных выработок, до сих пор не существует универсального метода решения задач данного класса. Поэтому актуальным направлением исследований является разработка универсального алгоритма оценки предельного состояния горнотехнических сооружений, основанного на применении комплексного критерия предельного состояния.

Следует отметить, что в геомеханике понятия прочности и устойчивости отличаются от общепринятых классических определений, принятых в строительной механике и сопротивлении материалов [12, 13]. Данное обстоятельство связано с тем, что нарушение сплошности, которое проявляется в виде образования макротрещин или систем трещин, а также формирования блочной структуры в рассматриваемой области массива горных пород, не всегда приводит к полному разрушению всей области и не во всех случаях рассматривается как эксплуатационно-непригодное состояние горнотехнической системы [12–15]. Так, при решении прикладных задач механики горных пород и массивов образование локальных зон нарушения сплошности массива (зон разрушения) является допустимым, если это не приводит к нарушению глобальной устойчивости всей выделенной области массива горных пород [14, 15].

*Цель работы* – построение методики оценки устойчивости подземных выработок при различных горнотехнических условиях.

К задачам исследования относятся построение расчетных методик определения напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемых горнотехнических систем и оценка их предельного состояния.

**Постановка задачи об устойчивости подземного сооружения при различных горнотехнических условиях.** Под *устойчивостью подземных сооружений* в работе понимается способность таких сооружений сохранять эксплуатационно-пригодное состояние на заданный срок без перехода вмещающего массива горных пород в предельное состояние под действием внешних нагрузок [11–13]. При этом под *предельным состоянием* (ПС) породных массивов и горнотехнических систем понимается такое их состояние, при котором в рассматриваемой области массива горных пород или в элементах горнотехнического сооружения имеют место значительные по размерам зоны нарушения критериев ПС (зоны нарушения сплошности, разрушения, трещиноватости и т. д.), совокупность которых может привести к полному разрушению, потере устойчивости рассматриваемой области массива горных пород или переходу породной толщи в данной области в новое структурное состояние [14, 15].

Оценку устойчивости горнотехнической системы «подземная выработка – вмещающий массив» выполняли при различных горнотехнических условиях, к которым относятся геометрия и размеры поперечного сечения выработки, применяемые меры охраны<sup>1</sup> (анкерное крепление, компенсационные щели, железобетонная крепь и др.), а также геологическое строение вмещающего массива и его физико-механические свойства [16].

<sup>1</sup> Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении: утв. ОАО «Беларуськалий» 17.04.18: по состоянию на 31 янв. 2022 г. Солигорск: СИПР, 2018. 206 с.

В рамках исследования для демонстрации эффективности использования разработанного алгоритма комплексной оценки НДС и ПС горнотехнических систем выполнены численные расчеты для одиночной протяженной выработки арочного поперечного сечения в массиве калийных пород. Рассматривались различные ситуации расположения выработки в массиве горных пород.

На рис. 1 схематично представлены характерные примеры модельных схем расположения выработки. Моделируемые ситуации размещения выработок в массиве горных пород являются распространенными при проведении горных работ на калийных месторождениях Республики Беларусь<sup>1</sup> и других стран [13, 14].

Выработка в случаях, приведенных на рис. 1, *a, b*, располагается в мощном слое соляных пород. Мощность слоя в данном случае составляет более 10 м, что позволяет рассматривать вмещаю-

