



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ (НС РАН)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР -
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН (МНИЦ - ГП)

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ



XI ЕЖЕГОДНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ ТОМ 2

24 - 26 апреля 2019 года
г. Бишкек



УДК 001
ББК 30.6
C56

Ответственный редактор:
Забинякова О.Б.

Редакционная коллегия:

Баталева Е.А., Воронцова Е.В., Имашев С.А., Карабут Н.В., Кульков Д.С., Лашин О.А.,
Лисимов М.О., Матюков В.Е., Морозова Л.Е., Мухамадеева В.А., Саламатина Ю.М.,
Чешев М.Е.

**C56 Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов XI
Междунар. конф. молодых ученых и студентов. В 2 т. Т. 2. – Бишкек: НС РАН, 2019. – 202 с.**

ISBN 978-9967-12-794-4

В данный сборник включены материалы XI Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», которая была проведена Научной станцией РАН и Международным научно-исследовательским центром – геодинамическим полигоном в г. Бишкеке. В сборнике представлены работы молодых ученых и студентов из России, Киргизии, Узбекистана, Казахстана, Таджикистана, Украины и США, охватывающие исследования в области мониторинга геосреды, физики и механики горных пород, оценки сейсмического и геологического риска, математического моделирования различных процессов и других научных направлений.

Сборник может быть полезен студентам, аспирантам и специалистам, занимающимся исследованиями в области наук о Земле, механики, прикладной математики и программной инженерии.

Утверждено к печати Ученым советом
ФГБУН НС РАН в г. Бишкеке

УДК 001
ББК 30.6

C 1401030000-19
ISBN 978-9967-12-794-4

©ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке

©Международный научно-исследовательский
центр - геодинамический полигон в г. Бишкеке

© Коллектив авторов, 2019

К ПОСТРОЕНИЮ ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Кулагина М.А.
kulagina_m.a@mail.ru

Кыргызско–Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызская Республика

Для составления так называемого паспорта прочности горных пород чаще всего используются экспериментальные данные испытания стандартных цилиндрических образцов в установках на трехосное сжатие по схеме Т. Кармана. Получаемые значения главных напряжений в момент разрушения при реализации различных пропорциональных нагружений представляются на известной диаграмме Мора предельными (наибольшими) кругами. Огибающая к этим кругам разграничивает область опасных (по разрушению) и не опасных напряженных состояний и позволяет определить ориентацию плоскости среза при разрушении. В данном сообщении проанализировано уравнение такой огибающей линии (получаемое на основе предложенного Т.Б. Дуйшеналиевым и К.Т. Койчумановым критерия), которое в достаточной мере отражает прочностные свойства разнообразных горных пород. Сделана попытка разделить породы на определенные классы в соответствии с видом их структуры и с закономерностью изменения угла среза в зависимости от уровня напряженного состояния.

Ключевые слова: горные породы, пределы прочности, огибающая предельных кругов Мора, угол среза.

Напряженное состояние горных пород в массиве моделируется испытаниями стандартных цилиндрических образцов на установках по схеме Кармана, когда между осевым напряжением сжатия σ_1 и главными напряжениями σ_2 и σ_3 от равномерного бокового давления выполняется соотношение: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. При этом сжимающие напряжения считаются положительными; по их соотношению в момент разрушения судят о прочности пород.

Напряжения σ_1 и σ_3 могут принимать множество значений, и осуществить весь комплекс опытов с различным соотношением этих компонент невозможно. Поэтому разрабатываются различные методы расчета [1], по которым можно оценить степень опасности напряженного состояния по постулируемым зависимостям между главными напряжениями, т.е. предсказать прочностные свойства материалов в момент разрушения.

В практике горного дела получила наибольшее распространение теория прочности Мора, согласно которой разрушение происходит в результате сдвигов по плоскости, наклоненной под определенным углом к главным напряжениям. Сопротивляемость сдвигу в этой плоскости (τ) зависит от нормального напряжения (σ) на ней. Однако до настоящего времени нет общепринятой универсальной зависимости $\tau(\sigma)$, отражающей предельные значения главных напряжений (σ_1, σ_3) при разрушении. Поэтому по экспериментальным данным трехосного сжатия по схеме Кармана строят в координатах $\tau \square \sigma$ круги (Мора) предельных напряженных состояний, центр (O_c) и радиус (R) которых определяются выражениями:

$$O_c = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3), R = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

