УДК 622.363.2:622.28

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ УЧАСТКОВ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ КРОВЛИ ВЫРАБОТОК В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ

Д. Н. ШКУРАТСКИЙ,
генеральный директор, канд. техн. наук

Д. С. ЧЕРНОПАЗОВ,
заведующий лабораторией геомеханики, канд. техн. наук, Dmitriy.Chernopazov@uralkali.com

И. Б. ВАУЛИНА,
старший научный сотрудник

АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

Выполнена оценка параметров устойчивости участков породных обнажений с помощью решения задачи Ламе применительно к условиям одиночной горной выработки на Верхнекамском месторождении солей. На основе выполненных исследований разработан инженерный подход по оценке параметров прогнозных зон нарушений устойчивости породных обнажений в кровле горизонтальных горных выработок, пройденных в соляных породах.

Ключевые слова: *Верхнекамское месторождение, соляные породы, прочность, разрушение, горная выработка, математическое моделирование, ползучесть.*

DOI: *10.17580/gzh.2021.04.04*

Введение

Обеспечение устойчивости подземных горных выработок является основой безопасного ведения горных работ. Эту задачу решают на основе реализации мероприятий по охране горных выработок, определяя эффективное положение горной выработки в свите горных пород, обеспечивающее соответствие устойчивости породных обнажений технологическому сроку службы выработки. Для обеспечения безопасных условий эксплуатации горных выработок определяющим условием является устойчивость кровли выработок [1–4].

Риск разрушений и интенсивных деформаций породного контура горных выработок должен быть компенсирован выбором рационального способа крепления породных обнажений горных выработок, обеспечивающего эксплуатационное состояние выработки на заданный срок.

Решение поставленной задачи в условиях Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) осложняется складчатой слоистой структурой свиты пологих пластов сильвинитового и карналлитового состава, а также разделяющих их пластов каменной соли и тонких глинистых прослойков. Это приводит к формированию условий для расслоения соляных пород в кровле горных выработок, что связано с длительной эксплуатацией горных выработок. Также наблюдаются деформации ползучести и, как следствие, сдвиги по границам отдельных геологических пачек пород, что является причиной потери устойчивости породных обнажений.

Условия формирования свода обрушения в кровле горной выработки

С целью выбора эффективных видов крепи горной выработки и определения параметров крепления следует выполнять прогнозную оценку зоны возможных обрушений породных обнажений в кровле выработок (**рис. 1**).

Рис. 1. Пример обрушения кровли выработки на руднике ВКМС

© Шкуратский Д. Н., Чернопазов Д. С., Ваулина И. Б., 2021

Для решения указанной задачи длительное время использовали критерий Кулона – Мора [5, 6], согласно которому плоскость возможного сдвига связных пород определяют как

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}, \quad (1)$$

где φ – угол внутреннего трения породы кровли, градус.

На основании представленного критерия был сформирован подход, согласно которому параметры зоны возможного обрушения определяли как свод возможного обрушения (**рис. 2**). Параметры свода обрушения можно рассчитать по формуле

$$h_з = 0{,}5\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) L_р = 0{,}7 L_р, \quad (2)$$

$$L_р = l_{пл} + 0{,}75 r_0,$$

где $L_р$ – расчетный пролет выработки, м; φ – угол внутреннего трения породы кровли, градус; $l_{пл}$ – ширина плоской части кровли выработки, м; r_0 – радиус сводчатой части кровли выработки, м.

Высота свода обрушения в соответствии со сформированным критерием (2) зависит только от ширины выработки и угла внутреннего трения пород. Следовательно, для выработок равной ширины, расположенных на различных глубинах, параметры крепления будут одинаковыми. Реализация данного способа приводит к выбору недостаточных или избыточных параметров крепления горных выработок.

Для исключения данного противоречия рассмотрим известные методы определения условий потери устойчивости пород, слагающих кровлю горных выработок. В частности, оценка формирования разрушений пород кровли может быть выполнена с использованием теории изгиба балок [7]. Авторы [8] рассматривали разрушение образовавшейся в кровле выработки породной балки при достижении максимальными напряжениями в ней уровня предела длительной прочности пород.