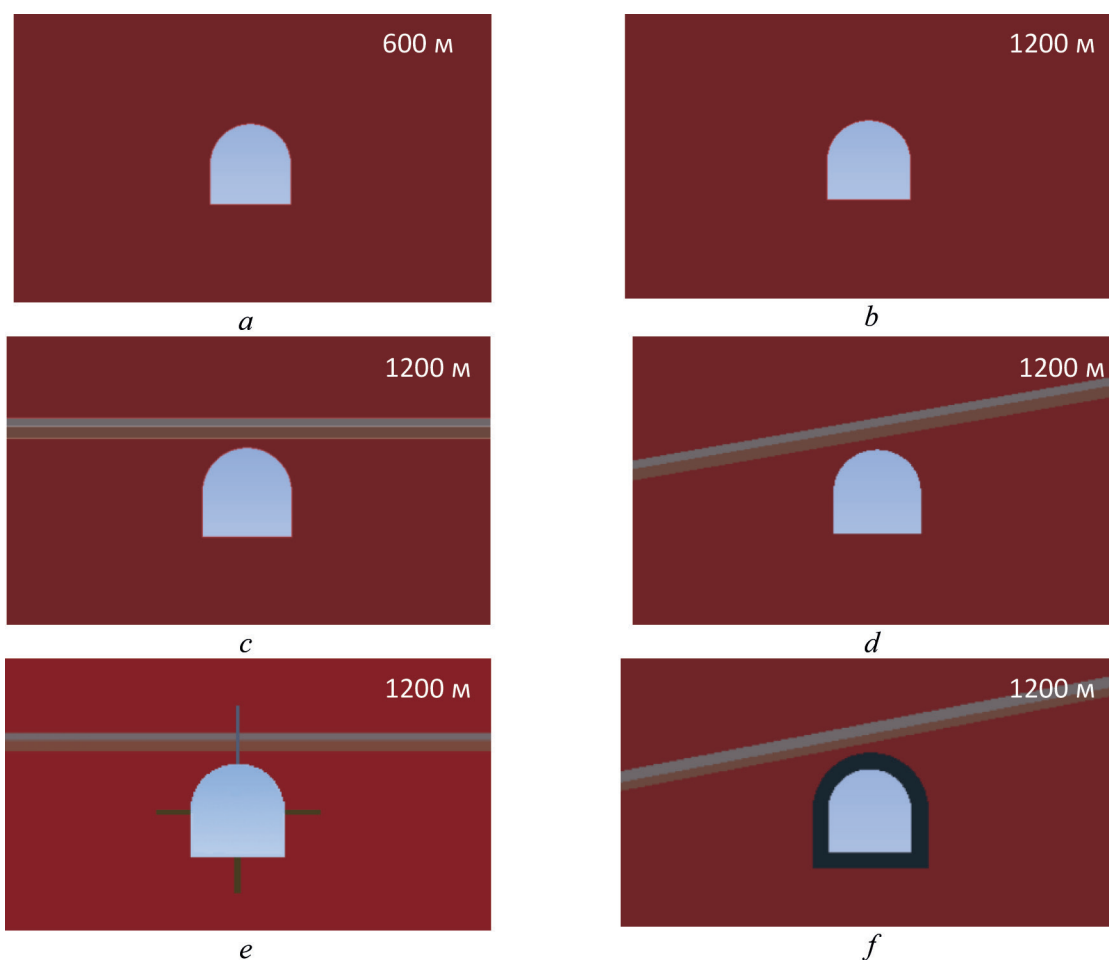


Рис. 1. Примеры схем рассматриваемых горнотехнических систем: *a* – выработка в мощном слое каменной соли на глубине 600 м; *b* – выработка в мощном слое каменной соли на глубине 1200 м; *c* – выработка в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м; *d* – выработка в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м с наклонными слоями; *e* – выработка в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м, охраняемая анкерами и компенсационными щелями; *f* – выработка в слоистом соляном массиве с наклонными слоями на глубине 1200 м, закрепленная железобетонной крепью

Fig. 1. Examples of considered geotechnical systems: *a* – excavation in the rock salt mass at the depths of 600 m; *b* – excavation in the rock salt mass at the depths of 1200 m; *c* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m; *d* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers; *e* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m supported by anchors and compensational holes; *f* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers, supported by reinforced concrete

<sup>1</sup> Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении.

щий массив как однородный при моделировании. В остальных случаях в кровле выработок моделируется наличие слоистости. При этом выработки также располагаются в мощном слое соляных пород, а слоистость представлена несколькими слоями мощностью 0,3–0,5 м с различными физико-механическими свойствами. В частности, рассматривалось прослаивание сильвинита, глины аргиллитоподобной и каменной соли. Сама выработка во всех рассматриваемых случаях находится в мощном слое каменной соли. Над выработкой на расстоянии 0,3 м располагается слой глины аргиллитоподобной мощностью 0,4 м, который переслаивается со слоем сильвинита мощностью 0,3 м. Над слоем сильвинита снова располагается мощный слой каменной соли. Отметим, что такое геологическое строение массива неблагоприятно для ведения горных работ по причине наличия неустойчивого слоя пластичной глины, который имеет низкие прочностные характеристики. В ситуациях, представленных на рис. 1, *c, d*, слои залегают горизонтально, а в случаях, показанных на рис. 1, *e, f*, слои располагаются под углом  $10^\circ$  к горизонту. В схеме на рис. 1, *e* показана ситуация наличия по контуру выработки компенсационных щелей и анкерного крепления. Длина компенсационных щелей составляет 1,1 м, ширина – 0,13 м. Щели пройдены в боках и в почве выработки. Крепь анкерная металлическая винтовая (КАМВ) длиной 1,8 м установлена в кровле выработки<sup>1</sup>. В случае, представленном на рис. 1, *f*, в качестве меры охраны используется железобетонная крепь мощностью 0,6 м на основании бетона класса В30<sup>2</sup>.

Определение НДС горнотехнических систем согласно схемам расположения выработок на рис. 1, *a, b* достаточно широко представлено в научно-технической литературе (см., например, [17, 18]). Данные ситуации рассматриваются главным образом с целью сравнения результатов моделирования и для демонстрации использования предлагаемого алгоритма расчета областей ПС. Расчет НДС систем, представленных на рис. 1, *c, d*, является сложной задачей по причине необходимости прямого учета слоистости массива горных пород. В схемах на рис. 1, *e, f* присутствуют конструкционные элементы крепей горных выработок, что требует разработки специальных технологий выполнения численного моделирования. Определение НДС горнотехнических систем в этом случае значительно усложнено существенно различными свойствами породного массива и конструкционных элементов крепи выработки, а также необходимостью учета взаимодействия всех элементов горнотехнического сооружения друг с другом и со вмещающим массивом. Помимо этого, дополнительную сложность вызывает различие масштабов собственно горнотехнического сооружения и применяемых мер охраны и крепления. Так, характерные размеры сечений выработок и рассматриваемых участков вмещающего массива могут достигать метров или даже десятков метров, в то время как диаметр анкеров и ширина компенсационных щелей имеют размерность на порядок или несколько порядков меньше. Данное обстоятельство значительно усложняет генерацию конечно-элементных сеток и требует разработки специальных гибридных численно-аналитических алгоритмов расчета НДС таких систем (см., например, [17, 18]). Таким образом, расчет НДС сложных горнотехнических систем, представленных на рис. 1, *e, f*, является достаточно сложной задачей. Более того, расчет НДС не является конечным итогом решения задачи об определении устойчивости горнотехнической системы. Для определения устойчивости подземного сооружения на основании рассчитанного НДС выполняется анализ зон ПС.

