ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ

В. А. АСАНОВ, зав. лабораторией, д-р техн. наук, аva@mi-perm.ru A. B. EBCEEB, научный сотрудник, канд. техн. наук И. Л. ПАНЬКОВ, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

В. Н. ТОКСАРОВ, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

Горный институт УрО РАН — филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

Введение

При отработке запасов Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) одной из основных производственных задач является поддержание сплошности водозащитной толщи, отделяющей продуктивные пласты от вышележащих водоносных горизонтов. Это достигается путем применения камерной системы разработки с оставлением жестких поддерживающих целиков, сохраняющих свою несущую способность на весь срок службы рудника. На месторождении ведется комбайновая отработка сильвинитовых пластов Kpll и АБ средней мощностью 5 и 3,5 м соответственно. Ширина камер в зависимости от применяемого комбайна изменяется от 3,2 до 6,1 м. Ширина целиков варьируется от 2,9 до 12,9 м. Пласты отделены друг от друга технологическим междупластьем мощностью 2,5-8 м. В кровле рабочих пластов (особенно Kpll) залегают прослои глинисто-соляных пород (коржи), которые имеют слабую устойчивость и при отработке, как правило, обрушаются. Несмотря на соблюдение всех требований нормативных документов [1-3], с течением времени часто наблюдаются деформирование и разрушение грузонесущих элементов системы разработки. Так. при обследовании очистных камер, отработанных несколько десятилетий назад, выявлены обрушения потолочин и междупластий, а также значительные отслоения пород в стенках целиков на величину 1 м и более. Эти нарушения сопровождаются интенсификацией процессов сдвижения пород водозащитной толщи, что в конечном итоге может привести к образованию субвертикальных водопроводящих трещин и проникновению пресных вод в выработанное пространство. В связи с этим особое значение приобретает необходимость долговременного мониторинга процессов деформирования элементов камерной системы разработки в зависимости от горно-геологических условий, физико-механических свойств пород отрабатываемых пластов, параметров горных работ и времени эксплуатации выработок, что является одним из основных условий обеспечения безопасности горного производства [1, 4]. Методика контроля должна включать лабораторные исследования характера деформирования соляных пород, экспериментальное изучение процессов деформирования и разрушения грузонесущих элементов камерной системы разработки сильвинитовой толщи и теоретическую интерпретацию данных [5–7] с целью своевременной выработки

Рассматриваются результаты лабораторных и натурных исследований деформирования и разрушения междукамерных целиков и междупластий при отработке сильвинитовых пластов; результаты используются для корректировки математической модели напряженно-деформированного состояния подрабатываемого соляного массива.

Ключевые слова: соляные породы, физико-механические свойства, напряженно-деформированное состояние массива, устойчивость целиков.

DOI: 10.17580/gzh.2018.06.02

рекомендаций для принятия управленческих решений по предотвращению аварийных ситуаций.

Лабораторные исследования характера деформирования соляных пород

При изучении породного массива ВКМКС установлено, что, несмотря на однотипность состава основных видов соляных пород, латеральная изменчивость их механических показателей варыруется в широких пределах и может отличаться в 2–3 раза от средних значений. Такой разброс свойств во многом обусловлен особенностями геологического строения массива: изменчивостью состава, структуры, текстуры и степени дефектности, присущих соляным породам по природе их образования.

Анализ результатов массовых испытаний показал, что регламентированным значениям прочности красного сильвинита. равной 23 МПа±10 %, соответствует только 34 % общего числа экспериментальных данных. В то же время в 31 % измерений зафиксирована прочность менее 20 МПа, из этого числа до 50 % образцов имеют пониженную прочность, связанную с наличием в них структурно-текстурных дефектов строения. В результате большого объема лабораторных исследований механических свойств соляных пород ВКМКС установлено, что наличие глинистых прослоев и высокая степень нарушенности соляных пород наиболее сильно отражаются в параметрах их деформирования. Так, для сильвинитов пласта Kpll рудника БКПРУ-2 при увеличении содержания глинистого материала с 5-6 до 15-20 % прочность снижается в 1.3–1.5 раза, а модуль деформации – в 2–2.6 раза. Натурные эксперименты показали, что чем больше модуль деформации, тем выше степень устойчивости пород кровли.

Породный массив, вмещающий подземные горные выработки, находится в объемном напряженном состоянии, которое существенно изменяется в процессе ведения горных работ. В связи с этим широкий спектр теоретических и практических задач, возникающих при геомеханическом анализе состояния подработанного



Рис. 1. Характер изменения вязкости образцов красного сильвинита от степени нагружения для различных уровней бокового давления $\sigma_{\rm бок}$:

1, 2, 3 – 0; 2,5; 5 МПа соответственно

а

массива, обусловливает необходимость оценки поведения горных пород в условиях, соответствующих состоянию пород в массиве как при кратковременных, так и длительных режимах нагружения.

