ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.831 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-28-35

Оценка коэффициента крепости горных пород косвенными методами

Авдеев А. Н.[1]*, Сосновская Е. Л.[1], Болотнев А. Ю.[2]
[1] Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
[2] Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Реферат

Введение. *При разведочных, строительных и горнодобывающих работах необходимо проводить оценку физико-механических свойств горных пород. Однако лабораторные испытания пород дорогостоящи, трудоемки и требуют большого количества качественных образцов горных пород. Возникает проблема оперативной оценки физико-механических показателей косвенными, неразрушающими методами. Проблема рассмотрена на примере одного из базовых свойств – коэффициента крепости по шкале М. М. Протодьяконова.*

Методики. *Сделан аналитический обзор основных косвенных способов определения коэффициента крепости на базе прочностных, упругих и акустических свойств горных пород на основании статистических эмпирических зависимостей В. В. Ржевского, Г. Я. Новика, Л. И. Барона; К. Л. ТерМикаэляна, А. И. Берона, М. М. Протодьяконова. Выбраны наиболее перспективные методики неразрушающих лабораторных испытаний модуля упругости и скорости продольной волны.*

Результаты и выводы. *Проведены расчеты коэффициента крепости несколькими способами на примере окварцованных песчаников, отобранных из разведочной скважины газоносного месторождения. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов друг с другом и с кадастровыми справочными материалами. Наиболее оптимальными для расчетов оказались зависимости В. В. Ржевского, Г. Я. Новика, Л. И. Барона при оценке крепости по модулю упругости и зависимости А. И. Берона, Л. И. Барона при расчетах на базе акустических характеристик.*

Ключевые слова: *прочностные, упругие и акустические свойства скальных пород; коэффициент крепости; предел прочности на сжатие; модуль упругости; скорость продольной волны; эмпирические зависимости; расчетные методики.*

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00581-19-00 по теме № 0328-2019-0005.

Введение. При освоении месторождений полезных ископаемых, геологических и геомеханических исследованиях, при строительстве горнотехнических сооружений всегда проводят оценку физико-механических свойств горных пород [1–5]. Прочностные и деформационные характеристики основных литотипов необходимо знать для эффективного планирования и производства работ.

В то же время определение свойств горных пород как в лаборатории, так и в полевых условиях трудоемко и требует больших временных затрат. Кроме того, для статистически значимых результатов измерений требуется значитель-

ный объем кернового материала, большая часть которого будет разрушена в процессе проведения лабораторных испытаний. Получение качественных образцов в необходимом количестве не всегда возможно, что связано со спецификой проведения геологоразведочных работ. И тогда возникает актуальный вопрос определения необходимых показателей косвенными, неразрушающими методами.

Косвенные методы в физике горных пород обычно используют на базе статистически-эмпирического подхода. В России детальные, статистически значимые лабораторные исследования физико-механических свойств проводили большие коллективы под руководством Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова и многих других [4, 6–9]. Они анализировали прочностные, деформационные, акустические, тепловые, электрические, магнитные и другие показатели по всем значимым литотипам горных пород, получаемые в процессе разведки и эксплуатации месторождений, строительстве технических сооружений. Научные результаты оформлялись в виде многочисленных монографий, справочников, кадастров, сборников статей, методических указаний, книг и т. д. В работах систематизировались, анализировались и выявлялись взаимосвязи упругих и прочностных характеристик. По мере накопления и обработки данных получено большое количество эмпирических закономерностей, которые можно использовать для ускорения и удешевления лабораторных испытаний. Однако при использовании этих закономерностей возникает проблема выбора конкретного метода и его применимости в конкретных условиях именно из-за эмпирического характера предлагаемых зависимостей.

Рассмотрим эту проблему на примере оценки одного из наиболее используемых, базовых физико-механических показателей в России и странах СНГ – коэффициента крепости по шкале М. М. Протодьяконова *f*. На его основе определяют сроки проведения работ, мощностные показатели техники, рассчитывают объемы материальных ресурсов, выбирают способы и средства разрушения горных пород.

Методики. Рассмотрим возможные подходы к оценке коэффициента крепости как лабораторными, так и расчетными методами.

Одним из наиболее простых лабораторных методов определения крепости является метод «толчения». Широкое распространение получили методы раздавливания образцов правильной и неправильной формы. Несмотря на простоту методов, все они достаточно трудоемки и требуют значительных временных затрат и достаточного количества кернового материала.