В табл. 1 приведены физико-механические свойства используемых конструкционных материалов и горных пород, составляющих массив. Данные табл. 1 были использованы при проведении численных экспериментов для расчета НДС рассматриваемых горнотехнических систем.

**Алгоритм решения задачи и комплексный критерий предельного состояния.** Алгоритм расчета НДС горнотехнических систем рассматриваемого типа на основании метода конечных элементов и применения комплексного критерия предельного состояния описан в [14, 15]. Приведем его ключевые пункты:

<sup>1</sup> Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. С. 59–67.

<sup>2</sup> Там же. С. 11.



Т а б л и ц а 1. Физико-механические свойства горных пород и конструкционных материалов

Table 1. Mechanical properties of rocks and structural materials

Порода (материал)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел на сжатие, МПа	Предел на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, рад	Коэффициент сцепления, МПа
Глина аргиллитоподобная	2150	0,5616	0,4	6,30	1,0	0,81	1,25
Каменная соль	2300	22,8	0,19	22,8	1,8	1,047	3,8
Сильвинит	2300	1,64	0,29	32,0	1,0	1,22	2,83
Подстилаяющая соль	2300	2,00	0,35	35,2	2,0	1,10	4,20
Дерево	540	9	0,085	–	–	–	–
Бетон В30	2500	32,5	0,25	30	1	–	–
Сталь С250	7850	210	0,3	250	250	–	–

1) решение задачи об определении естественного НДС рассматриваемой области породного массива;

2) решение задачи об определении НДС породного массива при проходке исследуемой выработки;

3) решение задачи об определении НДС рассматриваемой горнотехнической системы при установке мер охраны и конструктивных элементов подземного сооружения;

4) определение зон предельного состояния во вмещающем массиве с использованием комплексного критерия предельного состояния;

Первые три этапа являются стандартными при решении рассматриваемого класса задач механики горных пород и массивов. Решение модельных задач на данных этапах выполнялось с использованием модели Гука упругого поведения изотропной среды и модели Кулона–Мора, позволяющей выявить в массиве области развитых линий скольжения [11, 12]. Оценка зон предельного состояния на этапе 4 осуществлялась при помощи комплексного критерия предельного состояния, математическая форма записи которого имеет следующий вид [14, 15]:

$$\begin{cases} [\sigma_3 \leq \sigma_c, \varepsilon_3 \leq \varepsilon_c] \text{ при } \mu \in (0,5; 1] \\ [|\sigma_1 - \lambda\sigma_3| \leq \sigma_c, \sqrt{I_2} \leq \alpha I_1 + s, \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \leq \varepsilon_c] \text{ при } \mu \in [-0,5; 0,5]. \\ [\sigma_1 \leq \sigma_t, \varepsilon_1 \leq \varepsilon_t] \text{ при } \mu \in (-0,5; -1] \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_1, \sigma_3$  – минимальное и максимальное главные напряжения;  $\sigma_c, \sigma_t$  – пределы прочности на сжатие и растяжение;  $\varepsilon_1, \varepsilon_3$  – максимальная и минимальная главные деформации;  $\varepsilon_c, \varepsilon_t$  – предельные деформации на сжатие и растяжение;  $\lambda = \sin\varphi/(1 - \sin\varphi)$ ;  $I_1, I_2$  – первый и второй инварианты тензора напряжений соответственно;  $\alpha$  и  $s$  – экспериментально выведенные параметры, зависящие от угла внутреннего трения  $\varphi$  и удельного сцепления  $C$ ;  $\mu$  – коэффициент Надаи–Лоде, вычисляемый по следующей формуле [11, 12]:

$$\mu = \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (2)$$

Значения коэффициента Надаи–Лоде находятся в интервале  $[-1; 1]$ . При этом, если  $\mu$  принадлежит интервалу  $[-1; -0,5)$ , то напряженное состояние соответствует состоянию обобщенного растяжения, в интервале  $[-0,5; 0,5]$  – состоянию обобщенного сдвига, а в интервале  $(0,5; 1,0)$  – состоянию обобщенного сжатия.

Описанный алгоритм является достаточно универсальным и позволяет оценивать прочность, устойчивость и долговечность различных типов подземных горнотехнических сооружений при широком диапазоне горнотехнических условий.

**Оценка устойчивости и долговечности исследуемых горных выработок.** На рис. 2 приведены картины распределения коэффициента Надаи–Лоде (2) для всех рассматриваемых схем. Видно, что в окрестности выработок в массиве формируется сложное напряженное состояние. Преобладающим является состояние обобщенного сжатия. Вместе с тем присутствуют значительные по размерам зоны обобщенного сдвига и обобщенного растяжения.

