

УДК 622.7.026.3

К ПРОБЛЕМЕ ТЕСТИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА АБРАЗИВНОСТЬ

А. С. Танайно

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Email: tanaino@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Проблема тестирования горных пород на абразивность состоит в несопоставимости соответствующих результатов, получаемых разными экспериментальными способами. Для ее решения предложен количественный метод оценки потенциальной абразивности по физико-механическим свойствам горных пород в канонической шкале структурно-иерархических представлений.

Абразивность, размер и форма зерен, твердость породообразующих минералов, пористость, сила связи между зёрнами, влажность

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОДХОД К ЕЕ РЕШЕНИЮ

В России и за рубежом вопросы абразивности горных пород интенсивно исследовались в 60–80-х годах прошлого столетия [1–10]. Изучение процессов взаимодействия пары “инструмент–порода” продолжается и в настоящее время как в части создания износостойких материалов и конструкций породоразрушающих инструментов, так и в поиске более эффективных методов тестирования горных пород на абразивность.

В мире создано множество экспериментальных методов для оценки абразивности горных пород, некоторые из них получили широкое распространение и используются как стандартные: в России — это метод Барона–Кузнецова для образцов неразрушенных пород [2], метод истирания дроби в навесках разрушенных пород [3]; за рубежом — Cerhar abrasion index (CAI — царапание, износ иглы) [6–10]. Не останавливаясь на особенностях, достоинствах, недостатках и принципах, положенных в их основу, а также конструктивных особенностях (специалистам они хорошо известны), отметим главное: *ни один из применяемых методов оценки абразивности горных пород не моделирует механизм износа рабочих инструментов в реальных технологических процессах*. Применительно к процессу бурения скважин это положение достаточно глубоко исследовано в [11]. Следовательно, результаты измерения (износ индентора, глубины царапания и др.), выполненные любым экспериментальным методом, по сути, отражают только процесс, положенный в основу метода, и не более.

Применительно к каждому методу предложены частные классификации по абразивности на основании данных, полученных в экспериментах. Особенности этих классификаций заключаются в том, что значению абразивности (неважно в каких единицах она измеряется) *ставится*

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00673-а).

в соответствие наименованию породы. Но породы с одинаковыми названиями, как правило, существенно различаются по физико-механическим свойствам. Так, пределы прочности при одноосном сжатии вмещающих горных пород Кузбасса изменяются в пределах, МПа: песчаники 10–200, алевролиты 8–140, аргиллиты 6–70 [12]. При этом известно, что прочность породы, кроме прочих свойств, — один из факторов, обуславливающих их потенциальную абразивность. Но поскольку свойства испытываемых пород в классификациях не приводятся, то говорить об их абразивности, базируясь на наименованиях пород, вообще говоря, некорректно. В результате такого подхода данные классификаций несопоставимы, а иногда и противоречивы. Например, жильный кварц в [2] отнесен к среднеабразивным породам, а в [3] — к породам сильно абразивным.

Известны исследования, в которых предлагаются подходы с учетом влияния некоторых свойств горных пород на абразивность. В [4] получены эмпирические (линейные) уравнения для оценки интенсивности изнашивания индентора (мг/10 мин) в зависимости от следующих показателей: "...средний размер обломков, слагающих породу (мм); содержание обломков и зерен твердых минералов (кварца, кремния и др., %); абсолютная пористость (%), предел текучести горных пород по Шрейнеру (МПа) [1]". Показано, что на значения коэффициентов в уравнениях существенное влияние оказывает прилагаемая к индентору мощность (сила прижатия, скорость вращения). По этой причине в уравнениях изменяются не только значения коэффициентов, но и знаки перед ними. Несмотря на оригинальность подхода, предложенные уравнения получены только для одного типа пород (терригенных) и привязаны к конструкционным особенностям экспериментального метода (истирание дисков).

