

ГОРНАЯ ГЕОМЕХАНИКА В ПРОШЛОМ, НАСТОЯЩЕМ И БУДУЩЕМ



В. Н. ЛУШНИКОВ,
главный геомеханик ООО «УК Полиус»,
lushnikovvn@polyus.com

Горная геомеханика (механика скальных горных пород) — одна из двух составляющих геомеханики как науки (вторая составляющая — механика грунтов) — относительно недавно нашла свое применение в горнодобывающей промышленности. Отдельные шаги в понимании поведения породных массивов в строительных сооружениях (тоннелях, фундаментах и горных выработках) были предприняты еще в конце XIX — начале XX в. [1, 2], но до начала Второй мировой войны инженерно-геологическое изучение скальных пород ограничивалось в основном лабораторными исследованиями физико-механических свойств и расчетами горного давления на основе теории упругости, а для оценки устойчивости выработок в скальных массивах применяли методы, заимствованные из механики грунтов, заложенные еще «отцом механики грунтов» австрийским инженером Карлом фон Терцаги [3]. Однако эти методы не вполне соответствовали целям, поскольку были разработаны для относительно однородных сред. И хотя некоторые исследователи [4, 5] обращали внимание на неоднородность скальных пород, понимая, что наиболее слабым звеном в их прочности являются разрывные нарушения сплошности, широкого распространения в инженерном сообществе данный подход в то время не получил.

В 1950-е годы, когда после Второй мировой войны во всем мире началось строительство новых горнодобывающих предприятий в невиданных доселе масштабах, возникла острая необходимость разработки практических методов расчета устойчивости выработок в скальных породах. Пиком активности исследовательской деятельности в области горной геомеханики является период 1960–1980-х годов, считающийся в некотором роде «ренессансом» горной геомеханики [6], — именно на него приходится максимальное число исследований по изучению влияния нарушений сплошности в скальных массивах на устойчивость выработок [7–12]. В этот период были разработаны четыре ключевые рейтинговые системы классификации массива горных пород, все с выраженным акцентом на характеризацию трещиноватости скальных массивов: NATM (Новый австрийский туннельный метод [7]), RMR (по Бенявскому) [13], Q-system (по Бартону) [14] и MRMR (по Лобшеру) [15]. Широкое распространение получили исследовательские программы по изучению влияния нарушений сплошности на устойчивость откосов карьеров и подземных выработок в разных частях света, особенно в Канаде, Австралии, ЮАР, Великобритании, США и СССР [16–24]. В 1962 г. в Зальцбурге по инициативе профессора Леопольда Мюллера, выдающегося

австрийского инженера-геолога, автора широко известной монографии «Der Felsbau» (Строительство в скальных массивах [8]) было организовано Международное общество по механике горных пород (International Society for Rock Mechanics), ставшей главной профессиональной организацией горных геомехаников всего мира, активной по сегодняшний день и проводящей конгрессы раз в 4 года.

Один из наиболее весомых вкладов в понимание поведения структурно-неоднородного анизотропного массива горных пород был сделан исследовательской группой Королевского высшего горнотехнического училища при Имперском колледже Лондона под руководством профессора Эверта Хука, разработавшей простые, но эффективные методы оценки прочности нарушений сплошности в полевых условиях. Считающийся ныне основополагающим критерий разрушения массива Хука — Брауна был разработан этой группой в конце 1970-х годов [25]. Тогда же многие исследователи пришли к серьезному пониманию грунтовых вод как одного из основных факторов, негативно влияющих на устойчивость откосов. В приложении к подземным горным работам механика скальных пород также интенсивно развивалась. Был сформулирован основной подход к геотехническому проектированию подземных выработок: характеристика горного массива → разработка геотехнической модели → анализ систем разработки с выбором наиболее оптимальной → наблюдение за массивом во время разработки → ретроспективный анализ реакции массива на выемку → корректировка параметров разработки. Как и в случае оценки устойчивости откосов, здесь также основной акцент был сделан на изучение нарушений сплошности пород: замеры параметров залегания нарушений, выделение основных систем трещин, определение прочности трещин на сдвиг, оценка степени шероховатости и изменения стенок трещин.