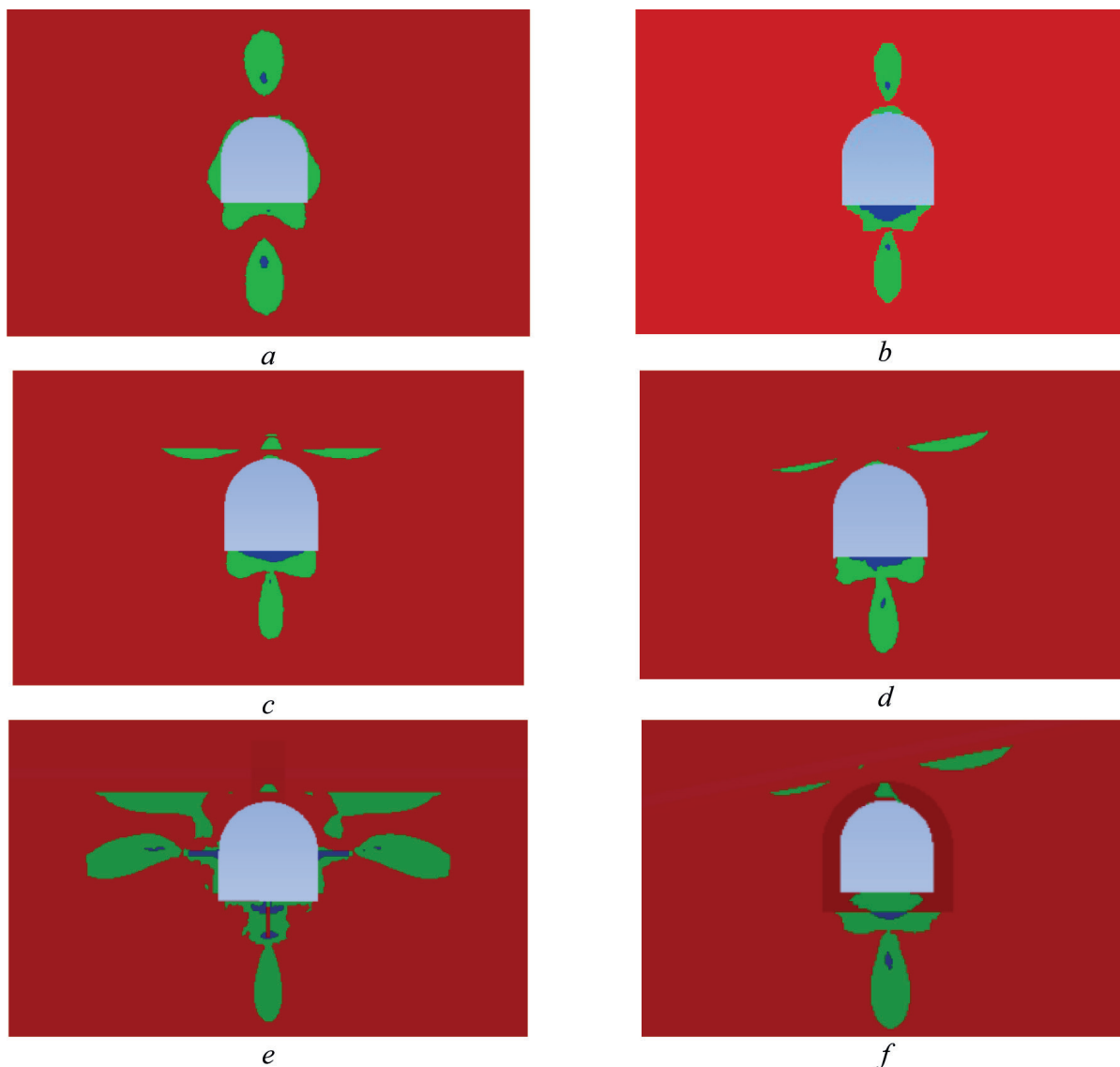


Рис. 2. Распределение коэффициента Надаи–Лоде в окрестности выработок: *a* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 600 м; *b* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 1200 м; *c* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м; *d* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м с наклонными слоями; *e* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м, охраняемой анкерами и компенсационными щелями; *f* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве с наклонными слоями на глубине 1200 м, закрепленной железобетонной крепью. Красный цвет – зоны обобщенного сжатия, зеленый цвет – зоны обобщенного сдвига, синий цвет – зоны обобщенного растяжения

Fig. 2. Distribution of the Nadai–Lode coefficient in the vicinity of excavations: *a* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 600 m; *b* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 1200 m; *c* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m; *d* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers; *e* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m supported by anchors and compensational holes; *f* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers, supported by reinforced concrete. Red colour – zones of generalized compression, green colour – zones of generalized shear, blue colour – zones of generalized tension

Данное обстоятельство подтверждает тот факт, что оценка состояния выработок должна производиться в соответствии с комплексным критерием, а не с использованием только одного какого-то критерия. Отметим, что глубина расположения выработки в массиве влияет на формирование сложного НДС во вмещающем массиве. Чем глубже находится выработка, тем более значительные по размерам зоны обобщенного растяжения формируются в ее подошве, что может

