

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.02(031)

А.С. Танайно

СОПОСТАВЛЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ПРОЧНОСТИ

Из множества показателей, характеризующих физико-механические свойства горных пород (далее ФМС), прочностные характеристики являются определяющими в проектировании и планировании технологических процессов добычи твердых полезных ископаемых. Известно несколько классификаций горных пород по прочности. Хотя в них по существу отражаются одни и те же свойства, но оцениваются в шкалах разной размерности. Это вносит некоторые затруднения в использование ряда расчетных выражений. Например, в формулах расчета основного времени бурения, удельного расхода ВВ и других, используются безразмерный коэффициент крепости (f , по классификации М.М. Продолькона), контактная прочность (σ_k , МПа), сопротивление пород одновременно сжатию ($\sigma_{cж}$, МПа). Во многих выражениях, сложилось это исторически, используется отмененные в настоящее время единицы измерения (kgs/cm^2 , $\text{tс}/\text{m}^2$). Осложнения усугубляются тем, что большинство расчетных формул представлены эмпирическими зависимостями и, следовательно, в них присутствуют безразмерные коэффициенты, численные значения которых определяются принятой системой измерения входящих параметров.

Полагаем, что некоторый анализ и систематизация в этом направлении окажутся полезными в части использования различных расчетных выражений, определяющие параметры в которых, могут быть пересчитаны в сопоставимые единицы измерения. Кроме того, представляется актуальными функциональные зависимости одних показателей от других. Это особенно важно в условиях ограниченности информации о ФМС при создании электронных баз данных по месторождениям [1].

При выполнении работы автор базировался на известных положениях основ физики горных пород [2], использовал фактические данные по исследованию ФМС как из литературных источников, так и из геологических отчетов. В работе принято допущение, что шкалы классов пород по прочности, равно как и коэффициент крепости, представляются в общем случае не целым числом.

Взаимосвязь показателей прочности в классификациях горных пород. Прочность при одноосном сжатии $\sigma_{cж}$ – один из часто используемых показателей ФМС. На практике популярно опре-

деление коэффициента крепости f по М.М. Продолькона от $\sigma_{cж}$ по соотношению

$$f \approx \sigma_{cж} / 100 . \quad (1)$$

Операция по (1) относительно верна при условии измерении $\sigma_{cж}$ в отмененных единицах измерения (kgs/cm^2). Кроме того, ввиду совершенствования методов испытания и технологии изготовления образцов а также с переходом в систему СИ (использование кгс не рекомендуется), Л.И. Бароном [3] предложено выражение для пересчета

$$f \approx \sigma_{cж} / 30 + (\sigma_{cж} / 3)^{0.5} , \quad (2)$$

где $\sigma_{cж}$ измеряется в МПа.

Из (2) следует, что f – не целое число. Обратная (2) функциональная зависимость определена нами по интервалам в пределах $1 \leq f \leq 20$

$$\sigma_{cж} \approx 2.4954 f^{1.789} \quad \text{для } f \leq 3,$$

$$\sigma_{cж} \approx 3.3389 \cdot f^{1.5409} \quad \text{в интервале } 3 \leq f \leq 10 , \quad (3)$$

$$\sigma_{cж} \approx 4.7894 f^{1.3827} \quad \text{для } f \geq 10.$$

Международным бюро по механике горных пород (МБМГП) предложена классификация прочности при одноосном сжатии [4, стр.18], в которой каждому классу (всего 12) соответствуют определенные пределы прочности $\sigma_{cж}$ (МПа). Используя (2) и (3) и обозначив класс прочности по МБМГП символом $F_{мб}$, получим формулы для вычисления $F_{мб} = \xi(\sigma_{cж})$ и обратную $\sigma_{cж} = \xi(F_{мб})$.

$$F_{мб} \approx 2.3 \cdot \ln(\sigma_{cж}) - 1.575 ;$$

$$\sigma_{cж} \approx 2.12 \cdot \exp(0.424 \cdot F_{мб}) . \quad (4)$$

В связи с тем, что обе классификации базируются на данных о $\sigma_{cж}$ измеряемых в МПа, то соотношения между f и $F_{мб}$ связываются зависимостями :

$$f \approx 0.83 \cdot \exp(0.266 \cdot F_{мб}) ; \\ F_{мб} \approx 3.788 \cdot \ln(f) + 0.63 . \quad (5)$$

В (4) и (5) $F_{мб}$, как и f , в (2) не обязательно целое.