Широко известен расчетный метод определения крепости, предложенный самим М. М. Протодьяконовым, на базе одноосного предела прочности на сжатие:

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{9{,}81}, \qquad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на одноосное сжатие, МПа.

Позднее, анализируя накопившиеся данные, Л. И. Барон [8] уточнил эту зависимость:

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{300} + \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{30}}. \qquad (2)$$

Предел прочности на одноосное сжатие в формулах (1), (2) обычно определяется стандартными лабораторными испытаниями. Однако его можно оценить и косвенными методами.

Так, В. В. Ржевский, Г. Я. Новик [4] установили, что с пределом прочности породы на одноосное сжатие, кг/см^2, коррелируется модуль упругости E:

$$\sigma_{сж} = 42 \cdot 10^{-4} E - 445. \quad (3)$$

Совместное решение формул (2) и (3) позволяет определять коэффициент крепости, зная только модуль упругости.

По результатам многочисленных лабораторных испытаний образцов горных пород в ходе строительства гидротехнических сооружений, К. Л. Тер-Микаэляном также обнаружена связь между коэффициентом крепости и модулем упругости, МПа [9]:

$$E = \frac{1,3f}{26 - f} \cdot 10^4. \quad (4)$$

После преобразования формулы (4) можно получить еще один вариант коэффициента крепости на базе модуля упругости:

$$f = 2\left(\frac{10^3}{E} + \frac{1}{13}\right)^{-1}. \quad (5)$$

Следует однако учитывать, что модуль упругости – это деформационная характеристика. В процессе лабораторных испытаний модуля упругости наиболее хрупкие образцы зачастую подвержены разрушению. В условиях дефицита материала образцов приоритет имеют неразрушающие методы определения физико-механических характеристик. Такие способы используются при определении акустических свойств горных пород. Многие известные исследователи занимались и занимаются выявлением зависимостей между акустическими и механическими свойствами горных пород [10, 11].

В этом аспекте вызывают интерес эмпирические зависимости А. И. Берона [12], который предложил использовать скорость продольных волн C_p, м/с, для расчета предела прочности на сжатие, кг/см^2, и твердости горной породы по Шрейнеру, кг/мм^2:

$$\sigma_{сж} = \left(0,440C_p - 530\right); \quad (6)$$

$$P_{Ш} = \left(0,085C_p - 153\right). \quad (7)$$

Известно, что М. М. Протодьяконов для расчета твердости горной породы по Шрейнеру $P_{Ш}$, кг/мм^2, использовал предел прочности на сжатие [6]:

$$P_{Ш} = 22,5\sigma_{сж}. \quad (8)$$

Таким образом, предел прочности на сжатие можно получить, используя критерий скорости продольной волны, еще одним способом, преобразовав формулы (5) и (6):

$$\sigma_{сж} = \frac{\left(0,085C_p - 153\right)}{22,5}. \quad (9)$$

Совместно решая (2) и (6) или (2) и (8), можно получить коэффициент крепости, зная скорость продольной волны.

Результаты. Рассмотрим возможность применения изложенных зависимостей на примере оценки коэффициента крепости по 24 образцам окварцованного песчаника, взятым из разведочной скважины нефтегазового месторождения. Проведем расчеты крепости четырьмя способами: два варианта на основании лабораторных испытаний модуля упругости и два варианта по неразрушающим испытаниям акустических свойств (скорости продольной волны) (табл. 1).

Таблица 1. Расчетные значения коэффициента крепости окварцованных песчаников
Table 1. Calculated values for the strength coefficient of the siliceous sandstones

Номер образца	Скорость продольной волны, м/с	Модуль упругости, ГПа	Расчетное значение коэффициента крепости в зависимости			
			от модуля упругости		от скорости продольной волны	
			Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1	5401,0	66,93	17	9	11	14
2	5371,0	61,78	16	8	11	14
3	5452,6	64,31	16	9	11	14
4	5200,0	54,80	14	8	11	14
5	5452,6	60,47	16	8	11	14
6	5490,1	69,13	18	9	11	14
7	4755,7	44,32	12	7	10	12
8	4850,3	43,86	12	7	10	13
9	5269,0	60,39	16	8	11	14
10	5523,2	64,98	17	9	11	14
11	5320,1	62,02	16	8	11	14
12	4809,2	42,64	11	6	10	13
13	4560,4	39,41	11	6	9	12
14	4682,2	41,12	11	6	10	12
15	4458,3	36,84	10	6	9	12
16	5204,7	51,75	14	7	11	14
17	5037,7	52,11	14	7	10	13
18	5521,5	64,52	17	9	11	14
19	5198,4	57,97	15	8	11	14
20	4447,6	38,69	10	6	9	12
21	4865,5	50,13	13	7	10	13
22	4885,3	48,54	13	7	10	13
23	5061,0	48,37	13	7	10	13
24	4784,5	43,44	12	7	10	12
Средние значения			13,9±2,4	7,5±1,1	10,4±0,7	13,3±0,8