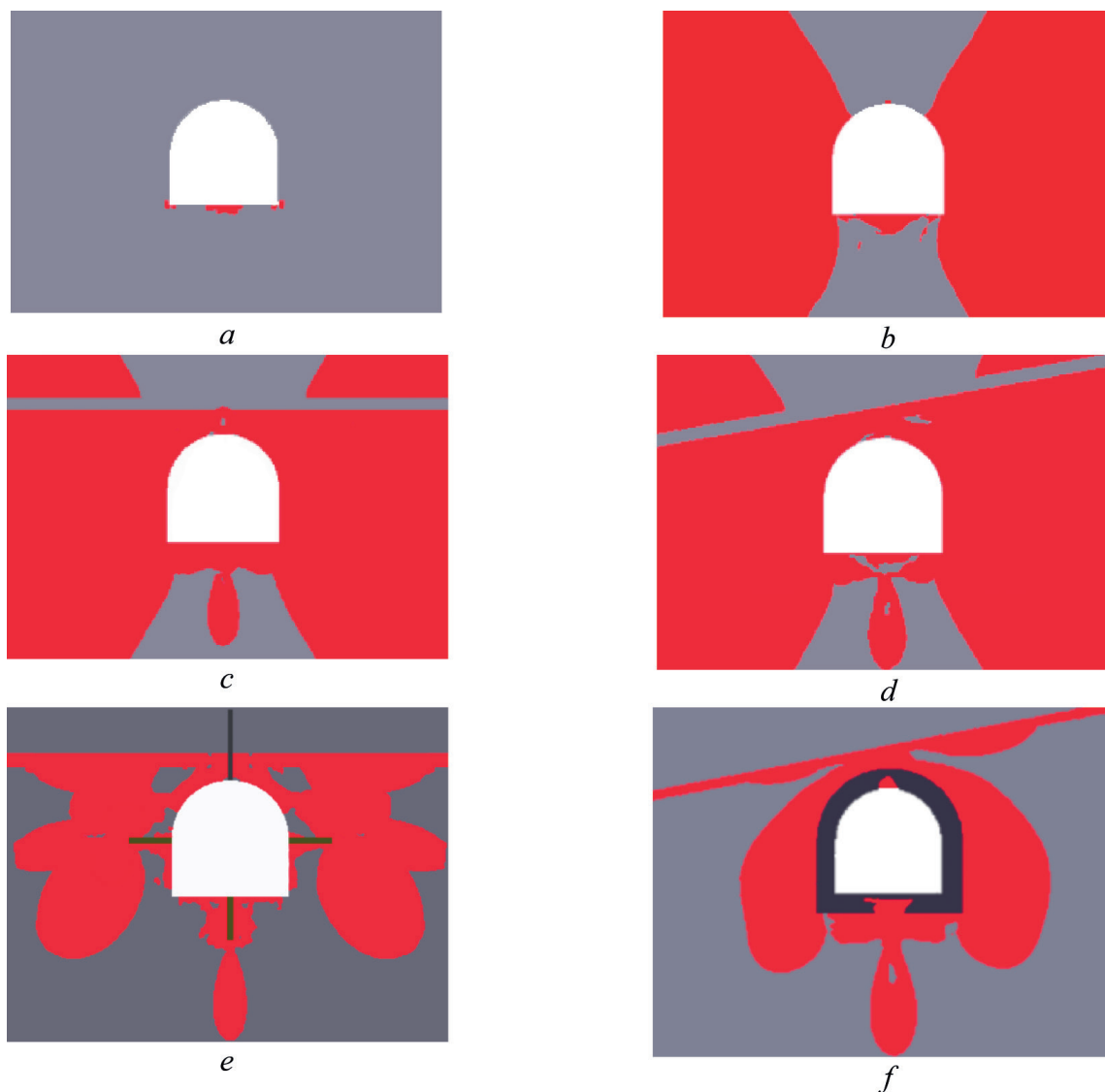


Рис. 3. Распределение зон предельного состояния для всех моделируемых схем горнотехнических систем в соответствии с критерием (1): *a* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 600 м; *b* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 1200 м; *c* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м; *d* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м с наклонными слоями; *e* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м, охраняемой анкерами и компенсационными щелями; *f* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве с наклонными слоями на глубине 1200 м, закрепленной железобетонной крепью. Красный цвет – зоны предельного состояния, другие цвета – безопасные зоны

Fig. 3. Distribution of the limit state zones for all considered schemes of geotechnical systems according to criterion (1): *a* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 600 m; *b* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 1200 m; *c* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m; *d* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers; *e* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m supported by anchors and compensational holes; *f* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers, supported by reinforced concrete. Red colour – limit state zones, other colours – safe zones



обуславливать значительные деформации и смещения породных масс в области подошвы выработки (пучение почвы). Помимо этого, на форму и размеры зон обобщенного сдвига в окрестности выработки оказывает влияние геологическое строение вмещающего массива, что также подтверждается рис. 2.

Оценки зон ПС для всех рассматриваемых горнотехнических систем показаны на рис. 3. Как следует из представленных изображений, предложенная методика оценки состояния подземных горнотехнических систем позволяет определить форму и размеры зон ПС в массиве в окрестности подземной выработки и в ее конструктивных элементах, используемых для охраны и крепления.

В табл. 2 отображены результаты сравнительного анализа размеров зон ПС. На основе выполненных модельных исследований можно сделать вывод о том, что размеры и места локализации зон ПС существенным образом зависят от горнотехнических условий, в которых находится подземное сооружение.