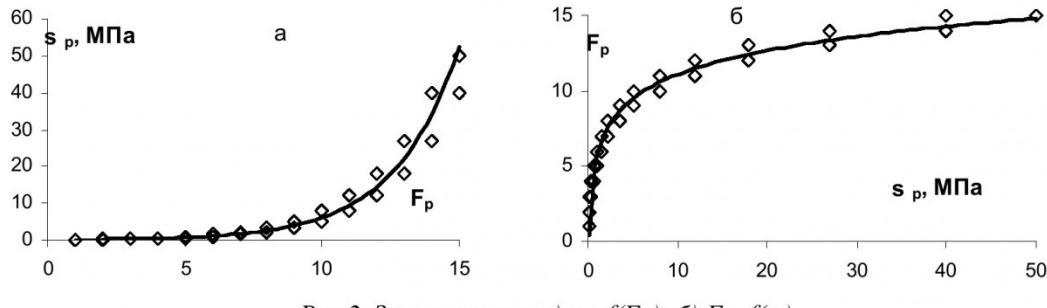
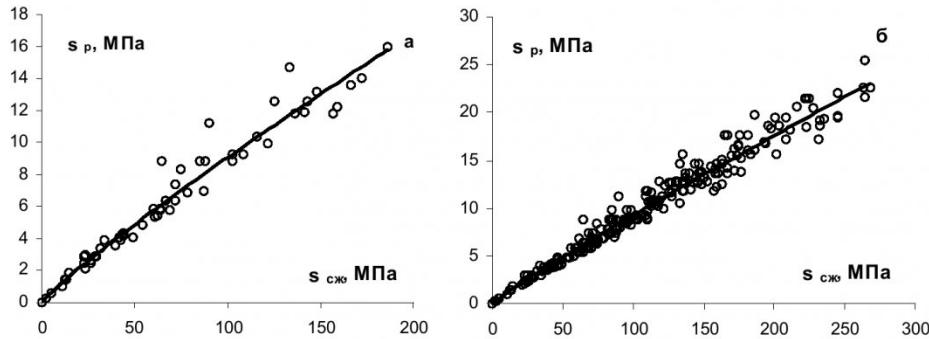
Кроме $\sigma_{cж}$ породы классифицируются контактной прочностью (σ_k), измеряемой, как и $\sigma_{cж}$ в МПа [4, стр. 21]. Взаимосвязь между σ_k и f определена нами зависимостями:

$$\sigma_k \approx 200 \cdot \exp(0.168 \cdot f) ;$$

$$\sigma_k \approx 0.063(\sigma_{cж})^2 - 1.81(\sigma_{cж}) + 394 ; \quad (6)$$

$$f \approx 5.95 \cdot \ln(\sigma_k) - 31.5 ;$$

$\sigma_{cж} = 0.205 \cdot \sigma_k - 5 \cdot 10^{-5} \cdot (\sigma_k)^2 - 45$, если $\sigma_k \leq 1000$ МПа;
 $\sigma_{cж} = 0.08 \cdot \sigma_k - 6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_k)^2 + 38$, если $\sigma_k > 1000$ МПа.

Рис.2. Зависимости: а) $\sigma_p=f(F_p)$; б) $F_p=f(\sigma_p)$ Рис.3. Зависимости между σ_p и $\sigma_{cж}$

Из графической интерпретации зависимости контактной прочности от сопротивления пород одноосному сжатию (рис.1) видно, что до $\sigma_{cж} \approx 100$ σ_k возрастает линейно с коэффициентом пропорциональности равным приблизительно десяти. После этого предела зависимость становится квадратичной.

Класс пород по контактной прочности (F_k) с коэффициентом крепости по М.М. Протодьяконову находится в соотношении

$$\begin{aligned} F_k &\approx 0,56 \cdot f + 0,45; \\ f &\approx 1,7857 \cdot F_k - 0,8. \end{aligned} \quad (7)$$

В справочной литературе по ФМС (например, [5] и др.) крепость горных пород часто характеризуется их категорией по классификации М.М. Протодьяконова. Обозначим ее символом F_n . Переход от характеристикирования пород категориями к коэффициенту крепости по М.М. Протодьяконову осуществляется по соотношениям

$$\begin{aligned} F_n &\approx 7,22 - 1,96 \cdot \ln(f), \\ f &\approx 37,885 \cdot \exp(-0,5 \cdot F_n) . \end{aligned} \quad (8)$$

При известном f , вычисленному по (8), значения $\sigma_{cж}$, F_m , σ_k , F_k рассчитываются по выражениям (3),(5-7) соответственно. Заметим, что верификация всех выше приведенных зависимостях выполнялась по статистическим данным [5,6]¹. При этом коэффициент крепости f и его связь с $\sigma_{cж}$ определялись согласно (2) и (3).