Где же мы находимся сейчас, в 2020-м?

С 1980-х годов по сей день происходит консолидация и закрепление знаний, полученных во время «ренессанса». Наибольшее развитие в этот период получила разработка оборудования и методик в трех направлениях:

- автоматизированный сбор геолого-структурных данных (ориентаторы керна, акустический картаж стенок трещин, фотограмметрическая съемка, в том числе с беспилотных летательных аппаратов);
- автоматизированный мониторинг устойчивости выработок (радары устойчивости, роботизированные тахеометры, беспроводная передача логгерами на компьютер в геотехнический офис данных от различных датчиков — пьезометров, инклинометров, экстензометров, геофонов и др., спутниковая интерферометрия, системы сейсмического мониторинга);
- компьютерное геолого-структурное и численное моделирование — разработка, верификация на практике и постоянное усовершенствование коммерческих программных продуктов,



разработанных изначально в исследовательских организациях за счет бюджетных и спонсорских средств.

На всех современных предприятиях, занимающихся добычей полезных ископаемых, горная геомеханика заняла прочное место как одна из ключевых технических дисциплин. Связано это прежде всего с тем, что горно-геологические условия при разработке месторождений неуклонно усложняются: месторождения истощаются, содержание полезных компонентов снижается, спрос на металлы растет – все это заставляет горняков вести разработки все глубже и все масштабней, что напрямую сопряжено с ростом риска потери устойчивости горных выработок. Поэтому любое современное горнодобывающее предприятие обязательно имеет в своем штате геотехническую группу, а также регулярно привлекает специализированные консалтинговые фирмы для проведения аудитов, предоставления экспертных оценок и рекомендаций. Все проекты по разработке карьеров и шахт (и даже относительно небольшие корректировки планов горных работ) проходят обязательное экспертное согласование со специалистами-геотехниками.

В настоящее время качественная оценка геотехнического риска в привычной терминологии «низкий-высокий» уже не считается достаточной – многие компании начинают практиковать количественную оценку риска (Quantitative risk analysis – QRA), когда риск выражается конкретным числовым значением (например: «...годовой риск потери жизни по причине неустойчивости выработки равен 1 из 100000» или «...годовой риск экономических потерь равен 20 млн долларов»), базовая методология которой была разработана в 1980–1990 гг. [26–30]. Современная формулировка QRA в приложении к геотехническим рискам выражается следующей зависимостью [31–34]:

$$R_D = P_H P_S P_T V,$$

где R_D – годовой риск (потери жизни, потери оборудования, экономических потерь); P_H – вероятность существования источника геотехнической опасности (обрушения, вывала, оползня, камнепада); P_S – вероятность нахождения человека (техники, части инфраструктуры) на пути возможной траектории источника опасности; P_T – временная вероятность контакта человека (техники,

части инфраструктуры) с источником опасности; V – уязвимость (человека) или стоимость (техники, инфраструктуры, простоя по причине зачистки, остановки предприятия на длительный срок).

Если рассчитанный таким образом геотехнический риск на каком-либо участке борта карьера или подземной выработки превышает критерий приемлемости, принятый в промышленности в целом или конкретно для данного предприятия, разрабатываются соответствующие мероприятия по минимизации риска до тех пор, пока критерий приемлемости не будет удовлетворен.

Наиболее надежный метод снижения геотехнического риска – это уменьшение величин P_S и P_T . Для этого зоны активных горных работ покрывают системой оперативного мониторинга устойчивости. В современных условиях наиболее эффективным методом является радарное сканирование как в карьерах, так и в подземном строительстве. Полное исключение риска достигается обнулением этих двух параметров, что, к сожалению, практически неосуществимо, так как это означало бы полный вывод человека из зоны активных работ, а в наше время далеко не везде используют автономное оборудование (хотя масштаб его применения растет год от года).

Значительно более сложным с позиции управления риском является параметр P_H – вероятность существования источника опасности. Его можно выразить численно только в результате проведения значительного объема геотехнических исследований породного массива в целях оценки геолого-структурного строения, порового давления, граничных условий, а также выполнив расчеты устойчивости с применением различных методов – аналитических, вероятностных, численных. Это именно тот параметр, на изучение которого выделяется наибольший объем средств и затрачивается наибольшее количество времени, поскольку именно он влияет на принятие решений по проектированию конструктивных элементов выработок в самом начале отработки месторождения, следовательно, он должен быть оценен как можно раньше и с максимально возможной достоверностью в целях обеспечения проектной устойчивости горной выработки.