На ВКМС соляные породы имеют сложное строение, для них характерны неоднородная мощность породных слоев, наличие разномощных глинистых прослоев, складчатость, ярко выраженные реологические свойства пород. Расчет зоны возможного разрушения пород в кровле по теории устойчивости балок для ВКМС обладает низкой практической эффективностью в связи с невозможностью точного определения параметров породных слоев, залегающих в кровле каждой выработки.

В работах [9, 10] авторы используют метод М. М. Протодьяконова для определения высоты свода обрушения:

$$h_з = a/f, \quad (3)$$

где a – полупролет выработки, м; f – коэффициент крепости породы.

В данном случае высота свода обрушения также не зависит от глубины расположения выработки и других горно-геологических факторов. Согласно [5] применение такого подхода целесообразно до тех пор, пока боковые породы деформируются упруго. Таким образом, область реализации данного метода ограничивается небольшими глубинами (60–70 м) или достаточно крепкими породами. Как известно, разработку соляных пород на ВКМС проводят на глубинах до 450 м, и породы обладают ярко выраженными пластическими свойствами.

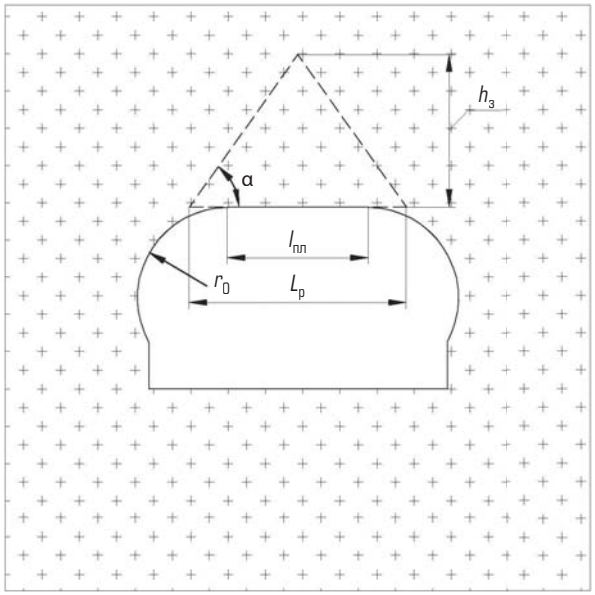

Рис. 2. Принципиальная схема определения свода возможного обрушения пород в кровле

В качестве альтернативы способу оценки высоты зоны возможного разрушения по методу Кулона и Протодьяконова авторы [11–14] определяли зону разрушения в хрупких вмещающих выработку породах по критерию Хука – Брауна [15].

На **рис. 3** проиллюстрированы результаты численного моделирования направлений главных действующих напряжений в соляном породном массиве, вмещающем горную выработку, полученные с применением пакета программ [16]. Так как породный контур выработки находится в напряженном состоянии, близком к одноосному (см. рис. 3), то постановка задачи по оценке напряженного состояния рассматриваемой части массива горных пород в значительной степени упрощается: можно ограничиться использованием критерия Кулона – Мора [6].

Капитальные выработки (выработки околоствольного двора и выработки главных направлений) на рудниках ВКМС сооружают, как правило, в достаточно однородных пластичных породах (например, в подстилающей каменной соли). Поэтому размеры области неупругих деформаций, определяющих формирование зоны расслоения в породах кровли горных выработок, можно определить из аналитического решения упругопластической задачи о напряженно-деформированном состоянии пород вокруг выработки круглой формы на основе известного решения задачи Ламе [17].