В зарубежной литературе известен метод оценки абразивности горных пород без проведения лабораторных испытаний на истирание индентора [6]. Условная оценка абразивности определяется эмпирическим выражением

$$F_{\text{schim}} = 10^{-2} \sigma_b d_{Qu} V_{Qu}, \quad (1)$$

где d_{Qu} — средний размер зерен кварца, мм; σ_b — предел прочности породы на растяжение, полученный методом бразильской пробы, МПа; V_{Qu} — твердость породы, приведенная к твердости по кварцу, %.

Из (1) следует, что при отсутствии в породе кварца $F_{\text{schim}} = 0$, так как $d_{Qu} = 0$. Однако на абразивность влияет не только кварц, но и другие минералы. Поэтому при $d_{Qu} = 0$ предлагается использовать "фиктивное" значение зернистости $d_{Qu} = 0.025$ мм. Если $d_{Qu} > 1$, то предлагается переходить к оценке абразивности по Cerhar abrasion index (CAI).

Изложенное позволяет заключить, что главная проблема несопоставимости результатов тестирования горных пород на абразивность состоит не в отсутствии стандартного метода испытаний, а в отсутствии единообразного метода оценки множества физико-механических свойств горных пород, влияющих на их потенциальную абразивность. Наличие такого совокупного количественного показателя свойств породы позволило бы представить абразивность, полученную любым методом, в зависимости не от наименования породы, а от физико-механических свойств конкретного испытываемого образца. В результате исключается некорректность в получении корреляционных связей между классификациями абразивности, представленных разными методами.

Ниже предлагается метод оценки структурных и физико-механических свойств горных пород, влияющих на абразивность.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В БЕЗРАЗМЕРНОМ ВИДЕ

Определение абразивности горных пород непосредственно связано с повышением эффективности технологических процессов и сводится к установлению условий взаимодействия пары твердых тел “горная порода – рабочий орган машины”. Свойства материалов этой пары (C — породы, D — рабочего органа) изменяются под влиянием термодинамических процессов, возникающих при работе. Абразивность породы A определяется совокупностью ее структурных и физико-механических свойств, что выражается зависимостью $A = \varphi_1(C)$. Изнашивание рабочего органа машины R определяется свойствами материала D , из которого он изготовлен, конструктивными характеристиками L , а также режимами его функционирования G , т. е. $R = \varphi_2(D, L, G)$.

Эффективное взаимодействие этих твердых тел как системы возможно при выполнении условия $A \ll R$. В отличие от совокупности природных свойств, механическими и конструктивными характеристиками рабочего органа можно управлять, опираясь на абразивность горной породы A . Не рассматривая вопросы определения R (это отдельная весьма актуальная проблема [11]), обратимся к методическим положениям оценки свойств “неуправляемой” части системы и приведению их к единому количественному показателю $A = \varphi_1(C)$.

Ввиду того, что свойства горных пород измеряются разными физическими единицами, для получения единого показателя все свойства необходимо сначала привести к безразмерному виду, а затем получить совокупное их значение. Так, известен метод приведения различных свойств горных пород к единому показателю посредством экспертных баллов, оценивающих доленое влияние каждого свойства на какой-либо процесс с последующим суммированием баллов. Подобным образом представлена классификация массивов горных пород по устойчивости — система CSIR [13]. В отличие от такой постановки, предлагаемый подход к решению рассматриваемой проблемы базируется на канонической закономерности кластеризации геовещества по значениям его свойств и структурному строению. В основе таких закономерностей лежит научное открытие [14] (масштабный фактор явления зональной дезинтеграции горных пород) и развитие на его основе теоретических положений канонического построения иерархических классификаций свойств горных пород [15]. Уровень кластеризации свойства, в зависимости от характера его влияния на абразивную способность определим по одной из следующих формул:

$$J_X = 2.8854 \ln \left(\frac{C_X}{R_{X_0}} \right) + 1, \quad R_{X_0} = C_{X_{\min}}, \quad (2)$$

$$J_X = 1 - 2.8854 \ln \left(\frac{C_X}{R_{X_0}} \right), \quad R_{X_0} = C_{X_{\max}}, \quad (3)$$

где J_X — уровень кластеризации свойства (фактора) X ; C_X — значение свойства X в принятых единицах измерения; R_{X_0} — опорное (базовое) значение свойства X ; $C_{X_{\min}}$, $C_{X_{\max}}$ — соответственно минимальное и максимальное значения свойства X в анализируемом классе пород.