Как видно, приведенными выше соотношениями (1)-(8) раскрываются все взаимосвязи между существующими классификациями и входящими в них параметрами, характеризующими горные породы по прочности.

В литературе технологического плана в качестве характеристики пород используется также предел прочности на растяжение (σ_p), измеряемый в МПа. Предложена соответствующая классификация М.М. Протодьяконовым (младшим), М.И. Койфманом и С.Е. Чирковым. В ней выделяются пять классов горных пород с соответствующими пределами σ_p (МПа): весьма слабые (0.15-0.4); слабые (0.4-1.5); средней крепости (1.5-5.2); повышенной крепости (5.2-18); весьма крепкие (от 18 до 40 и более). Каждый класс подразделяется на три подкласса [4, стр.19]. Условно присвоим каждому подклассу порядковый номер, как это делается во многих классификациях. В результате получим шкалу из пятнадцати рангов (F_p). Далее, присвоив каждому рангу пределы изменения σ_p , указанные в классификации и выполнив соответствующие расчеты, получим выражения для связи у σ_p и F_p

$$\begin{aligned} \sigma_p &\approx 0,087 \cdot \exp(0,427 \cdot F_p); \\ F_p &\approx 2,31 \cdot \ln(\sigma_p) + 5,76 . \end{aligned} \quad (9)$$

Графическая интерпретация зависимостей (9) представлена на рис. 2, из которого видно, что аппроксимирующие кривые проходят по центру пределов изменения показателей. Следовательно, вычисленные по (9) показатели соответствуют средним значениям. Обращает внимание также характер изгиба кривых - до шестого ранга шкалы (рис.2 а) возрастания σ_p весьма незначительны.

¹ В справочниках и геологических отчетах прочностные характеристики представлены в измерении кгс/см² или кбар. Для пересчета в систему СИ использовались переводные коэффициенты 1 кгс/см²=0.098 МПа; 1 кбар=10¹¹ Па.

Таблица 1

f		$\sigma_{сж}, МПа$		$F_{мб}$		F_k		$\sigma_k, МПа$		$\sigma_p, МПа$	
от	до	от	до	от	до	от	до	от	до	от	до
1	2	2	9	0.6	3.3	1.0	1.6	237	280	0.4	1.2
2	3	9	18	3.3	4.8	1.6	2.1	280	332	1.2	2.3
3	4	18	28	4.8	5.9	2.1	2.7	332	392	2.3	3.5
4	5	28	40	5.9	6.7	2.7	3.3	392	464	3.5	4.7
5	6	40	53	6.7	7.4	3.3	3.8	464	549	4.7	6.1
6	7	53	67	7.4	8.0	3.8	4.4	549	649	6.1	7.6
7	8	67	82	8.0	8.5	4.4	4.9	649	768	7.6	9.2
8	9	82	99	8.5	9.0	4.9	5.5	768	908	9.2	10.9
9	10	99	115	9.0	9.4	5.5	6.1	908	1075	10.9	12.6
10	11	115	132	9.4	9.7	6.1	6.6	1075	1271	12.6	14.2
11	12	132	148	9.7	10.0	6.6	7.2	1271	1504	14.2	15.9
12	13	148	166	10.0	10.3	7.2	7.7	1504	1779	15.9	17.6
13	14	166	184	10.3	10.6	7.7	8.3	1779	2104	17.6	19.4
14	15	184	202	10.6	10.9	8.3	8.9	2104	2489	19.4	21.1
15	16	202	221	10.9	11.1	8.9	9.4	2489	2945	21.1	22.9
16	17	221	240	11.1	11.4	9.4	10.0	2945	3483	22.9	24.8
17	18	240	260	11.4	11.6	10.0	10.5	3483	4121	24.8	26.6
18	19	260	280	11.6	11.8	10.5	11.1	4121	4875	26.6	28.5
19	20	280	300	11.8	12	11.1	11.9	4875	5766	28.5	30.5

Этот диапазон включает весьма слабые и слабые породы согласно классификации т.е. σ_p от < 0.15 до $1,5$ МПа. Естественно, что в этом диапазоне прочности пород резко возрастает ранг пород по прочности на растяжение (рис.2 б).