Условия, влияющие на величину размера свода обрушения в кровле выработки

Используем решение задачи о необходимой активной длине анкера [18] для определения величины h_∞, характеризующей расстояние от контура горной выработки круглой формы

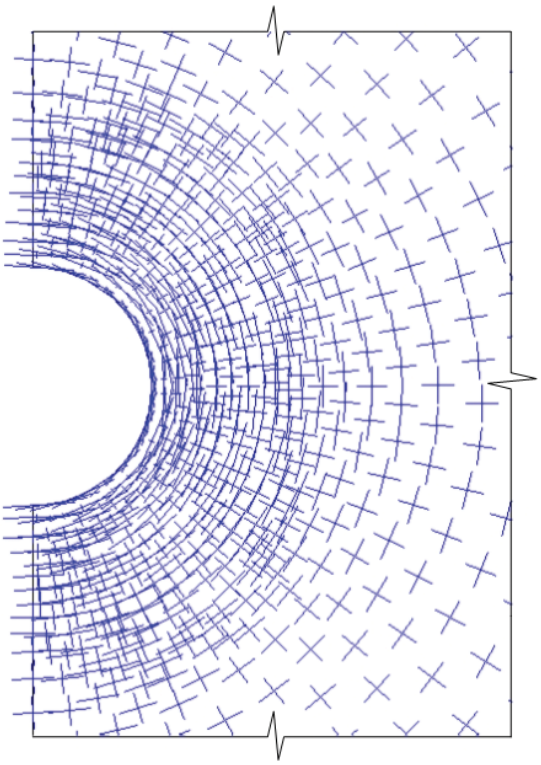

Рис. 3. Результаты численного моделирования направлений главных действующих напряжений в породном массиве, вмещающем горную выработку

до границы области породного массива, не подвергающегося деформациям ползучести в приконтурном массиве. Это соответствует условию $\sigma_i \le \sigma_\infty$:

$$h_\infty = R\sqrt[4]{\frac{3}{(\sigma_\infty / \gamma H_{пр})^2 - (1-2\mu)^2}}, \qquad (4)$$

где σ_i – интенсивность действующих напряжений; σ_∞ – предел длительной прочности пород кровли выработки; R – радиус поперечного сечения горной выработки; γ – удельный вес вышележащих пород; $H_{пр}$ – приведенная глубина залегания кровли горной выработки, μ – коэффициент Пуассона.

В таком случае мощность зоны возможного разрушения пород для упругого решения задачи о круглой выработке определяют по формуле

$$h_з = h_\infty - R = R\left(\sqrt[4]{\frac{3}{(\sigma_\infty / \gamma H_{пр})^2 - (1-2\mu)^2}} - 1\right). \qquad (5)$$

В действительности капитальные (и подготовительные) выработки на ВКМС преимущественно имеют размеры, когда ширина выработки превышает ее высоту.

Рассмотрим решение плоской задачи формирования напряженно-деформированного состояния изотропного упругопластического породного массива, вмещающего одиночную горную выработку, методом математического моделирования в конечно-элементной постановке [16] для выработок разного размера. Применяемую в [16] модель деформирования соляных пород широко используют для решения задач различных типов, связанных с вязкоупругопластическим поведением соляных пород во вмещающем выработки массиве. Апробацию модели проводили на основе имеющихся натурных данных. Более подробно результаты описаны в [19, 20].

Результаты расчетов приведены на **рис. 4**. Величина $h_з$ рассчитана по формуле (5).

Результаты выполненных расчетов показывают, что условия формирования зон концентрации интенсивности напряжений во вмещающем одиночную выработку породном массиве обусловливают их округлую форму.

С учетом того, что применяемые на рудниках ВКМС комбайновые комплексы с целью обеспечения устойчивости горных выработок формируют их поперечное сечение сводчатой формы, созданные зоны концентрации напряжений определяют в кровле и почве выработок.

Сопоставление результатов исследований, проведенных методом математического моделирования, с результатами расчетов,