В распоряжении современных геомехаников имеются все необходимые инженерные средства для эффективного управления геотехническими рисками — системы мониторинга, испытательные приборы и установки, многочисленные пакеты программного обеспечения, компьютеры с многоядерными процессорами и мощными видеокартами. Остается лишь добавить к этому компетенцию и опыт геомехаников, доступность экспертного мнения и, главное, понимание руководства предприятия важности геотехнических аспектов производства — тогда можно значительно повысить безопасность персонала и снизить риск экономических потерь.

А что насчет будущего?

...Пробував очередную взрывную скважину, автономный буровой станок сканирует акустическим или оптическим зондом стенки скважины, передавая автоматически по радиоканалу геолого-структурные данные и параметры бурения на компьютер в Центр геотехнического контроля, где в автоматическом режиме обновляются различные модели — геолого-структурная, литологическая, модели буримости и взрываемости пород. Буровой станок получает от компьютера обратную связь и, если требуется, корректирует параметры бурения. Данные бурения также передаются в Центр проектирования буровзрывных работ, где проект на взрыв автоматически обновляется и передается на автономную мобильную смесительно-зарядную установку, где корректируются свойства взрывчатых веществ.

В это же время данные из различных источников комплексной системы мониторинга устойчивости бортов карьера автоматически передаются в тот же центр геотехнического контроля, где в процессе их обработки происходит автоматическое обновление модели порового давления и численной модели устойчивости бортов, а на экран выдается обновленная карта геотехнических рисков в цветовой гамме, где для каждого цвета компьютером предлагаются соответствующие мероприятия по контролю риска: где-то необходимо эвакуировать персонал и технику, где-то добавить дренажные скважины для снижения порового давления, где-то выполнить обрешку ослабленных блоков, где-то установить анкерно-сеточную крепь или противокаменепадный барьер. На этом этапе в процесс вступает человек для принятия оптимального решения по контрольным мероприятиям. Аналогичную картину можно нарисовать и для подземных горных работ.

Это горная геомеханика завтрашнего дня. Как скоро наступит это завтра, трудно сказать, может через 20 лет, а может через 50, но совершенно очевидно, что мы уже находимся на пути автоматизации производства, и ускорение прихода такого завтра зависит прежде всего от степени понимания ответственности за безопасность людей и экономическую привлекательность горнодобывающего предприятия.