Используемые формулы по вариантам расчета следующие:

– вариант 1 – формулы (2), (3) с использованием зависимостей В. В. Ржевского, Г. Я. Новика, Л. И. Барона;

– вариант 2 – формула (5) с использованием зависимости К. Л. Тер-Микаэляна;

– вариант 3 – формулы (2), (9) с использованием зависимостей А. И. Берона, М. М. Протодьяконова, Л. И. Барона;

– вариант 4 – формулы (2), (6) с использованием зависимостей А. И. Берона, Л. И. Барона.

Сравнительный анализ результатов расчетов коэффициента крепости позволяет отметить следующее.

Максимальное значение коэффициента крепости получено в варианте 1 (В. В. Ржевский, Г. Я. Новик). Здесь средняя крепость равна 13,9±2,4. Минимальное значение крепости (7,5±1,1) дает методика К. Л. Тер-Микаэляна (вариант 2). Обе методики используют для расчета модуль упругости. Но в варианте 1 дополнительно, в качестве промежуточного этапа расчетов, учитывается прочность на одноосное сжатие. Сходимость результатов по формулам (2), (3) и (5) невелика. Это естественно, так как обе используемые зависимости носят косвенный, эмпирический характер.

Варианты расчета 3 и 4 учитывают как скорость продольной волны, так и прочность на одноосное сжатие. Вариант 3 дополнительно использует твердость породы по Шрейнеру. Средняя крепость в варианте расчета 3 равна 10,4±0,7, в варианте 4 – 13,3±0,8.

Наибольшая сходимость результатов у вариантов 1 и 4. Диапазон коэффициентов крепости по этим методикам составляет 12–14. Значительно более низкое значение крепости по методике Тер-Микаэляна (вариант 2) можно объяснить тем, что Тер-Микаэлян оперировал ограниченными геоматериалами близповерхностных и обводненных (ослабленных) грунтов. Окварцованные песчаники, извлеченные из глубоких горизонтов, естественно, будут обладать более прочными характеристиками. Пониженные значения крепости в варианте расчета 3 можно объяснить тем фактом, что здесь используется дополнительно третья косвенная зависимость (расчет твердости по Шрейнеру). То есть добавление промежуточных косвенных зависимостей, очевидно, негативно сказывается на общей точности окончательного результата.

Сравним полученные результаты с кадастровыми справочными источниками.

В справочной литературе [2] среднее значение крепости песчаников f = 10. В кадастре 1975 г. [3] среднее значение предела прочности на сжатие у песчаников существенно кварцевого состава равно $\sigma_{сж}$ = 167 МПа, расчетный коэффициент крепости по формуле (2) составит 13. У Ржевского В. В., Новика Г. Я. [1, с. 82] $\sigma_{сж}$ = 147 МПа, расчетный коэффициент крепости – 12.

Таким образом в соответствии со справочными данными, коэффициенты крепости окварцованных песчаников с учетом их прочности на сжатие составляют 12–13, обычных песчаников – 10.

Наиболее близкими к кадастровым источникам являются результаты расчетов в вариантах 1 и 4. Учитывая, что в расчетах использованы результаты двух независимых друг от друга прямых лабораторных испытаний (модуля упругости и скорости продольной волны), можно рекомендовать эти варианты расчета для косвенной оценки крепости скальных пород при наличии лабораторно полученных модуля упругости и скорости продольной волны.

Заключение. На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Косвенные способы определения физико-механических характеристик в условиях дефицита качественных образцов горных пород, временных, материальных и экономических ресурсов горных предприятий и аналитических лабораторий являются перспективными.

Для оценки коэффициента крепости скальных пород по М. М. Протодьяконову можно применять предложенные комплексные расчетные методики с использованием результатов лабораторных испытаний упругих, прочностных и акустических характеристик.