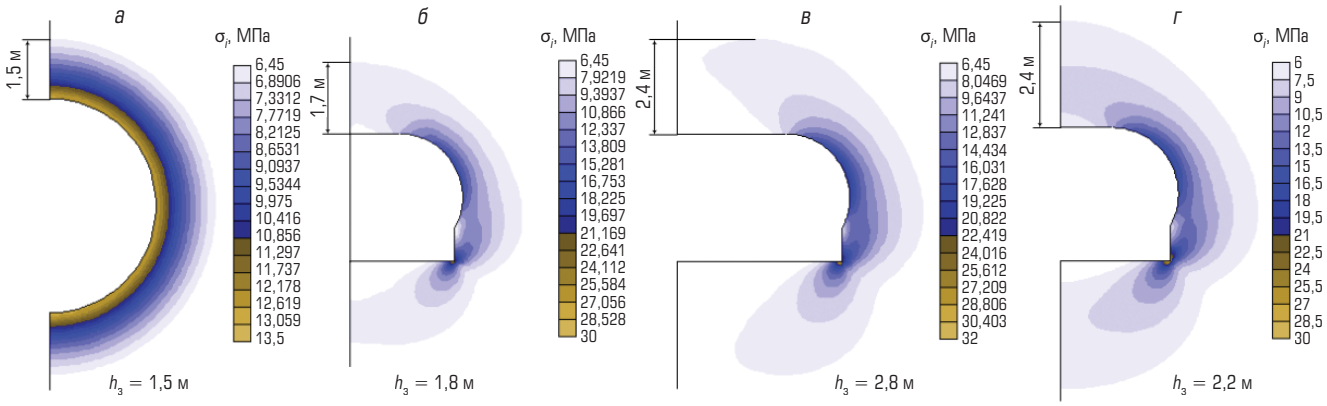

Рис. 4. Области распределения интенсивности напряжений при условии $\sigma_i \ge \sigma_\infty$:
а – $L = h = 5{,}5$ м, $\gamma H_{пр}/\sigma_{сж} = 0{,}3$, $k_\infty = 0{,}3$; *б* – $L = 5{,}5$ м, $h = 3{,}1$ м, $\gamma H_{пр}/\sigma_{сж} = 0{,}3$, $k_\infty = 0{,}3$; *в* – $L = 8$ м; $h = 3{,}1$ м; $\gamma H_{пр}/\sigma_{сж} = 0{,}3$, $k_\infty = 0{,}3$; *г* – $L = 5{,}5$ м; $h = 3{,}1$ м; $\gamma H_{пр}/\sigma_{сж} = 0{,}4$, $k_\infty = 0{,}3$; $h_з$ – величина, рассчитанная по формуле (5)

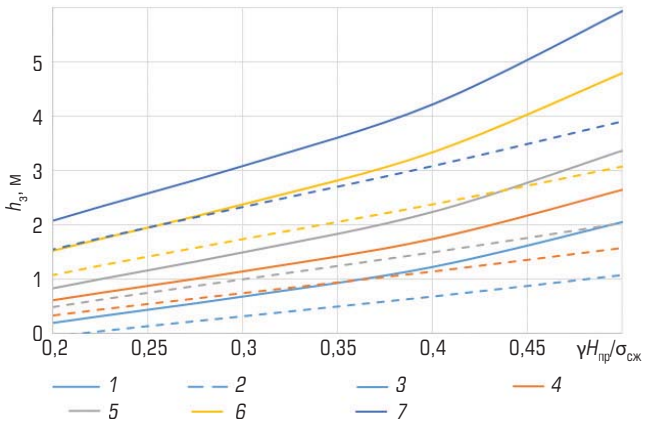

Рис. 5. Зависимости $h_з$ от $\gamma H_{пр}/\sigma_{сж}$:
1 – k_∞ = 0,3 м; *2* – k_∞ = 0,4 м; *3* – L = 3,2 м, h = 3,1 м; *4* – L = 4,3 м, h = 2,6 м; *5* – L = 5,5 м, h = 3,1 м; *6* – L = 8 м, h = 3,1 м; *7* – L = 10 м, h = 3,1 м

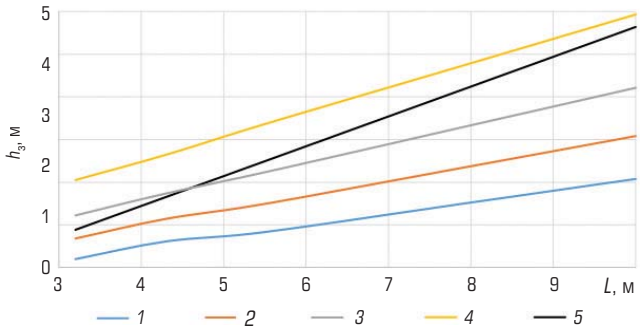

Рис. 6. Зависимости $h_з$ от L:
1, *2*, *3*, *4* – $\gamma H_{пр}/\sigma_{сж}$ = 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 соответственно; *5* – $h_з = 0{,}7\ L_р$

выполненных с использованием соотношения (5), показывает удовлетворительную сходимость при различных условиях действующего горного давления.