Доказано, что существует огибающая кругов предельных напряжений, разграничивающая область опасных и неопасных напряженно-деформированных состояний горных пород. Если уравнение огибающей известно, то можно установить прочность пород

при различных видах напряженного состояния, характеризуемых параметром $c = \sigma_3/\sigma_1$. Т.Б. Дуйшеналиев и К.Т. Койчуманов [2] представили уравнение предельных кругов Мора в пространстве главных напряжений (σ_1, σ_3) в виде алгебраического уравнения второй степени:

$$\varphi(\sigma, \tau, \sigma_1) = \sigma^2 + \tau^2 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sigma + \sigma_1\sigma_3 = 0, \quad (1)$$

где параметром этого семейства является напряжение σ_1 .

По инвариантам уравнения (1) можно заключить, что в пространстве главных напряжений оно является уравнением гиперболы. Задав в этом пространстве уравнение гиперболы согласно ее определению:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + (\sigma_3 - b)^2} - \sqrt{\sigma_1^2 + (\sigma_3 - a)^2} = d, \quad (a, b, d - \text{const}) \quad (2)$$

удалось [2] разрешить его относительно главного напряжения σ_3 , т.е. получить зависимость $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_1)$, а именно:

$$\sigma_3 = \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{d^2\sigma_1^2}{(a-b)^2 - d^2} + \frac{d^2}{4}}. \quad (3)$$

Согласно известной теореме [3], огибающая семейства вида (1) должна удовлетворять также уравнению:

$$\varphi_{\sigma_1}(\sigma, \tau, \sigma_1) = 0 \quad (\varphi_{\sigma_1} = \partial\varphi/\partial\sigma_1), \quad (4)$$

а координатами огибающей будут:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1\sigma'_3}{1 + \sigma'_3}, \quad \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma'_3} \sqrt{\sigma'_3} \left(\sigma'_3 = \frac{\partial\sigma_3}{\partial\sigma_1} \right). \quad (5)$$

Для определения производной σ'_3 , входящей в выражения (5), необходимо знать зависимость между главными напряжениями $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_1)$; согласно (3) имеем:

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{d^2\sigma_1^2}{(a-b)^2 - d^2} + \frac{d^2}{4}}} \frac{d^2}{(a-b)^2 - d^2}. \quad (6)$$

Введем замену параметров гиперболы:

$$\frac{a+b}{2} = A, \quad \frac{d^2}{4} = B^2, \quad \frac{d^2}{(a-b)^2 - d^2} = Q. \quad (7)$$

Учитывая (7), выражения (3) и (6) принимают следующий вид:

$$\sigma_3 = A + \sqrt{Q\sigma_1^2 + B^2}, \quad (8)$$

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma_1}{\sqrt{Q\sigma_1^2 + B^2}} Q. \quad (9)$$

Огибающая при $\sigma_1 \rightarrow \infty$ стремится к линии, параллельной оси σ , а касательное напряжение стремится к максимальному значению, в результате чего, согласно этому условию предельного перехода [2,4], $Q=1$. Следовательно:

$$\sigma_3 = A + \sqrt{\sigma_1^2 + B^2}, \quad (10)$$

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + B^2}}. \quad (11)$$

Проанализируем полученную таким образом зависимость $\sigma_3(\sigma_1)$ и установим область применимости формул (8) и (10).

Угловой коэффициент касательной к предельным кругам Мора (τ'), с учетом (5), определяется [2] по формуле:

$$\tau' = \frac{1 - \sigma'_3}{2\sqrt{\sigma'_3}}, \quad (\tau' = \frac{\partial \tau}{\partial \sigma}) \quad (15)$$

Обозначим $\tau' = \tan \theta$. Из построения предельного круга Мора и огибающей к нему имеем

$$2\alpha = 90^\circ - \theta, \quad (16)$$

где угол среза α при заданном виде напряженного состояния (c) и известной ординате $\tau(c)$ точки касания огибающей круга Мора определяется соотношением:

$$\sin 2\alpha = \frac{2\tau}{\sigma_1(1-c)} \quad (17)$$

В качестве исходных экспериментальных данных выбраны результаты испытаний на трехосное сжатие обширной группы горных пород, представленные в виде табличных данных в монографии [5].

Сопоставлены расчетные (согласно зависимостям (8) и (10)) и построенные по опытным данным наибольшие круги Мора (в координатах σ , τ) для горных пород при всех (не менее пяти) осуществленных в опыте напряженных состояниях. Это позволило разделить выбранные таким образом породы на 2 большие подгруппы в соответствии с их петрографическими характеристиками и значением параметра Q (Таблица 1, первая подгруппа: $Q < 1$, вторая подгруппа: $Q = 1$).