В частности, для скальных пород газоносных месторождений наиболее применимы эмпирические зависимости В. В. Ржевского, Г. Я. Новика, Л. И. Барона,

А. И. Берона, полученные на базе предела прочности на одноосное сжатие, скорости продольной волны, модуля упругости.

Следует учитывать, что необходимо осознанно подходить к выбору косвенной методики. Из-за эмпирического характера большинства формул на результаты расчетов оказывают значительное влияние условия, в которых получены используемые зависимости. Также не стоит в расчетах без крайней необходимости добавлять промежуточные эмпирические зависимости. С каждой добавочной формулой понижается точность получаемых результатов.

Рекомендуется при косвенной оценке физико-механических показателей применять несколько независимых методик расчета. В случае отсутствия таких методик необходимо контрольное определение оцениваемого показателя по отдельным образцам горных пород. Таким образом, будет обеспечена достаточная надежность результатов исследований даже при ограниченном лабораторном материале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдеев А. Н., Сосновская Е. Л., Болотнев А. Ю., Батжаргал Д. Особенности изучения физико-механических свойств многолетнемерзлых массивов горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2019. Т. 42. № 2(67). С. 240–253. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253

2. Сосновская Е. Л., Батжаргал Д. Исследование физико-механических свойств горных пород нижних горизонтов Зун-Холбинского месторождения для прогноза его потенциальной удароопасности // Молодежный вестник ИрГТУ. 2019. Т. 9. № 2. С. 29–33. DOI: 10.25635/IM.2019.84.42807

3. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Under the editorship of R. Ulusay. Springer International Publishing, Switzerland, Cham. 2015; 293 p.

4. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1984. 359 с.

5. Khoshouei M., Bagherpour R. Predicting the geomechanical properties of hard rocks using analysis of the acoustic and vibration signals during the drilling operation // Geotechnical and Geological Engineering. International Journal. 2020. Vol. 38. P. 1573–1529. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01611-z

6. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / М. М. Протодьяконов [и др.]. М.: Недра, 1981. 192 с.

7. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 279 с.

8. Барон Л. И., Логунцов Б. М., Позин Е. З. Определение свойств горных пород. М.: Государств. науч.-техн. изд-во литер. по горн. делу, 1962. 332 с.

9. Тер-Микаэлян К. Л. О связи удельного коэффициента отпора и модуля деформации горных пород с коэффициентом крепости по М. М. Протодьяконову // Труды Гидропроекта. 1974. Вып. 33. С. 116–122.

10. Khoshouei M., Bagherpour R. Application of acoustic emission (AE) in mining and earth sciences: a review // Rudarsko-geološko-naftni zbornik (Mining-geological-petroleum engineering bulletin). 2019. Vol. 34. No. 4. P. 19–31. https://doi.org/10.17794/rgn.2019.4.3

11. Wang R., Deng X., Meng Y., et al. Application of ultrasonic-rebound method in fast prediction of rock strength // Geotechnical and Geological Engineering. International Journal. 2020. Vol. 38. P. 5915–5924. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01402-6

12. Исследование прочности и деформируемости горных пород / А. И. Берон [и др.]. М.: Наука, 1973. 207 с.

Поступила в редакцию 30 декабря 2020 года

Сведения об авторах:

Авдеев Аркадий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: avdeev0706@mail.ru

Сосновская Елена Леонидовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: stress.igd@mail.ru

Болотнев Александр Юрьевич – кандидат технических наук, технический руководитель лаборатории геомеханики и физики горных пород кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Иркутского национального исследовательского технического университета. E-mail: abolotnev@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-28-35

Strength coefficient estimation by indirect methods

Arkadii N. Avdeev[1], Elena L. Sosnovskaia[1], Aleksandr Iu. Bolotnev[2]
[1] Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.
[2] Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Abstract

Introduction. *In exploration, construction, and mining operations it is necessary to assess the physical and mechanical properties of rocks. However, laboratory rock tests are expensive, time-consuming, and require a large number of quality rock samples. There is a problem of rapid evaluation of physical and mechanical properties by indirect, non-destructive methods. The problem is considered on the example of one of the basic properties, the strength coefficient according to Protodiakonov's scale.*

Research methodology *included the analysis of the main indirect methods of determining the strength coefficient based on strength, elastic and acoustic properties of rocks on the grounds of statistical empirical relationships of V. V. Rzhevskii, G. Ia. Novik, L. I. Baron; K. L. Ter-Mikaelian, A. I. Beron, and M. M. Protodiakonov. The most promising methods based on non-destructive laboratory tests of modulus of elasticity and longitudinal wave velocity are selected.*