Для вариантов, представленных на рис. 4, *б–г*, в формуле (5) полагали $R = (L + h)/4$, где L – максимальная ширина выработки в проходке, h – высота выработки.

Таким образом, при определении характерных параметров горных выработок формула (5) примет следующий вид:

$$h_з = \frac{(L+h)}{4}\sqrt[4]{\frac{3}{(k_\infty \sigma_{сж} / \gamma H_{пр})^2 - (1-2\mu)^2}} - \frac{h}{2}, \qquad (6)$$

где k_∞ – коэффициент длительной прочности пород кровли выработки; $\sigma_{сж}$ – предел мгновенной прочности пород кровли выработки.

Формула (6) справедлива для соотношения горного давления и прочности вмещающих пород, соответствующего неравенству

$$\frac{k_\infty}{\sqrt{3+(1-2\mu)^2}} < \frac{\gamma H_{пр}}{\sigma_{сж}} < \frac{k_\infty}{\sqrt{1-2\mu}}. \qquad (7)$$

Графики зависимости высоты зоны возможного разрушения пород в кровле от отношения горного давления к прочности вмещающих пород в соответствии с формулой (6) представлены на **рис. 5**. Графики построены для $\sigma_\infty = 0{,}3\sigma_{сж}$; $\sigma_{сж} = 21{,}5$ МПа.

Полученные зависимости (см. рис. 5) показывают, что с ростом глубины расположения выработки, уменьшением прочности вмещающих пород, увеличением ширины выработки в проходке высота зоны возможного разрушения в кровле увеличивается.

На **рис. 6** приведены графики зависимости высоты зоны возможного разрушения в кровле выработки от ширины выработки: цветные линии соответствует формуле (6), черная – формуле (2).

Установлено, что при значении горного давления $\frac{\sigma_{сж}}{\gamma H_{пр}} \le 0{,}3$ высота свода возможного разрушения, определенная по формуле (2), значительно превышает ее величину, рассчитанную по формуле (6). Это приводит к избыточной материалоемкости при выборе параметров крепления и типа крепи горных выработок.

Заключение

Таким образом, в рамках проведенных исследований выполнено уточнение расчетных методов определения высоты зоны возможного разрушения пород в кровле выработки $h_з$. Она определяется высотой зоны реализации необратимых пластических деформаций в кровле в соответствии с соотношением (6). В границах этой зоны определяют риск формирования разрушений и последующих вывалов пород для горных выработок ВКМС.

Библиографический список

1. *Eremenko V. A., Neguritsa D. L.* Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses // Eurasian Mining. 2016. No. 1. P. 21–24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02
2. *Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A.* Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
3. *Трофимов А. В., Киркин А. П., Румянцев А. Е., Яваров А. В.* Применение численного моделирования для определения оптимальных параметров метода полной разгрузки керна при оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Цветные металлы. 2020. № 12. С. 22–27. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03
4. *Krinitsyn R. V., Khudyakov S. V.* Designing support for narrow rib pillars with subvertical fractures // Eurasian Mining. 2017. No. 2. P. 16–19. DOI: 10.17580/em.2017.02.04
5. *Максимов А. П.* Горное давление и крепь выработок. – М. : Недра, 1973. – 287 с.
6. *Wittke W.* Felsmechanik:Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. – Berlin : Springer-Verlag, 1984. – 1054 s.
7. *Napola J. R., Vining C. A.* Considerations for effective ground support in evaporites // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 1. P. 113–118.