Таблица 1 – Классификация горных пород в соответствии с их структурой

Название материала	Q	Структура (зернистость)
Песчаник выбросоопасный	0,226	Крупнозернистый
Песчаник, неопасный по выбросам	0,132	Среднезернистый
Песчаник П-0	0,223	Среднезернистый(обломки зерен)
Известняк Д-6	0,27	Обломки раковин
Песчаник П-01	0,161	Обломки и цемент порового типа
Песчаник П-026	0,134	Среднезернистый
Мрамор-I	0,42	Кристаллически-зернистый
Кварцевый диорит Д-2	0,1	Гипидиоморфно(беспорядочно-) зернистая
Песчаник Д-8	1	Мелкозернистый
Песчаник П-03	1	Мелкозернистый
Мрамор II	1	Равномерно-зернистый
Известняк (Эстонсланец)	1	Микро-мелко-зернистый
Диабаз	1	Структура пойкилоофитовая

Как видно из этой таблицы, пределы прочности горных пород с мелкозернистой структурой отражаются теоретической зависимостью (10), т.е. при $Q = 1$. Для этой (второй подгруппы материалов) для построения расчетных наибольших кругов прочности Мора достаточно иметь экспериментальные значения пределов прочности при двух видах напряженного состояния (при двух значениях параметра c). Целесообразно использовать опытные данные при $c = 0$ и при максимальном значении c , осуществленного в ходе испытания. Соответствующие два значения $\sigma_1(c)$ служат «опорными точками» для определения констант A и B . Для примера (при найденных таким образом значениях A и B) на рис.1 показаны расчетные круги Мора и огибающая к ним для диабаза. Незначительное отличие расчетных от экспериментальных кругов Мора для этой породы наблюдается только при $c = 0,116$ и $c = 0,178$. Совпадают также расчетная и эмпирическая огибающие к этим кругам. Расчетная огибающая может быть аппроксимирована линией тренда (см. рис.1) с достаточно высокой достоверностью ($R^2 = 0.9987$). Установлено [6], что уравнение такой

огигающей является уравнением параболы: $\tau = -9 \cdot 10^{-5} \sigma^2 + 1,0228\sigma + 439,7$. Аналогичная закономерность выявлена и для всех рассмотренных пород.

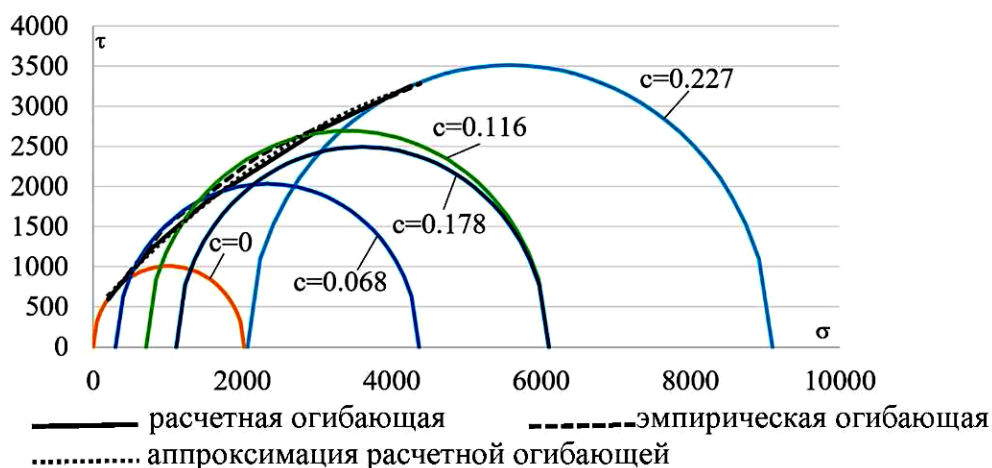


Рисунок 1 – Круги Мора и огибающие к ним для диабаза

Расчетные углы среза α_T при разных видах напряженного состояния в достаточной мере соответствуют их экспериментальным [5] значениям α_E (Таблица 2).