Многочисленные исследования горных пород, проводимых при объемном нагружении, направлены прежде всего на изучение влияния напряженного состояния на прочностные показатели, с целью построения прочностных критериальных зависимостей [8–11]. В то же время исследования, направленные на изучение деформационных показателей горных пород, определяющих характер деформирования и разрушения подземных конструкций, носят достаточно эпизодический характер [12–15].

В рамках поставленной задачи выполнено исследование закономерностей деформирования и разрушения образцов каменной соли и красного сильвинита шахтных полей рудников ВКМКС. Кратковременные испытания осуществляли на сервогидравлическом комплексе MTS-815 на призматических образцах размерами 35×35×70 мм. Нагружение образцов проводили по схеме Кармана при различных уровнях бокового давления. В процессе экспериментов вели запись полных диаграмм деформирования, по результатам обработки которых устанавливали закономерности изменения прочностных и деформационных показателей от уровня бокового давления.

Анализ результатов показал, что изменение прочности образцов с увеличением бокового давления достаточно хорошо описывается кривой, близкой к параболической огибающей. С увеличением бокового давления также наблюдается возрастание предела остаточной прочности. Влияние бокового давления на величину разрушающей деформации с достаточной степенью точности аппроксимируется линейной зависимостью.

Для оценки характера деформирования соляных пород во времени выполнены реологические исследования цилиндрических образцов-близнецов при одноосном и объемном нагружении. Длительные испытания на одноосную ползучесть образцов выполняли на гидравлических прессах при различном отношении их высоты к диаметру (*h*/*d*) и при степенях нагружения в интервале 0,2–0,8 от мгновенного предела прочности. Образцы выдерживали под нагрузкой от 2 до 65 сут. Исследования при объемном нагружении выполняли по схеме нагружения Кармана (*σ*₁ ≠ *σ*₂ = *σ*₃) на образцах *h*/*d* = 2. Боковое давление принимали постоянным для разных образцов и равным 0; 1; 2,5 и 5 МПа.

По результатам испытаний для всех образцов строили кривые ползучести, обработка которых позволила получить значения пределов длительной прочности.

Установлено, что деформирование соляных пород во времени удовлетворительно описывается уравнением упруговязкой модели Максвелла с вязкостью, являющейся функцией степени нагружения. По результатам экспериментальных исследований выявлено уменьшение вязкости сильвинита с увеличением степени нагружения при различных уровнях бокового давления. Полученный вывод согласуется с данными работы [16]. Как показано на **рис. 1**, вязкость сильвинита в полулогарифмической системе координат с увеличением степени нагружения при различных уровнях бокового давления уменьшается по линейному закону [17]. Данные результаты использованы для уточнения модели длительного деформирования соляных пород.



Рис. 2. Схема измерения (а) и результаты определения модуля деформации пород приконтурного слоя (б): 1 – каротажный зонд; 2 – тензоманометр; 3 – система трубопроводов; 4 – гидравлический насос; 5 – измеритель деформации стенок скважины

14 ISSN 0017-2278 ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ, 2018, № 6

Натурные исследования характера деформирования и разрушения во времени соляных междукамерных целиков и междупластий

Для установления взаимосвязи между деформациями элементов камерной системы разработки (междупластий и междукамерных целиков) и оседанием земной поверхности проведены длительные исследования характера деформирования подработанного массива.

Изучение процессов деформирования и характера разрушения целиков, междупластья и кровли очистных выработок осуществлялось на замерных станциях, представляющих собой систему контурных и глубинных реперов, расположенных в одном сечении на обоих отрабатываемых пластах АБ и Kpll. Места заложения замерных станций выбирали таким образом, чтобы максимально охватить все разнообразие условий ведения горных работ и обеспечить возможность долговременного наблюдения. Над экспериментальными участками на земной поверхности располагали нивелирные профильные линии, что позволяло проводить сопоставление результатов подземных и поверхностных наблюдений [18].