Формула (2) используется при условии, что увеличение значения свойства приводит к увеличению его влияния на абразивность, а (3) — в обратном случае. Из (2) и (3) следует, что в содержательном смысле они выполняют две операции: определение уровня кластеризации свойства J и приведение его значения к безразмерному виду. Оценку совокупности свойств ($X=1, 2, \dots, K$) образца породы определим их суммой $A = \sum J_X$.

СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ АБРАЗИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД, И ПРИВЕДЕНИЕ ИХ К БЕЗРАЗМЕРНОМУ ВИДУ

В качестве базовых свойств, определяющих абразивную способность горных пород, рассмотрим следующие: размер и форма зерен, твердость породообразующих минералов, пористость, сила связи между зернами, влажность. Опуская представления механизмов влияния указанных свойств горных пород на абразивность (они детально представлены в [5]), приведем результаты их формализованного представления.

Размеры и форма зерен, твердость породообразующих минералов. Для представления этих свойств в канонической шкале [15] получена зависимость

$$\Psi_Z = \left[2.8854 \ln \left(\frac{Dk_1}{d_0} \right) + 1 \right] s_1, \quad s_1 = 0.022 \exp(0.5465 R_{\text{ма}}), \quad (4)$$

где D , d_0 — соответственно средневзвешенный размер зерна в оцениваемой породе и его опорное значение, мм; k_1 — коэффициент, учитывающий влияние формы зерен; s_1 — относительный показатель, учитывающий влияние зерен соответствующей твердости на абразивность; $R_{\text{ма}}$ — средневзвешенная твердость породообразующих минералов.

Твердость минеральной части породы определим в виде средневзвешенного показателя твердости породообразующих минералов:

$$R_{\text{ма}} = 0.01 \sum_i M_i R_i, \quad (5)$$

где M_i , R_i — содержание i -го минерала в анализируемой породе (%) и его твердость по Ф. Мосу соответственно.

Значения коэффициента k_1 в (4) при относительно равных размерах зерен примем: в хорошо окатанных $k_1 = 1$, в угловатых $k_1 = 1.3$. Полагая эту зависимость линейной, получим: в хорошо окатанных $k_1 = 1$, окатанных $k_1 = 1.11$, полуокатанных $k_1 = 1.18$, полуугловатых $k_1 = 1.25$, угловатых $k_1 = 1.30$.

Далее считаем, что зерна размерами менее 0.025 мм существенного влияния на абразивную способность горных пород не оказывают. Подставив это значение в (4), после соответствующего преобразования получим выражение для представления фактора зернистости:

$$\Psi_Z \approx [2.8854 \ln(Dk_1 / 0.025) + 1] s_1 \approx 2.8854 s_1 \ln(Dk_1) + 11.64 s_1. \quad (6)$$

Пористость и твердость связующей массы. Как в магматических, так и в осадочных консолидированных породах поровая “поверхность” может быть выполнена материалом, близким по свойствам зерен (кристаллов), либо существенно отличаться от них. В осадочных породах на шероховатость и твердость поверхностей, формирующих пустоты, существенное влияние оказывает тип цемента (в конструкции абразивных инструментов — тип связующего). В магматических породах поровое пространство образуется в нераскристаллизовавшемся материале, от состава которого также зависят шероховатость и твердость поверхностей пор. При этом генезис пустотности (она выполнена порами или трещинами) особого значения не имеет. Важен показатель ее твердости для пористой поверхности. На этом основании для представления фактора пористости Ψ_P используем выражение

$$\Psi_P = \left(1 - 2.8854 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right) s_2, \quad (7)$$

где P , p_0 — соответственно пористость рассматриваемой породы и ее опорное значение, %; s_2 — показатель, учитывающий влияние твердости связующей массы на абразивную способность горной породы.