Таблица 2 – Значения углов среза для диабаза

c	α_E	α_T
0	24	18.5
0.068	25	23.9
0.116	30	27.5
0.182	27	31.7
0.227	33	33.9

Для определения параметров зависимости $\sigma_1(\sigma_3)$ согласно формуле (8) необходимо определить три константы (A , B и Q). Для этого используются три «опорные» точки, т.е. значения пределов прочности при трех видах напряженного состояния. Это несколько усложняет теоретические расчеты, но расширяет область применимости указанной зависимости между главными напряжениями. Чтобы сопоставить область применения формул (8) и (10) проанализировано, каким образом изменяется угол среза α с изменением вида напряженного состояния при отображении прочностных свойств первой и второй подгруппы рассмотренных материалов. Для этого построены графики относительного увеличения угла среза $\alpha_{отн} = (\alpha - \alpha_0) / \alpha_0$ как функции от относительного возрастания текущего предела прочности $\alpha_{отн} = 0,5 * (\sigma_1 - \sigma_3) * \sin(2\alpha) / \sigma_c$ в пределах всего диапазона изменения вида напряженного состояния для конкретных горных пород. Здесь α_0 и σ_c – угол среза и предел прочности при одноосном сжатии. На рис.2 нижняя кривая соответствует в указанных координатах изменению угла среза для песчаника выбросоопасного (крупнозернистого), а верхняя – для песчаника П-03 (мелкозернистого). Из сопоставления этих кривых следует, что у крупнозернистой породы по сравнению с мелкозернистой одна и та же величина относительного угла среза достигается при заметно большем относительном пределе прочности. Это обстоятельство может служить еще одним критерием для выделения какой-либо конкретной горной породы в первую или вторую подгруппу, согласно таблице 1, для последующего определения теоретических пределов прочности по формуле (8) или (10).

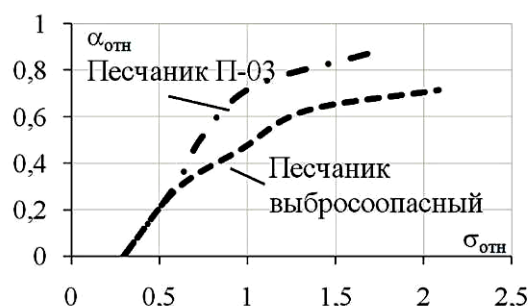


Рисунок 2 – Изменение угла среза в зависимости от относительного предела прочности для горных пород первой (песчаник выбросоопасный) и второй (песчаник П-03) подгруппы

Таким образом, построение паспорта прочности горных пород на основе теоретически сформулированной [2] зависимости между наибольшим и наименьшим главными напряжениями адекватно отражает прочностные свойства пород. Расчетная такая зависимость применительно к конкретной породе в общем случае содержит три материальных параметра. Эти параметры определяются, если известны пределы прочности породы при трех видах напряженного состояния трехосного сжатия. Установлено, что такие исходные данные необходимы для крупно зернистых пород, выделяемых в первую подгруппу из всех исследованных. Для мелко зернистых пород (выделяемых во вторую подгруппу) расчетная зависимость упрощается и число подлежащих определению материальных параметров сокращается до двух; соответственно уменьшается число достаточных исходных данных. Для включения какой-либо породы в ту или иную из указанных подгрупп можно использовать предлагаемую в данном сообщении их классификацию либо в соответствии с известными для них петрографическими характеристиками, либо в соответствии с устанавливаемыми в опыте значениями угла среза при различных видах напряженного состояния.

Литература

1. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш; Под ред. М.М. Протодьяконова. М.: Недра. 1969. 392 с.
2. Дуйшеналиев Т.Б., Койчуманов К.Т. Уравнение огибающей линии предельных кругов напряжений. Бишкек: Илим. 2006. 130 с.
3. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. М.: Наука. 1974. 176 с.
4. Рычков Б.А. О прочностных характеристиках горных пород // Современные проблемы механики сплошных сред. Бишкек. 2011. Вып. 13. С. 310-317.
5. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. М.: Недра. 1979. 305 с.
6. Рычков Б.А. О критерии прочности горных пород // Изв. КГТУ. Бишкек. 2018. № 46. С. 89-93.

Научное издание

**XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ**

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

**Сборник материалов
XI Международной конференции молодых ученых и студентов**

Том 2

**24-26 апреля 2019 года
Научная станция РАН
г. Бишкек, Кыргызская Республика**

Формат 60x80 1/8. Печать ризография.
Объем 56,5 п.л. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии «ДЭМИ»
г. Бишкек, ул. Кулатова, д. 1а
Тел.: +996 (312) 59 17 97