Анализируя результаты численного моделирования (см. рис. 3), можно сделать вывод о том, что отдельные области вмещающего массива в окрестности рассматриваемых выработок относятся к категории устойчивых пород (обозначены на рис. 3 серым цветом), а некоторые области – к категории неустойчивых (обозначены красным цветом). Таким образом, в случае, представленном на рис. 3, *a*, выработка, расположенная на глубине 600 м, является устойчивой. В случаях, показанных на рисунках 3, *b–d*, выработки являются неустойчивыми, поскольку они находятся в массиве неустойчивых породных масс с прогнозируемой мощностью зон нарушения сплошности, превышающих характерный размер сечения выработки. При этом суммарная площадь зон ПС в случае прямых (см. рис. 3, *c*) и наклонных (см. 3, *d*) слоев увеличивается на 11 % и 16 % соответственно (см. табл. 2) в сравнении со случаем отсутствия слоистости (см. рис. 3, *b*, табл. 2).

В ситуациях, изображенных на рис. 3, *e, f*, применяются меры охраны, что уменьшает размеры зон предельного состояния, а также изменяет их форму и локализацию. Применение мер охраны в виде анкеров и компенсационных щелей (см. рис. 3, *e*) снижает площадь зон предельного состояния на 20 % (см. табл. 2), создавая безопасные зоны в окрестности выработки, мощностью, приблизительно равной глубине компенсационных щелей (1,1 м), что повышает устойчивость выработки, особенно в долгосрочной перспективе. Важным в данном случае является то обстоятельство, что, несмотря на наличие достаточно заметных зон ПС, в случае, представленном на рис. 3, *e*, данные зоны локализуются на удалении от контура выработки, что также положительно

Т а б л и ц а 2. Сравнение размеров зон предельного состояния в массиве горных пород в окрестности выработок

T a b l e 2. Comparison of limit state zone size in the vicinity of excavations

Глубина расположения выработки	Максимальный линейный размер зоны предельного состояния в кровле выработки, м	Максимальный линейный размер зоны предельного состояния в подошве выработки, м	Максимальный линейный размер зоны предельного состояния на стенке выработки, м	Общая площадь зоны предельного состояния, м
600 м	–	0,21	0,1	0,2
1200 м	0,08	0,5	> 3	16,4
1200 м в слоистом массиве	0,8	3	> 3	18,4
1200 м в слоистом массиве с наклонными слоями	0,8	3	> 3	19,6
1200 м в слоистом массиве и анкерным креплением	0,7	3,7	> 3	13,1
1200 м в слоистом массиве с наклонными слоями, закрепленная железобетонной крепью	0,7	3,8	> 3	15,4

влияет на устойчивость выработки. Таким образом, применение анкеров и компенсационных щелей в данном случае обеспечивает устойчивость выработки, за исключением некоторых зон неустойчивости в кровле выработки.

При использовании железобетонной постоянной крепи (см. рис. 3, *f*) она возводится в неустойчивом массиве горных пород. Причем напряжения, приходящие на железобетонную крепь со стороны массива, вызывают формирование в ней областей разрушения, обусловленных, главным образом, сдвиговыми напряжениями. Размер зон ПС при данном условии в массиве практически не изменяется. Площадь данных зон в двухметровой окрестности выработки уменьшается только на 6 %. Однако крепь принимает на себя нагрузку со стороны массива. Это свидетельствует о том, что выработка является устойчивой, поскольку полное разрушение крепи не прогнозируется, хотя при этом в кровле и подошве железобетонной крепи могут образовываться незначительные зоны трещиноватости, обусловленные растягивающими напряжениями (см. рис. 3, *f*).

Отметим, что выполненный прогноз верен для рассмотренных выработок, находящихся в конкретных горнотехнических условиях. Вместе с тем описанный алгоритм расчета НДС, определения зон ПС и прогнозирования устойчивости выработок является достаточно общим.

Важный вывод из выполненных исследований состоит в том, что определение НДС в горнотехнической системе не является достаточным для оценки ее прочности, устойчивости или долговечности. Для того чтобы выполнить такой прогноз, необходимо сначала оценить зоны ПС по комплексному критерию, а затем уже исследовать устойчивость горнотехнической системы, взяв в расчет размеры зон предельного состояния, и построить новые специальные модельные расчетные схемы. В частности, в зонах ПС следует учитывать формирование дискретной структуры массива, то есть переход массива в новое структурное состояние. Сделать это можно, например, при помощи решения локальных задач в таких зонах методом блочных элементов [19, 20]. Это позволит напрямую смоделировать поведение массива в зонах ПС и оценить не только устойчивость пород, но и вычислить фактическую мощность вывалов породы. Определение формирования блочной среды в зонах ПС при этом можно при помощи критериев трещиноватости.

**Заключение.** В статье описан алгоритм оценки устойчивости и долговечности подземных сооружений, находящихся в различных горнотехнических условиях. Данный алгоритм основан на использовании комплексного критерия оценки ПС массивов горных пород. Эффективность работы предложенного алгоритма продемонстрирована на примере решения серии задач по оценке устойчивости одиночной выработки, находящейся в различных горнотехнических условиях с различными мерами охраны.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В окрестности подземных выработок формируется сложное НДС, которое включает в себя как зоны обобщенного сдвига, так и зоны обобщенного растяжения и сжатия. Данный факт обуславливает необходимость оценки ПС и устойчивости горнотехнических систем в соответствии с комплексным критерием предельного состояния.