Приняв $p_0 = 25\%$, из (7) получим

$$\Psi_P \approx [1 - 2.8854 \ln(P/25)]s_2 \approx -2.8854s_2 \ln P + 10.29s_2. \quad (8)$$

Коэффициент s_2 , в отличие от s_1 , в (4) несет иное смысловое содержание; s_2 отражает относительное влияние микротвердости связующей массы на абразивную способность горных пород, а не относительную твердость породообразующих минералов. Информацией для определения s_2 служат результаты измерения микротвердости связующей части породы (цемента, стекла). Воспользуемся соотношениями между твердостью минералов в шкале Мооса и твердостью, определенной на приборе ПМТ-3. Здесь интерес представляют не абсолютные, а относительные значения твердости, т. е. s_2 представлено относительно твердости кварца:

— в зависимости от микротвердости по прибору ПМТ-3 $s_2 = 8.9 \cdot 10^{-5} T_c$;

— в зависимости от твердости по шкале Мооса $s_2 = 2.32 \cdot 10^{-3} (R_M)^{3.12}$,

где T_c — микротвердость, измеренная прибором ПМТ-3, МПа; R_M — твердость по шкале Мооса.

Прочность связей между зернами, влажность. Механизм влияния связей между зернами на абразивную способность горных пород недостаточно исследован и базируется на гипотетических посылах применительно к осадочным породам, основанных на прочностных свойствах цемента [5]. Прочный цемент позволяет полнее использовать возможность каждого зерна изнашивать инструмент, и этот процесс продолжается до момента отрыва зерна и вывода его из зоны соприкосновения с инструментом. Отсюда следует, что чем прочнее цемент, тем выше абразивная способность зерен породы. Это положение применимо и к кристаллическим породам. Если связь между зернами слаба, то процесс обновления абразивной поверхности интенсифицируется. Поскольку зерна, отрываясь от материнской породы, остаются свободными, их абразивные возможности невелики, даже если они отрываются по форме острыми.

В качестве оценочного показателя прочности связей между зернами нами принят предел прочности на растяжение σ_r . Полагая, что абразивная способность горных пород увеличивается с возрастанием σ_r , фактор влияния сил связи между зернами Ψ_S представим в виде:

$$\Psi_S = \left[2.8854 \ln \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{0r}} \right) + 1 \right] K_w, \quad K_w = \frac{\sigma_{wr}}{\sigma_r}, \quad (9)$$

где σ_r — предел прочности породы на растяжение в воздушно-сухом состоянии, МПа; K_w — коэффициент снижения прочности породы, зависящий от влажности и пористости; σ_{wr} — предел прочности на растяжение в состоянии естественной влажности, МПа.

Если предел прочности породы на растяжение определен при влажности в естественном состоянии, то в (9) $K_w = 1$. На силу связи между зернами большое влияние, особенно в осадочных породах, оказывает наличие влаги. В [11] показано существенное (до 30%) снижение абразивности пород во влагонасыщенном состоянии. Этот эффект учтен в (9) коэффициентом K_w . В качестве базового (опорного) значения в (9) примем $\sigma_{0r} = 0.312$ МПа, что характерно для слабых полускальных пород. Подставив это значение в (9), получим:

$$\Psi_S \approx [2.8854 \ln(\sigma_r / 0.312) + 1] K_w, \quad 0.312 \leq \sigma_r \leq 40 \text{ МПа}. \quad (10)$$

СОВОКУПНАЯ ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Суммой (6), (8), (10) определим совокупную оценку физико-механических свойств горных пород, влияющих на их абразивность:

$$A = \Psi_Z + \Psi_P + \Psi_S \approx 2.8854 \{s_1 \ln(Dk_1) - s_2 \ln P + K_w \ln \sigma_r\} + 11.64s_1 + 10.29s_2 + 4.36K_w, \quad (11)$$

где A — безразмерный показатель, количественное значение которого является оценкой абразивности горной породы, обусловленной ее физико-механическими свойствами.