8. *Zhao Yanhai, Wang Shuren, Zou Zhengsheng, Ge Linlin, Cui Fang*. Instability characteristics of the cracked roof rock beam under shallow mining conditions // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 3. P. 437–444.
9. *Разумов Е. А., Заятдинов Д. Ф., Гречишкин П. В., Позолотин А. С., Грабовский В. А.* Опыт поддержания широких сопряжений горных выработок с применением двухуровневой анкерной крепи в условиях шахты МУК-96 // Уголь. 2013. № 7. С. 31–34.
10. *Гречишкин П. В., Позолотин А. С., Заятдинов Д. Ф., Шаров В. Н.* Оценка эффективности двухуровневого анкерного крепления сопряжений горных выработок угольных шахт // Горный журнал. 2015. № 8. С. 48–52. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.11
11. *Barton N., Baotang Shen*. Risk of shear failure and extensional failure around overstressed excavations in brittle rock // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 2. P. 210–225.
12. *Perras M. A., Diederichs M. S*. Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 60–74.
13. *Гирфанов И. И., Ремеев М. М., Сотников О. С., Лутфуллин А. А., Мухлиев И. Р.* Выбор оптимального критерия прочности для терригенных отложений пашийского горизонта Ташлиярской площади Ромашкинского месторождения // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 4. С. 114–118.
14. *Ескалиев М. Е., Кожамкулова Ж. Ж., Суранчиева З. Т., Отельбаева А. К.* Алгоритм численного моделирования упругопластической задачи вблизи горной выработки в транстропном массиве // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли : сб. тр. Всероссийской конф., посвященной 80-летию ад. М. В. Курлени, с участием иностранных ученых. – Новосибирск : Ин-т горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 2011. Т. I.
15. *Jianping Zuo, Jiayi Shen*. The Hoek-Brown Failure criterion – From theory to application. – Singapor : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. – 225 p.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610648. Программа для решения плоских задач упруговязкопластичности методом конечных элементов (Earth – 2D.1) / М. В. Гилев, С. А. Константинова, С. А. Чернопазов, Д. С. Чернопазов // Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных ; дата регистрации 11.01.2011.
17. *Самуль В. И.* Основы теории упругости и пластичности. – М. : Высшая школа, 1982. – 264 с.
18. *Константинова С. А., Поносова Т. И.* Расчет параметров анкерной крепи распорного типа выработок в соляных породах // Известия вузов. Горный журнал. 1984. № 1.
19. *Константинова С. А., Чернопазов С. А.* Оценка реологических показателей соляных пород по данным натурных наблюдений за вертикальными деформациями междукамерных целиков // ФТПРПИ. 2007. № 1. С. 21–27.
20. *Константинова С. А., Чернопазов С. А.* Развитие наследственной модели деформирования и разрушения соляных пород // ФТПРПИ. 2004. № 1. С. 50–61. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 34–38
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.04

Assessment of instability initiation in exposed salt rock roofs

Information about authors
D. N. Shkuratskiy [1], CEO, Candidate of Engineering Sciences
D. S. Chernopazov [1], Head of Laboratory of geomechanics, Candidate of Engineering Sciences, Dmitriy.Chernopazov@uralkali.com
I. B. Vaulina [1], Senior Researcher

[1]Geomechanics Research Laboratory, VNII Galurgii, Perm, Russia

Abstract
Stability of rocks is the main requirement for the safe operation of mines. For this purpose, certain measures are applied for the protection and support of underground openings, including roof support design and roof arrangement in the most stable rocks. Stability assessment of underground excavations is largely related to their roof stability. Determination of possible instability conditions in mine roofs governs the choice of support system design and parameters of mine excavations.
The Upper Kama Potash Salt Deposit represents a stratified layer of solid salt rocks. Roof instability develops as stratification and roof collapse. The Mohr–Coulomb criterion of coherent rocks is currently used to estimate parameters of a possible damage zone in the exposed roof. This criterion allows evaluating shear plane angles in roof rocks and, as a result, finding parameters of the possible collapse zone.
The experience of mining operations in the Upper Kama deposit shows different failure conditions as against the Mohr–Coulomb criterion as the stress state is scarcely included in the criterion used.
This study is an attempt to assess parameters of rock exposures by solving a Lame problem in terms of a single mine excavation.
The analytical results were compared with the parameters obtained from the plane elasticity solutions by the finite element method. Based on the implemented studies, an engineering approach is developed for the assessment of anticipated instability parameters in exposed roofs in horizontal excavations driven in salt rocks.
Keywords: Upper Kama Potash Salt Deposit, salt rocks, strength, failure, mine excavation, mathematical modeling, creep.