Results and conclusions. *The strength coefficient was calculated by several methods on the example of siliceous sandstones, selected from the exploration well of the gas-bearing field. The results were compared with each other and with cadastral references and materials. The most optimal for calculations were the dependences of V. V. Rzhevskii, G. Ia. Novik, and L. I. Baron when evaluating the strength coefficient by the modulus of elasticity, and the dependences of A. I. Beron and L. I. Baron when calculating based on acoustic characteristics.*

Keywords: *strength, elastic and acoustic properties of rock; strength coefficient; uniaxial compressive strength; modulus of elasticity; longitudinal wave velocity; empirical relationships; calculation methods.*

Acknowledgements. *The research was prepared under the IM UB RAS state contract no. 075-00581-19-00, theme no. 0328-2019-0005.*

REFERENCES

1. Avdeev A. N., Sosnovskaia E. L., Bolotnev A. Iu., Batzhargal D. Specifics of permafrost rock mass' physical-mechanical properties study in evaluation of ore deposit geotechnical conditions. *Izvestiia Sibirskogo otdeleniia sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiia, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*. 2019; 42; 2(67): 240–253. (In Russ.) Available from: DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253

2. Sosnovskaia E. L., Batzhargal D. Study of the physicomechanical properties of rocks in the lower horizons of the Zun-Kholbinskoye deposit to predict its potential impact hazard. *Molodezhnyi vestnik IrGTU = Youth Bulletin of IrSTU*. 2019; 9(2): 29–33. (In Russ.) Available from: DOI: 10.25635/IM.2019.84.42807

3. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Under the editorship of R. Ulusay, Springer International Publishing, Switzerland, Cham. 2015; 293 p.

4. Rzhevskii V. V., Novik G. Ia. *Fundamentals of rocks physics*. Moscow: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)

5. Khoshouei M., Bagherpour R. Predicting the geomechanical properties of hard rocks using analysis of the acoustic and vibration signals during the drilling operation. *Geotechnical and Geological Engineering. International Journal*. 2020; 38: 1573–1529. Available from: https://doi.org/10.1007/s10706-020-01611-z

6. Protodiakonov M. M. et al. *Distribution and correlation of physical properties of rocks.* Moscow: Nedra Publishing; 1981. (In Russ.)

7. *Reference book (cadastre) of physical properties of rocks*. Moscow: Nedra Publishing; 1975. (In Russ.)

8. Baron L. I., Loguntsov B. M., Pozin E. Z. *Determination of properties of rocks*. Moscow: State Scientific & Technical Publishing House of Mining Literature; 1962. (In Russ.)

9. Ter-Mikaelian K. L. On relation of specific back pressure coefficient and rock deformation modulus with rock solidity coefficient according to M. M. Protodiakonov. *Trudy Gidroproekta = Proceedings of Gidroproekt*. 1974; 33: 116–122. (In Russ.)

10. Khoshouei M., Bagherpour R. Application of acoustic emission (AE) in mining and earth sciences: a review. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (Mining-geological-petroleum engineering bulletin)*. 2019; 34(4): 19–31. Available from: https://doi.org/10.17794/rgn.2019.4.3

11. Wang R., Deng X., Meng Y., et al. Application of ultrasonic-rebound method in fast prediction of rock strength. *Geotechnical and Geological Engineering. International Journal*. 2020; 38: 5915–5924. Available from: https://doi.org/10.1007/s10706-020-01402-6

12. Beron A. I. et al. *Research of Strength and Deformability of Rocks*. Moscow: Nauka Publishing; 1973. (In Russ.)

Received 30 December 2020

Information about authors:

Arkadii N. Avdeev – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: avdeev0706@mail.ru
Elena L. Sosnovskaia – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: stress.igd@mail.ru
Aleksandr Iu. Bolotnev – PhD (Engineering), Technical Director, Laboratory of Geomechanics and Physics of Rocks, Department of Mineral Resource Development, Institute of Subsoil Use, Irkutsk National Research Technical University. E-mail: abolotnev@mail.ru

Для цитирования: Авдеев А. Н., Сосновская Е. Л., Болотнев А. Ю. Оценка коэффициента крепости горных пород косвенными методами // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 28–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-28-35
For citation: Avdeev A. N., Sosnovskaia E. L., Bolotnev A. Iu. Strength coefficient estimation by indirect methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 3: 28–35 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-28-35