Примем за минимальные значения свойств горных пород $D = 0.025$ мм, $k_1 = 1$, $s_1 = 0.065$, $P = 0.2\%$, $s_2 = 0.02$, $\sigma_r = 0.312$ МПа, $K_w = 0.5$, а за максимальные — $D = 8$ мм, $k_1 = 1.3$, $s_1 = 1$, $P = 25\%$, $s_2 = 1$, $\sigma_r = 40$ МПа, $K_w = 1$. Выполнив при этих значениях свойств вычисления по (11), получим, что A может изменяться в пределах от $A_{\min} = 3.2$ до $A_{\max} = 34.4$.

Далее используем базовые положения из [15], где разработаны теоретические основы для построения канонических классификаций по физико-механическим свойствам горных пород. Среди них — положение о том, что значения любого физико-механического свойства по всему множеству его значений и разновидностям горных пород образуют кластеры качественных состояний. Установлено, что иерархия этих состояний не случайна, а подчиняется определенной закономерности и оценивается количественно. Для большого числа физико-механических свойств горных пород формирование соответствующих кластеров выполняется по следующей закономерности:

$$A_0(\sqrt{2})^{J-1} \leq A \leq A_0(\sqrt{2})^J, \quad J = 1, 2, \dots, N, \quad (12)$$

где J — условный номер (иерархический уровень) кластера; A_0 — базовое значение свойства в принятых единицах измерения.

В качестве базового (опорного) значения примем $A_0 = A_{\min} = 3$ (определено выше, расчет по (11)), и преобразуем (12) к более удобному виду:

$$2.12 \exp(0.3466J) \leq A \leq 3 \exp(0.3466J). \quad (13)$$

Результаты вычислений по (13) при $J = 1, \dots, 8$ приведены в табл. 1 (см. столбец 2, а данные по [2] см. столбец 3). Их сопоставлением (рис. 1а) установлена достаточно тесная корреляция показателя A с износом индентора B . На основании этого получено соотношение

$$2.36 \exp(0.476J) \leq B \leq 3.81 \exp(0.476J), \quad R^2 = 0.98, \quad J = 1-8, \quad (14)$$

где B, J — соответственно значение показателя абразивности (износ индентора, мг) и класс абразивности в классификации по [2]; R^2 — коэффициент корреляции.

ТАБЛИЦА 1. Сопоставление обобщенного показателя свойств горных пород с классификацией по абразивности

J	Совокупный показатель свойств A	Показатель B , мг	Класс абразивности по Л. И. Барону, А. В. Кузнецову
1	3.0–4.2	< 5	Весьма малоабразивные
2	4.2–6.0	5–10	Малоабразивные
3	6.0–8.5	10–18	Ниже средней абразивности
4	8.5–12.0	18–30	Среднеабразивные
5	12.0–17.0	30–45	Выше средней абразивности
6	17.0–24.0	45–65	Повышенной абразивности
7	24.0–34.0	65–90	Высокоабразивные
8	34.0–48.0	> 90	В высшей степени абразивные