2. Горно-геологическое строение массива, применение различных мер охраны и глубина расположения выработки оказывают существенное влияние на формирование сложного НДС, что, в свою очередь, значительно сказывается на устойчивости выработок.

3. При одинаковом поперечном сечении определяющим фактором формирования в массиве зон ПС является глубина расположения выработки.

4. Значимым фактором, существенно влияющим на формирование зон ПС в массиве горных пород с подземным сооружением, является горно-геологическое строение массива и физико-механические свойства слоев. В частности, показано, что размеры зон ПС увеличиваются на 11–16 % в случае наличия слоистости в кровле массива по сравнению со случаем монолитного вмещающего массива. Таким образом, слоистое строение массива в кровле выработок снижает их устойчивость.

5. Применение различных мер охраны оказывает значительное влияние на повышение устойчивости выработок. Так, использование анкеров и компенсационных щелей снижает размеры зон ПС на 20 %, а также изменяет форму и локализацию этих зон даже в неблагоприятных горнотехнических условиях (при наличии прослоек пластичной глины с низкими прочностными характеристиками). В частности, применение компенсационных щелей обеспечивает удаление зон ПС от контура выработки, что положительно сказывается на ее устойчивости. Применение железобетонной крепи снижает размеры зон ПС на 6 %, однако данная крепь способна удерживать породный массив даже в случае вывалов. При этом в самой крепи могут образовываться незначительные зоны трещиноватости, обусловленные растягивающими напряжениями. Однако наличие упомянутых зон не приводит к переходу всей крепи в предельное состояние, что обеспечивает устойчивость выработки в данном случае. Таким образом, очевидно, что использование мер охраны позволяет повысить устойчивость выработок, особенно в долгосрочной перспективе.

6. Определение НДС в горнотехнической системе не является достаточным для оценки ее устойчивости или долговечности. Авторы предлагают учитывать формирование дискретной структуры массива при помощи решения локальных задач в зонах ПС методом блочных элементов, а формирование блочной среды в зонах ПС определять при помощи критериев трещиноватости.

Предложенный алгоритм оценки устойчивости горнотехнических систем может быть использован для обеспечения безопасности и надежности ведения горных работ на калийных месторождениях. В частности, с использованием данного алгоритма можно проводить расчеты устойчивости других подземных сооружений, имеющих более сложную пространственную геометрию.

#### Список использованных источников

1. Stability Assessment for Underground Excavations and Key Construction Techniques / Hanhua Zhu [et al.]. – Springer, 2017. – 174 p. <http://doi.org/10.1007/978-981-10-3011-6>
2. Stability of Geotechnical Structures: Theoretical and Numerical Analysis / Y. M. Cheng [et al.]. – Bentham Science Publ., 2017. – 411 p. <http://doi.org/10.2174/97816810830321160101>
3. Sloan, S. W. Geotechnical stability analysis / S. W. Sloan // Geotechnique. – 2013. – Vol. 63, Iss. 7. – P. 531–571. <http://doi.org/10.1680/geot.12.RL.001>
4. Gudehus, G. On the stability of geotechnical systems and its fractal progressive loss / G. Gudehus, A. Touplikiotis // Acta Geotech. – 2018. – Vol. 13, Iss. 2. – P. 317–328. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0549-x>
5. Predicting the excavation damaged zone within brittle surrounding rock masses of deep underground caverns using a comprehensive approach integrating *in situ* measurements and numerical analysis / D. P. Xu [et al.] // Geoscience Frontiers. – 2022. – Vol. 13, Iss. 2. – Art. ID 101273. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101273>
6. A numerical study on mechanical behavior of jointed rock masses after tunnel excavation / W. Zhang [et al.] // Arab. J. Geosci. – 2020. – Vol. 13. – Art. ID 416. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05358-y>
7. Azarfar, B. Stability analysis of rock structure in large slopes and open-pit mine: numerical and experimental fault modeling / B. Azarfar, S. Ahmadvand, J. Sattarvand // Rock Mech. Rock Eng. – 2019. – Vol. 52, № 12. – P. 4889–4905. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01915-4>
8. Time-dependent crack development processes around underground excavations / Penghai Deng [et al.] // Tunneling and Underground Space Technology. – 2020. – Vol. 103. – Art. ID 103518. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103518>
9. Qiang Feng. Analytical solution for stress and deformation of the mining floor based on integral transform / Feng Qiang, Jiang Binsong // Int. J. Sci. Technol. – 2015. – Vol. 25, Iss. 4. – P. 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.010>
10. Liu, K. Analytical and numerical analyses of tunnel excavation problem using an extended Drucker–Prager model / K. Liu, S. L. Chen, X. Q. Gu // Rock Mech. Rock Eng. – 2020. – Vol. 53, Iss. 2. – P. 1777–1790. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01992-5>
11. Упругопластическое деформирование и предельное состояние элементов конструкций с концентраторами напряжений / М. Д. Новопащин [и др.]; под ред. В. Р. Кузьмина. – Новосибирск: Наука, 1995. – 112 с.
12. Фисенко, Г. Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок / Г. Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.