Анализ результатов подземных измерений показал, что деформации камер на экспериментальных участках развиваются по-разному. Характер деформирования камерного блока определяется главным образом степенью нагружения целиков. При схожем коэффициенте нагружения по обоим пластам целики деформируются одновременно. Значительное их различие приводит к интенсификации деформирования наиболее нагруженных целиков, при этом на втором пласте наблюдается практически полное отсутствие деформационных процессов. Наиболее нагруженный пласт в таких условиях работает как зашитный. Установлено, что на участках с большим содержанием глинистого материала в кровле отрабатываемых сильвинитовых пластов (юго-восточная часть шахтного поля рудника БКПРУ-2) в течение первых 1-2,5 мес после проходки происходит интенсивное расслоение пород кровли нижележащего пласта Kpll с последующим обрушением глинистых коржей, при этом в деформирование вовлекаются все слои междупластья КрІІ-АБ. При подходе очистных работ к створу замерной станции в камерах отмечается резкая активизация процессов расслоения пород кровли и пучения почвы. При дальнейшей отработке пластов скорость деформирования пород почвы очистных камер пласта АБ снижается до прежнего уровня. В северо-восточной части шахтного поля рудника БПКРУ-2, где содержание глины значительно меньше, основная доля деформаций приходится на приконтурный слой кровли пласта Kpll, при этом величины деформаций на порядок меньше.

Для оценки состояния пород междупластья предложена методика, основанная на натурных исследованиях деформационных показателей массива с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана (**рис. 2**, *a*), позволяющего определять модули деформации вмещающих пород (см. рис. 2, *б*) по диаграммам деформирования стенок скважин при их нагружении [19]. Статистическая обработка результатов исследования деформационных показателей и состояния кровли очистных камер показала, что критическим значением модуля деформации пород, при котором



Рис. 3. Зависимость безразмерного коэффициента k_n от времени, прошедшего с момента отработки камеры

происходит обрушение междупластья, является величина, равная 1100 МПа.

Для установления взаимосвязи деформации камерного блока с оседанием земной поверхности было проведено нормирование результатов и определен безразмерный коэффициент k_{n} , после чего выполнен анализ изменения этого параметра в зависимости от времени, прошедшего с момента отработки камеры (**рис. 3**).

$$k_{\eta} = \frac{\eta}{\epsilon}$$

где η — скорость оседания земной поверхности; ε — скорость продольного деформирования камерного блока (или суммарная деформация целиков).

Полученная зависимость характеризует перераспределение деформаций в подработанном массиве и свидетельствует о запаздывании процессов сдвижения земной поверхности от момента начала разрушения целиков в руднике.

Результаты инструментальных измерений являются исходной информацией для настройки модели при расчете устойчивого состояния грузонесущих элементов камерной системы разработки методами математического моделирования.

Методика дистанционного контроля устойчивости междукамерных целиков

Измерениями деформаций массива в окрестности очистных камер установлено, что наиболее информативным показателем, который с высокой степенью надежности отражает геомеханическую обстановку на участке, является поперечная деформация целиков. В связи с этим в качестве критерия степени устойчивости целиков рекомендуется использовать величину поперечного деформирования (расслоения), измеряемую на некотором расстоянии от контура выработки. Для мониторинга устойчивости целиков предложена система долговременных измерений горизонтальных деформаций в приконтурном массиве целиков датчиками линейных перемещений. Цифровая измерительная система интегрирована в существующую на рудниках ПАО «Уралкалий» сеть сейсмологического контроля. Поступающие от шахтных регистраторов данные обрабатываются центром сбора информации, расположенным на земной поверхности и передаются посредством сети Интернет для дальнейшего анализа. В случае выявления участков интенсивного развития процессов деформирования целиков геомеханическая ситуация на отрабатываемом участке уточняется детальными экспериментальными и теоретическими исследованиями процессов деформирования элементов системы разработки и всей подрабатываемой толщи.

Заключение

Таким образом, комплексная реализация лабораторных, натурных и теоретических исследований особенностей механиче-

> «GORNYI ZHURNAL», 2018, № 6, pp. 13–16 DOI: 10.17580/gzh.2018.06.02

Deformation processes in rock mass and stoping system elements

Information about authors

- V. A. Asanov¹, Head of Laboratory, Doctor of Engineering Sciences, ava@mi-perm.ru
- A. V. Evseev¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences
- I. L. Pankov¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences
- V. N. Toksarov¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences
- ¹ Mining Institute, Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

Abstract

Safety of underground mining of water-soluble minerals depends in many ways on the deformation dynamics in load-bearing elements of a mining system. According to the analysis of the condition of stopes in mines at the Upper Kama Potash Deposit, the roof of stopes in many instances looses stability prior to expiration of the stope life time set in accordance with the technological conditions of mine operation, which elevates the risk of failure of rib pillars and discontinuity of impermeable strata.