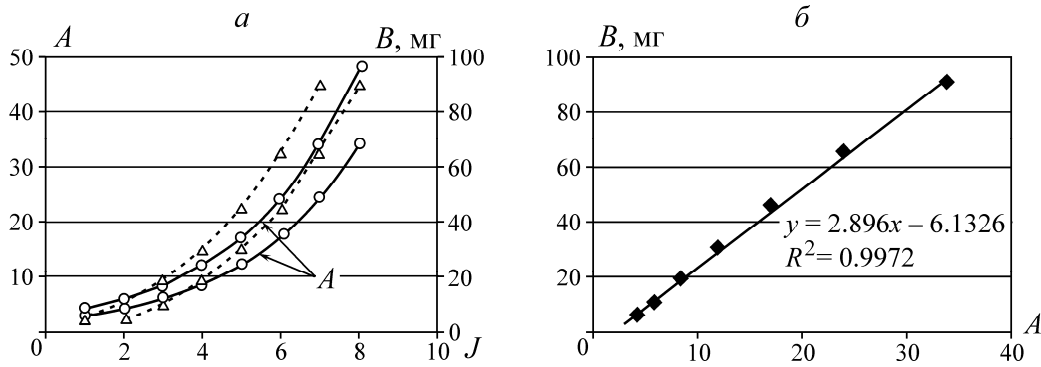


Рис. 1. Классификации по абразивности горных пород: *а* — сопоставление классификации по абразивной способности с классификацией по изнашиванию индентора (по Л. И. Барону, А. В. Кузнецову — штриховые линии); *б* — зависимость между индексами классификаций: $B = f(A)$

Из результатов сопоставления классификаций (рис. 1а) следует, что предложенный метод совокупного представления физико-механических свойств горных пород практически идентичен классификации по абразивности, полученной методом истирания стального индентора [2]. Что касается отличия коэффициентов в уравнениях (13), (14), то требовать их равенства нельзя, поскольку используются разные единицы измерения классифицируемого показателя. Ввиду высокого значения коэффициента корреляции между индексами абразивности ($R^2 = 0.99$, рис. 1б), получим соотношение

$$2.89A - 6 \leq B \leq 2.75A - 4.46.$$

Обратимся дополнительно к другому сравнению. Для этого воспользуемся данными [12], где представлены информация о свойствах образцов горных пород и коэффициенты их абразивности *a*, полученные методом истирания свинцовой дроби ($a = m/100$, где *m* — потеря массы дроби, мг). Результаты такого сопоставления приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Сопоставление результатов расчетов по (11) с коэффициентами абразивности, полученными методом свинцовой дроби

Исходные данные						Вычисленные результаты					
Образец	<i>D</i> , мм	<i>W</i> , %	<i>P</i> , %	σ_r , МПа	<i>a</i>	K_1	s_1	s_2	R_{ma}	K_w	<i>A</i>
507	0.35	2.0	5.1	6.5	2.5	1.2	0.113	0.071	3.0	0.68	8.0
513	0.75	2.4	7.2	6.0	2.3	1.0	0.077	0.031	2.3	0.72	7.8
515	0.75	1.4	7.7	6.0	3.55	1.0	0.113	0.071	3.0	0.83	9.5
487	0.35	1.5	5.6	5.8	2.7	1.2	0.134	0.096	3.3	0.77	8.9
116	0.20	2.8	9.7	5.8	1.95	1.3	0.077	0.031	2.4	0.75	7.8
343	0.35	2.7	8.7	4.1	0.80	1.2	0.086	0.040	2.5	0.62	6.2
251	0.65	3.1	4.8	4.5	0.50	1.0	0.059	0.015	1.8	0.52	5.3
546	0.35	3.6	5.8	6.1	0.65	1.2	0.096	0.051	2.7	0.54	6.3
136.143	0.16	5.8	9.4	3.4	0.40	1.0	0.113	0.071	3.0	0.54	5.3
166.167	0.16	6.4	7.5	3.4	0.40	1.0	0.086	0.040	2.5	0.43	4.1

Примечание. Песчаники: мелкозернистые (116), среднезернистые (507, 487), крупнозернистые (513, 515). Алевролиты: среднезернистые (343, 546), крупнозернистые (251). Аргиллиты: массивные (136, 143), трещиноватые (166, 167). Номера у образцов песчаников и алевролитов соответствуют глубине взятия проб по скважине 1172 [12].

Соотношения между коэффициентом абразивности a и показателем A , рассчитанным по (11), существенно различаются по абсолютным значениям, поскольку получены разными методами. Однако из-за высокого коэффициента корреляции ($R^2 \cong 0.91$, рис. 2) приходим к выводу, что кроме совокупной оценки свойств, показатель A , как и в сопоставлении с классификацией [2], характеризует абразивность горных пород в безразмерном представлении.