Библиографический список

1. *Fayol M.* Sur les mouvements de terrain provoques par l'exploitation des mines // Bull. Soc. de l'industrie Minerale. 1885. Vol. 14. P. 805–858.
2. *Young L. E., Stoek H. H.* Subsidence resulting from mining // University of Illinois Engineering Experiment Station bulletin. 1916. No. 91.
3. *Terzaghi K.* Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage. — Leipzig u. Wien: F. Deuticke, 1925. — 399 p.
4. *Fenner R.* Untersuchungen zur erkenntnis des gebirgsdruckes // Glueckauf. 1938. Vol. 75. P. 681–695; 705–715.
5. *Labasse H.* Les pressions de terrains dans les mines de houille — Les pressions de terrains autour des puits. Rev. Univ. des Mines. 1949. Vol. 5(3). P. 78–88.
6. *Hood M., Brown E. T.* Mining rock mechanics, yesterday, today and tomorrow // Proc. of 9th Congress ISRM. 25–28 August, Paris, France, 1999. P. 1551–1576.
7. *Lauffer H.* Gebierdsklassifizierung für den Stullenbau // Geologie und Bauwesen. 1958. Vol. 24(1). P. 46–51.
8. *Müller L.* Der Felsbau (Bd. 1). Stuttgart: Ferdinand Enke, 1963. — 624 p.
9. *Протоdjяконов М. М., Чирков С. Е.* Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. — М.: Наука, 1964. — 66 с.
10. *Patton F. D.* Multiple modes of shear failure in rock // Proc. 1st Int. Congress of Rock Mech. Lisbon, VoU, 1966. — P. 509–513.
11. *Obert L., Duval, W. I.* Rock mechanics and the design of structures in rock. — New York: John Wiley, 1967.
12. *Piteau D. R.* Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock // Proc. Symp. Planning Open Pit Mines, Johannesburg / Ed. by P. W. J. van Rensburg, A. A. Balkema. — Capetown, 1970. P. 33–53.
13. *Bieniawski Z. T.* Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling // Proc. of 3rd International Congress on Rock Mechanics. — Denver, 1974. Vol. II. A. P. 27–32.
14. *Barton N., Lien R., Lunde J.* Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics. 1974. Vol. 6. P. 189–236.
15. *Laubscher D. H.* Geomechanics classification of jointed rock masses — mining applications. Transactions Institute of Minerals and Metals, Section A, 1977. 86. P. A1–A8.
16. *Goodman R. E.* The mechanical properties of joints // Proc. of 3rd International Congress on Rock Mechanics, Denver. — Washington DC: National Academy of Sciences, 1974. Vol. 1, Part A. P. 127–140.
17. *Goodman R. E.* Methods of geological engineering in discontinuous rock. — St Paul: West Publishing, 1976.
18. *Barton N.* The shear strength of rock and rock joints // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1976. Vol. 13. No. 9. P. 255–279.
19. *Priest S. D., Hudson J. A.* Discontinuity spacings in rocks // Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1976. Vol. 13. P. 135–148.
20. *Brawner C. O., Milligan V.* (eds). Stability in open pit mining // Proc. of 1st Int. Conf. Stability in Open Pit Mining, Vancouver. — New York: AIME, 1971.
21. *Чернышев С. Н.* Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. — М.: Недра, 1984. — 113 с.
22. *Hoek E.* Strength of jointed rock masses // Geotechnique. 1983. Vol. 33. P. 187–223.
23. *Hoek E., Brown E. T.* Underground excavations in rock. — London: Inst. Min. Metall., 1980.
24. *Mathews K. E., Hoek, E., Wyllie D. C., Stewart S. B. V.* Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 meters in hard rock. Golder Associates Report to Canada Centre for Mining and Energy Technology (CANMET), Department of Energy and Resources, Ottawa, Canada, 1980.
25. *Hoek E., Brown E. T.* Empirical strength criterion for rock masses // J. Geotech. Eng. Div., 1980. Vol. 106. P. 1013–1035.
26. *Varnes D. J.* Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice // Natural Hazard. Vol. 3. — Commission on Landslides of the IAEG, UNESCO, Paris, 1984. — 63 p.
27. *Einstein H. H.* Landslide risk assessment procedure // Proc. of 5th International Symposium on Landslides. — Lausanne, 1988. Vol. 2. P. 1075–1090.
28. *Fell R.* Landslide risk assessment and acceptable risk // Canadian Geotechnical Journal. 1994. Vol. 31. P. 261–272.
29. *Bunce C. M., Cruden D. M., Morgenstern N. R.* Assessment of the hazard from a rockfall on a highway // Can. Geotech. J. 1997. Vol. 34. P. 344–356.
30. *Hungr O., Evans S. G., Hazzard J.* Magnitude and frequency of rockfalls and rockslides along the main transportation corridors of South-Western British Columbia // Can. Geotech. J. 1999. Vol. 36. P. 224–238.
31. Australian Geomechanics Society. Landslide risk management concepts and guidelines. AGS, Sub-committee on landslide risk management // Australian Geomechanics. 2000. Vol. 35. No. 1. P. 49–92.
32. *Louchnikov V.* Application of QRA to rockfall hazards along slopes in Adelaide Hills. Hon. Thesis, University of South Australia, 2001. — 139 p.
33. *Meyers A. G., Herraman R. N., Blyth J. R.* Rock fall remediation along the Torrens River Valley // Proc. of New Zealand Geotechnical Society Symposium, Christchurch, 2001. P. 365–372.
34. *Fell R., Ho K. K. S., Lacasse S., Leroi E.* A framework for landslide risk assessment and management // Landslide Risk Management. — London: Taylor and Francis, 2005. P. 3–26. **РЖ**