Взаимосвязь между σ_p и $\sigma_{сж}$ исследовалась нами по справочной информации о ФМС пород месторождений угольных, железорудных и цветных металлов [5,6]. Некоторые результаты обработки данных представлены на рис.3, из которого можно заключить, что в целом связь между σ_p и $\sigma_{сж}$ существует - с увеличением $\sigma_{сж}$ возрастает и σ_p . Тренд этой взаимосвязи представляется степенной функцией вида

$$\sigma_p \approx a \cdot (\sigma_{сж})^c . \quad (10)$$

Коэффициенты a , c в (10) незначимо отличаются в зависимости от типов месторождений. Так, для пород угольных месторождений (рис. 3 а) $a=0,147$, $c=0,89$, а для совокупности пород месторождений угольных, железорудных и цветных металлов (рис.3 б) $a=0,15$, $c=0,92$. Несмотря на то, что значение показателя степени в (10) близко к единице, аппроксимация линейным трендом не приемлема: недопустимая погрешность приближение в окрестности малых значений $\sigma_{сж}$. Из рис.3 также видно, что имеет место разброс фактических данных от линии тренда. Однако он не превышает 20%. И это вполне приемлемо, так

Таблица 2

Сопоставление классификаций горных пород по прочности

Степень крепости пород по классификации М.М. Протодьяконова					
Довольно мягкие, мягкие	Средней крепости	Довольно крепкие	Крепкие	Очень крепкие	В высшей степени крепкие
Коэффициент крепости (f) в классификации М.М. Протодьяконова (в скобках $\sigma_{сж}$)					
<2 (2-10)	3-5 (10-30)	5-7 (30-55)	7-10 (55-115)	10-15 (115-200)	>15 (>200)
Степень крепости пород в классификации по контактной прочности					
Слабые	Ниже средней крепости	Средней крепости	Крепкие	Очень крепкие	Крепчайшие
Показатель (σ_k) контактной прочности (в скобках $\sigma_{сж}$)					
<300-400 (2-30)	400-650 (30-70)	650-1250 (70-130)	1250-2450 (130-200)	2450-4500 (200-280)	4500-5600 (280-300)
Степень крепости пород в классификации прочности по растяжению					
Весьма слабые	Слабые	Средней крепости	Повышенной крепости	Весьма крепкие	
Прочность (σ_p) пород в классификации по растяжению (в скобках $\sigma_{сж}$)					
<0.15-0.4 (<2)	0.4-1.5 (2-15)	1.5-5.2 (15-55)	5.2-18 (55-205)	>18(>205)	

как вариации значений показателей при испытании образцов достигают 30% и более [5]. Такой разброс в данных обусловлен, в том числе, и методикой испытаний, которая предполагает получение результатов путем разрушения образцов, а разрушить один и тот же образец на сжатие и растяжение невозможно. Невозможно изготовить и два совершенно идентичных образца породы для испытания - всегда имеют место частные проявления внутренних микродефектов. Некоторые закономерности, если они проявляются, то только по результатам обработки статистически представительных рядов наблюдений.

Зависимость обратная (10) представляется также степенным трендом, а за пределами $\sigma_p > 1$ МПа - линейным:

$$\sigma_{cyc} \approx 8.7 \cdot (\sigma_p)^{1.1}; \quad \sigma_{cyc} \approx 11.5 \cdot \sigma_p - 4.2$$

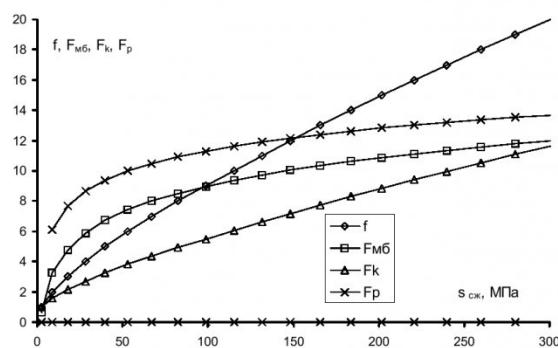


Рис.4. Зависимости $f, F_{mб}, F_k, F_p = \varphi(\sigma_{cyc})$

- для пород угольных месторождений;
- $\sigma_{cyc} \approx 9.3 \cdot (\sigma_p)^{1.07}; \quad \sigma_{cyc} \approx 11.2 \cdot \sigma_p - 2.8$
- для всех месторождений. (11)

Выражения (10) (11) можно использовать для прогнозной оценки показателей при одном известном, а также для расчетов пределов прочности пород при сдвиге (σ_{cde}), приближенное значение которого определяется из $\sigma_{cde} \approx (\sigma_{cyc} \cdot \sigma_p)^{0.5}$.

Анализ классификаций прочности горных пород. Для сопоставления в табл. 1 приведены численные значения характеристик прочности по основным классификациям. При этом все показатели представлены в зависимости от коэффициента крепости (f) по М. М. Протодьяконову, как общепринятого и наиболее часто используемого в практике горного дела нашей страны. Увеличению f с шагом равным единице в каждой строке представлены значения сравниваемых характеристик $\sigma_{cyc}, F_{mб}, F_k, \sigma_k, \sigma_p$, вычисленных по вышеприведенным выражениям.