13. Debasis, Deb. *Fundamentals and Applications of Rock Mechanics* / Deb. Debasis, V. A. Kumar. – New Delhi: PHI Learning, 2016. – 492 p.
14. Лопатин, С. Н. Предельное состояние массивов горных пород с подземными сооружениями: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / С. Н. Лопатин. – Минск, 2023. – 181 л.
15. Zhuravkov, M. A. Complex limit state criterion for rock masses / M. A. Zhuravkov, S. N. Lapatsin, S. Ji // *Acta Mech. Sinica*. – 2023. – Vol. 39, Iss. 1. – Art. ID 722194. <https://doi.org/10.1007/s10409-022-22194-x>
16. Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines / V. I. Bondarenko [et al.] // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2022. – Vol. 1049. – Art. ID 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>
17. Миренков, В. Е. Формулировка граничных условий в задачах геомеханики / В. Е. Миренков // *Изв. высш. учеб. заведений. Горн. журнал.* – 2016. – № 2. – С. 67–73.
18. Ставрогин, А. Н. Пластичность горных пород / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
19. Sharma, V. M. *Distinct Element Modelling in Geomechanics* / V. M. Sharma, K. R. Saxena, R. D. Woods. – CRC Press, 2007. – 234 p.
20. The Stability and Failure of Deep Underground Structures at Potash Mining Deposits / Y. Zhang [et al.] // *Appl. Sci.* – 2024. – Vol. 14. – Art. ID 9434. <https://doi.org/10.3390/app14209434>

## References

1. Hanhua Zhu, Mengchong Chen, Yu Zhao, Fusheng Niu. *Stability Assessment for Underground Excavations and Key Construction Techniques*. Springer, 2017. 174 p. <http://doi.org/10.1007/978-981-10-3011-6>
2. Cheng Y. M., Wong H., Leo C. J., Lau C. K. *Stability of Geotechnical Structures: Theoretical and Numerical Analysis*. Bentham Science Publ., 2017. 411 p. <http://doi.org/10.2174/97816810830321160101>
3. Sloan S. W. Geotechnical stability analysis. *Geotechnique*, 2013, vol. 63, iss. 7, pp. 531–571. <http://doi.org/10.1680/geot.12.RL.001>
4. Gudehus G., Touplikiotis A. On the stability of geotechnical systems and its fractal progressive loss. *Acta Geotechnica*, 2018, vol. 13, iss. 2, pp. 317–328. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0549-x>
5. Xu D. P., Huang X., Li S. J., Xu H.S., Qiu S. L., Zheng H., Jiang Q. Predicting the excavation damaged zone within brittle surrounding rock masses of deep underground caverns using a comprehensive approach integrating *in situ* measurements and numerical analysis. *Geoscience Frontiers*, 2022, vol. 13, iss. 2, art. ID 101273. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101273>
6. Zhang W., Xu B., Mei J., Yue G., Shi W. A numerical study on mechanical behavior of jointed rock masses after tunnel excavation. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, art. ID 416. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05358-y>
7. Azarfar B., Ahmadvand S., Sattarvand J. Stability analysis of rock structure in large slopes and open-pit mine: numerical and experimental fault modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, vol. 52, no. 12, pp. 4889–4905. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01915-4>
8. Penghai Deng, Quansheng Liu, Hao Ma, Fan He, Qi Liu. Time-dependent crack development processes around underground excavations. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 103, art. ID 103518. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103518>
9. Feng Qiang, Jiang Binsong. Analytical solution for stress and deformation of the mining floor based on integral transform. *International Journal of Science and Technology*, 2015, vol. 25, iss. 4, pp. 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.010>
10. Liu K., Chen S. L., Gu X. Q. Analytical and numerical analyses of tunnel excavation problem using an extended Drucker–Prager model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 1777–1790. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01992-5>
11. Novopashin M. D. *Elastoplastic Deformation and Limit State of Structural Elements with Stress Concentrations*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 112 p. (in Russian).
12. Fisenko G. L. *Limit State of Rock Masses in the Vicinity of Workings*. Moscow, Nedra Publ., 1976. 272 p. (in Russian).
13. Debasis Deb., Kumar V. A. *Fundamentals and Applications of Rock Mechanics*. New Delhi, PHI Learning, 2016. 492 p.
14. Lapatsin S. N. *Limit State of Rock Massifs with Underground Structures* [dissertation]. Minsk, 2023. 181 p. (in Russian).
15. Zhuravkov M. A., Lapatsin S. N., Ji S. Complex limit state criterion for rock masses. *Acta Mechanica Sinica*, 2023, vol. 39, iss. 1, art. ID 722194. <https://doi.org/10.1007/s10409-022-22194-x>
16. Bondarenko V. I. Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1049, art. ID 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>

17. Mirenkov V. E. Formulation of boundary conditions in geomechanics problems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*, 2016, no. 2, pp. 67–73 (in Russian).
18. Stavrogin A. N., Protosenya A. G. *Plasticity of Rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1979. 301 p. (in Russian).
19. Sharma V. M., Saxena K. R., Woods R. D. *Distinct Element Modelling in Geomechanics*. CRC Press. 2007. 234 p.
20. Zhang Y., Lapatsin S., Zhurvakov M., Yu G., Karpovich I. The Stability and Failure of Deep Underground Structures at Potash Mining Deposits. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, art. ID 9434. <https://doi.org/10.3390/app14209434>