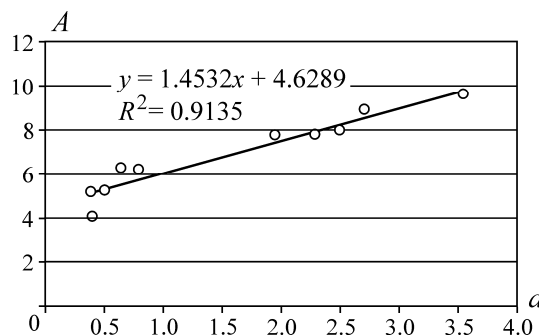


Рис. 2. Корреляция между показателями a и A

Полученные результаты позволяют отметить, что показатель совокупной оценки свойств горных пород по (11) можно использовать двояко: а) для представления свойств горных пород при экспериментальном определении абразивности любым известным методом по схеме: наименование породы \rightarrow совокупная оценка свойств (A) \rightarrow измеренное значение показателя абразивности; б) для оценки потенциальной абразивности по схеме: наименование породы \rightarrow потенциальная абразивность, равная совокупной оценке свойств A по (11). При таком подходе появляется возможность отображать свойства испытываемых пород и сопоставлять классификации по абразивности, полученные любым экспериментальным методом.

ВЫВОДЫ

Одна из проблем экспериментального тестирования горных пород на абразивность заключается в отсутствии совокупного количественного представления физико-механических свойств образцов пород, подвергаемых тестированию. Замена свойств наименованием горных пород является некорректной, поскольку одноименные породы могут характеризоваться различными свойствами и соответствующей им абразивностью. Для решения этой проблемы предложен метод совокупного количественного представления физико-механических свойств горных пород в соответствии с канонической закономерностью их иерархической кластеризации.

На основании сравнения результатов исследования с данными классификации по абразивности и тестированием отдельных образцов горных пород установлено, что обобщенный безразмерный показатель физико-механических свойств, вычисляемый предложенным методом, становится индексом потенциальной абразивности. Его преимущество заключается в независимости от способов экспериментального тестирования образцов горных пород. Выведенный индекс “потенциальной абразивности” можно использовать для сопоставимости результатов, полученных разными экспериментальными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Л. А. Механические и абразивные свойства горных пород. — М.: Гостоптехиздат, 1958.
2. Барон Л. И., Кузнецов А. В. Абразивность горных пород при добычании. — М.: Изд-во АН СССР, 1961.

3. **Любимов Н. И.** Принципы классификации и эффективного разрушения горных пород при разведочном бурении. — М.: Недра, 1967.
4. **Спивак А. И.** Абразивность горных пород. — М.: Недра, 1972.
5. **Справочник** по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений / М. Г. Абрамсон, Б. М. Байдюк, В. С. Заварецкий и др. — М.: Недра, 1985.
6. **Brown E. T.** Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. International Society for Rock Mechanics; Oxford, Pergamon Press, 1981.
7. **West G.** Rock abrasiveness testing for tunnelling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1989:26 (2).
8. **Ewendt G.** Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln, Bochumer geol. u. geot. Arbeiten 33. Bochum, 1989.
9. **Plinninger R., Kasling H., Thuro, K.** Wear prediction in hardrock excavation using the CERCHAR Abrasiveness Index (CAI). In: Proceedings of the Eurock 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, 2004.
10. **Rostami, J., Ozdemir, L., Bruland, A., & Dahl, F.** Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. In: Proceedings of the ETC, 2005.
11. **Арцимович Г. В.** Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. — Новосибирск: Наука, 1985.
12. **Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И.** Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. — М.: Недра, 1994.
13. **Bianiawski Z. T.** Engineering classification of jointed rock masses, Trans, South African Institute Civil Engineering, 15, 1973.
14. **Открытие № 400 СССР.** Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин, М. А. Розенбаум // Оpubл. в БИ. — 1992. — № 1.
15. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.

Поступила в редакцию 5/VIII 2014