References

1. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses. *Eurasian Mining*. 2016. No. 1. pp. 21–24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02
2. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
3. Trofimov A. V., Kirkin A. P., Rumyantsev A. E., Yavarov A. V. Use of numerical modeling to determine optimum overcoring parameters in rock stress-strain state analysis. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 12. pp. 22–27. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03
4. Krinitsyn R. V., Khudyakov S. V. Designing support for narrow rib pillars with subvertical fractures. *Eurasian Mining*. 2017. No. 2. pp. 16–19. DOI: 10.17580/em.2017.02.04
5. Maksimov A. P. Overburden pressure and mine support design. Moscow : Nedra, 1973. 287 p.
6. Wittke W. Felsmechanik:Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Berlin : Springer-Verlag, 1984. 1054 s.
7. Napola J. R., Vining C. A. Considerations for effective ground support in evaporites. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29, Iss. 1. pp. 113–118.
8. Zhao Yanhai, Wang Shuren, Zou Zhengsheng, Ge Linlin, Cui Fang. Instability characteristics of the cracked roof rock beam under shallow mining conditions. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28, Iss. 3. pp. 437–444.
9. Razumov E. A., Zayatdinov D. F., Grechishkin P. V., Pozolotin A. S., Grabovskiy V. A. Experience of active and passive support and reinforcement to maintain wide span junctures in mine MUK-96. *Ugol*. 2013. No. 7. pp. 31–34.
10. Grechishkin P. V., Pozolotin A. S., Zayatdinov D. F., Sharov V. N. Estimate of efficiency of two-level rock bolting at junctions in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 8. pp. 48–52. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.11
11. Barton N., Baotang Shen. Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9, Iss. 2. pp. 210–225.
12. Perras M. A., Diederichs M. S. Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016. Vol. 8, Iss. 1. pp. 60–74.
13. Girfanov I. I., Remeev M. M., Sotnikov O. S., Lutfullin A. A., Mukhliev I. R. Selection of optimal strength criteria for the terrigenous Pashiyan horizon of the Romashkinskoe field Tashliyarskaya area. *Georesources*. 2019. Vol. 21, No. 4. pp. 114–118.
14. Eskaliev M. E., Kozhamkulova Zh. Zh., Suranchieva Z. T., Otelbaeva A. K. Numerical modeling algorithm for elastoplastic problem in surrounding transtropic rock mass around an underground excavation. *Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior : Proceedings of the All-Russian Conference on Commemoration of the 80th Anniversary of Academician M. V. Kurlenya with Participation of Foreign Scientists*. Novosibirsk : Institut gornogo dela im. N. A. Chinakala SO RAN, 2011. Vol. I.
15. Jianping Zuo, Jiayi Shen. The Hoek-Brown Failure criterion – From theory to application. Singapor : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. 225 p.
16. Gilev M. V., Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Chernopazov D. S. Software State Registration Certificate No. 2011610648. The FEM-based elasto-visco-plasticity program (Earth – 2D.1). *Unified Register of Russian Programs for Computrs and Databases*. Registered: 11.01.2011.
17. Samul V. I. Fundamentals of elasticity and plasticity. Moscow : Vysshaya shkola, 1982. 264 p.
18. Konstantinova S. A., Ponosova T. I. Expandable rock bolt design for salt mines. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1984. No. 1.
19. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A. Estimating salt rocks rheology by in-situ observations of vertical deformation of interchamber pillars. *Journal of Mining Science*. 2007. Vol. 43, Iss. 1. pp. 17–23.
20. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A. Development of hereditary model for deformation and failure of salt rocks. *Journal of Mining Science*. 2004. Vol. 40, Iss. 1. pp. 45–56.