Первое, что обращает внимание, неравномерность приращения $\sigma_{cyc}, F_{mб}, F_k, \sigma_k, \sigma_p$ по сравнению с равномерным ростом коэффициента крепости пород f . Так, если в пределах $1 < f < 3$, σ_{cyc} прирастает с шагом ≈ 10 , то в пределах $17 < f < 20$ шаг приращения σ_{cyc} достигает 20. Более разительна

ситуация по шкалам $F_{mб}, F_p$ судя по графической интерпретации их зависимостей от σ_{cyc} (рис. 4). Здесь $F_{mб}$ и F_p интенсивно возрастают в пределах $\sigma_{cyc} = 1 - 50$ МПа. С дальнейшим увеличением σ_{cyc} , интенсивность приращения $F_{mб}$ и F_p резко снижается. На этом фоне контрастными представляются зависимости F_k и f - с ростом σ_{cyc} эти показатели изменяются более равномерно. Из приведенного следует вывод: существующие классификации горных пород по прочности не взаимоувязаны и представлены так, что одна и та же порода может относиться к разной степени крепости.

В качестве иллюстрации этого вывода обратимся к классификации М.М. Протодьяконова, представив в удобном для анализа виде соответствующие её параметры в сопоставлении с другими классификациями (табл.2).

Из сравнения степеней крепости следует, что породы, выделенные в класс "Крепкие", по классификации М.М. Протодьяконова характеризуются значением σ_{cyc} в пределах 55-115 МПа, а по контактной прочности в этот класс отнесены породы с $\sigma_{cyc} = 130-200$ МПа. Расхождение, как видно, существенное. Еще разительнее несоответствие по σ_{cyc} в классе "Средней крепости" - соответственно 10-30 и 70-130 МПа, а в классификации прочности при растяжении к этому классу отнесены породы с $\sigma_{cyc} = 15-55$ МПа. По контактной прочности к классу "Слабые" отнесены породы с $\sigma_{cyc} = 2-30$ МПа, а по растяжению с $\sigma_{cyc} = 2-15$ МПа. Такое положение, на первый взгляд, можно было бы обосновать, опираясь на различную физическую природу разрушения образцов. Но этот посыл опровергается наличием тесных статистически установленных взаимосвязей между прочностными свойствами пород.

Сопоставимый анализ классификаций обнаруживает несоблюдение главного принципа в оценке прочностных свойств, обоснованного проф. М.М. Протодьяконовым, который гласит, что если какая-либо порода крепче другой в отношении $f_1:f_2$, то это отношение сохраняется при любых видах воздействия на породу. Применительно к классификациям это означает, что независимо от вида физического воздействия, если порода по одной классификации отнесена к соответствующей степени крепости, то принадлежность ее к этой категории должна соблюдаться и по другим.

Существенным также является произвольные шкалы деления пород на классы, заключающиеся в приписывании порядкового номера классам пород. Аналогичную процедуру мы выполнили выше, присвоив условную нумерацию рангам классов, не вкладывая в это какой либо физический смысл. Подобным образом, как это следует из анализа, поступают авторы многих классификаций, в том числе в ряде технологических классификаций пород. Подобный подход слишком уп-

рощает действительность. Представляется, что шкалы классификаций должны определяться со-держательным физическим смыслом, например, затратами энергии в сопоставлении с технологи-

ческими возможностями. Но это специальные ис-следования, выходящие за пределы темы, названной в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Танайно А.С.* Структурно-прочностные свойства пород вскрыши угольных месторождений в за-дачах открытых геотехнологий. Ч. 1: Создание базы данных // ФТПРПИ - 2002, №3, С 63-72.
2. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. -М.: Недра , 1984, 359 с.
3. *Барон Л.И.* Коэффициенты крепости горных пород. -М.: Недра, 1972, 175 с.
4. Справочник. Открытые горные работы /К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Винницкий, Н.Н. Мельников и др. -М.: Горное бюро, 1994, 590 с.
5. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржев-ского, М.М. Протодьяконова. -М.: Недра, 1975, 279 с.
6. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамиче-ских параметрах. -М.: Недра, 1978, 237 с.

Автор статьи:

Танайно
Александр Савельевич
- канд.техн.наук, ведущий научный
сотрудник Института горного дела
Сибирского отделения Российской
академии наук (ИГД СО РАН), г.
Новосибирск