The article discusses the lab-scale and full-scale research data on deformation and failure of elements (rib pillars and partings) in the system of open stoping in sylvinite seams. The research findings are used to adjust mathematical model of stress state of undermined salt rocks. The extensive examination of physical and mechanical properties of salt rocks under different loading conditions shows that clay partings and very poor quality of rock mass are most best pronounced in indexes of clay and salt rock deformation, which has made it possible to develop an estimation procedure of stope roof stability using in situ measurement data on modulus of deformation.

From the studies into deformation processes in undermined rock mass, deformations of stoping system elements are related with the surface subsidence. For the stability control in permeable strata, the system of monitoring of rib pillars is developed.

Measurements of deformations in host rocks surrounding stopes show that the most informative parameter is lateral deformation of pillars. In this connection, as a criterion of pillar stability, it is recommended to use the value of lateral deformation measured at some distance from the boundary of an underground excavation. A system of long-term measurement of lateral deformations using displacement sensors is proposed for monitoring stability of pillars.

The integrated implementation of the experimental techniques and theoretical approaches allows increasing validity of stability prediction for structural elements of stoping system and for integrity of impermeable strata.

Keywords: salt rocks, physical and mechanical properties, stress state of rock mass, pillar stability. .

References

- Available at: http://www.gosnadzor.ru/industrial/mining/acts/gornorud_object/pr599/ (accessed: 15.04.2018).
- Sustainable development. Uralkali. 2018. Available at: http://www.uralkali.com/ru/sustainability/ (accessed: 15.04.2018).

ских свойств и напряженного состояния пород приконтурного массива позволяет повысить достоверность прогнозных оценок устойчивости конструктивных элементов камерной системы разработки и своевременно принимать конструктивные меры для предотвращения аварийных ситуаций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-45-590681.

Библиографический список

См. англ. блок. 🕰

- 3. Usolsky Potash Plant to future generations. Promyshlennost i bezopasnost. 2013. No. 5. pp. 52–55.
- Territorial construction norms TSN 22-301-98. Building in the undermined territories of the Upper Kama Potash Deposits. Purposes of building protection activities. Perm : Perm Krai Authorities. 1998. 95 p.
- Baryakh A. A., Lobanov S. Yu., Lomakin I. S. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51, No. 4. pp. 696–706.
- Artkhonghan K., Sartkaew S., Thongprapha T., Fuenkajorn K. Effects of stress path on shear strength of a rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 104. pp. 78–83.
- Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., Babkin A. I., Tsayukov A. A. Seismic-geomechanical prediction of water-impervious strata state in potassium mines. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, No. 6.
- Sriapai T., Walsri C., Fuenkajorn K. True-triaxial compressive strength of Maha Sarakham salt. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 61. pp. 256–265.
- You M. True-triaxial strength criteria for rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009. Vol. 46, Iss. 1. pp. 115–127.
- Wang G., Zhang L., Zhang Y., Ding G. Experimental investigations of the creep-damage-rupture behaviour of rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 66. pp. 181–187.
- Stavrogin A. N., Tarasov B. G. Experimental physics and rock mechanics. Saint-Petersburg : Nauka, 2001. 343 p.
- Baryakh A. A., Asanov V. A., Pankov I. L. Physical and mechanical properties of salt rocks at the Upper Kama Potash Salt Deposit : Educational aid. Perm : Izdatelstvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008. 199 p.
- Zong Y., Han L., Wei J., Wen S. Mechanical and damage evolution properties of sandstone under triaxial compression. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26, Iss. 4. pp. 601–607.
- Li H. Z., Xia C. C., Wang X. D., Zhou J. F., Zhang C. S. Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimens. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2008. Vol. 27, lss. 10. pp. 2118–2123.
- Liang W., Yang C., Zhao Y., Dusseault M. B., Liu J. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007. Vol. 44, Iss. 3. pp. 400–411.
- Zhang H., Wang Z., Zheng Y., Duan P., Ding S. Study on tri-axial creep experiment and constitutive relation of different rock salt. *Safety Science*. 2012. Vol. 50, Iss. 4. pp. 801–805.
- Pankov I. L., Asanov V. A., Udartcev A. A. The research on the influence of load degree and sample shape on salt rock deformation during creeping. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2013. No. 1, pp. 246–252.
- Dyagilev R. A., Shulakov D. Y., Verholantsev A. V., Glebov S. V. Seismic monitoring in potash mines: observation results and development aspects. *Eurasian Mining*. 2013. No. 2, pp. 24–28.
- Asanov V. A., Baryakh A. A., Toksarov V. N., Evseev A. V. Geomechanical analysis procedure for long-term stability of rib pillars. Science and technology to support mining: International scientific and practical conference proceedings. Almaty. 2015. Vol. 87. pp. 91–95.