

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.95.78.002

УДК 622. 011. 4; 622. 023

© Р.З. Камалян, С.Р. Камалян, Н.С. Нестерова, 2023

### **Р.З. КАМАЛЯН**

д-р техн. наук, проф.,  
профессор кафедры  
Российский университет кооперации,  
г. Краснодар  
e-mail: kasarub@gmail.com

### **С.Р. КАМАЛЯН**

канд. техн. наук,  
зав. отделом Южного межрегионального  
управление охраны ПАО «Газпром», г. Краснодар  
e-mail: kasarub@gmail.com

### **Н. С. НЕСТЕРОВА**

канд. техн. наук  
доцент кафедры  
ИМСИТ, г. Краснодар  
nnnnnnn46@mail.ru

## **О ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

*Определение вида предельной поверхности разрушения горной породы в зависимости от уровня напряжений является основной задачей механики разрушения. Для ее решения широкое распространение получили различные полуэмпирические гипотезы прочности.*

*В работе рассматриваются наиболее распространенные критерии разрушения горных пород и сделана попытка проведения сравнительной оценки прочности на их основе.*

**Ключевые слова:** НАПРЯЖЕНИЕ, РАЗРУШЕНИЕ, ПРЕДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ПОРОДА, КРИТЕРИЙ, ПРОЧНОСТЬ, ОГИБАЮЩАЯ.

Разрушение горных пород носит хрупкий характер, и поэтому желательно иметь критерий хрупкого разрушения под действием комбинированных напряжений в величинах напряжений, деформаций или энергии деформаций. Для решения этой задачи широкое распространение получили различные полуэмпирические гипотезы прочности [1]. Ниже рассмотрены некоторые наиболее часто используемые и лежащие в основе других модернизированных гипотезы [2–7]. Но пре-

жде остановимся на моментах, характерных для разрушения горных пород.

Абсолютная величина разрушающего напряжения зависит не только от свойств породы, но и от вида напряжений. В связи с этим различают пределы прочности породы сжатия, сдвигу, растяжению и др. [8]. Независимо от характера приложенных напряжений разделение образца на части происходит либо путем отрыва, либо путем сдвига (среза) одной части относительно другой. При отрыве

или сдвиге преодолеваются атомные или молекулярные силы связи. Отрыв приписывается действию нормальных, а сдвиг — действию касательных напряжений.

Горные породы хорошо сопротивляются сжатию и плохо растяжению. Предел прочности образца растяжению обычно не превышает 0,1-0,5 предела прочности сжатию (меньшие значения относятся к мягким породам). Предел прочности пород сжатию вдоль слоистости меньше, чем поперек слоистости (иногда в 1,5-2 раза и более [8]). Графическое изображение хорошо иллюстрирует прочностные характеристики (рис. 1). Линия ABC характеризует прочность породы в образ-

це. Длина отрезка OA численно равна пределу прочности растяжению, а длина отрезка OD — пределу прочности сжатию. Расстояния OA и OD являются диаметрами так называемых кругов Мора. Ординаты кривой на участке BC соответствуют изменению сопротивления напряжению сдвига в зависимости от изменения величины нормальных напряжений. Линию BC на некотором протяжении принято считать прямой. Отрезок, отсекаемый этой прямой от оси ординат, соответствует величине силы сцепления, угол наклона прямой — углу внутреннего трения пород, а тангенс этого угла численно равен коэффициенту внутреннего трения.

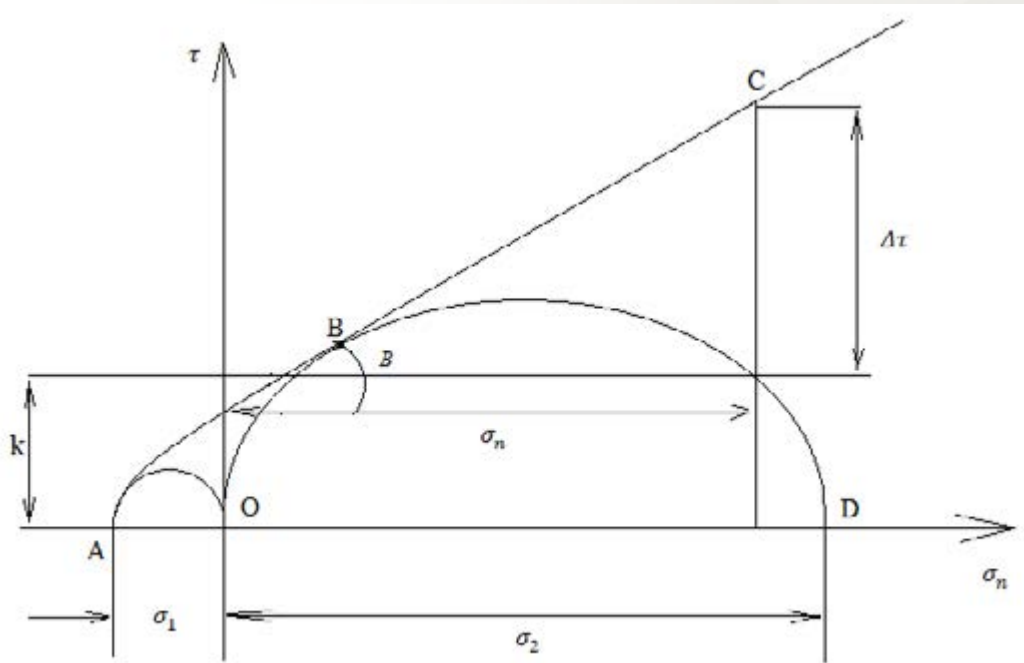


Рис. 1. Пределные напряжения по Мору

Из рис. 1 следует, что предел прочности при сдвиге равен

$$|\tau| = \Delta\tau + k.$$

И так как

$$\Delta\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \beta = \sigma_n f,$$

то

$$|\tau| = \sigma_n f + k. \quad (1)$$

Область, ограниченная линией ABC и осью абсцисс, является областью возможных напряжений для данной породы, а линия ABC выражает предельные напряжения.

Предел прочности сдвигу с возрастанием нормальных напряжений возрастает лишь до определенной величины [8]. Под воздействием напряжений в породе могут возникнуть либо изменения объема, либо изменения формы, при этом первые обусловлены действием нормальных напряжений, которые в конечном счете приводят к отрыву, вторые — действием касательных напряжений, которые приводят к сдвигу.

Теоретическая прочность отличается от действительной. Для объяснения процесса разрушения пользуются энергетической те-

орией и теорией предельных напряжений [1, 8]. Обе теории разработаны для выявления несоответствия теоретической прочности наблюдаемой. Рассмотрим некоторые из них.

**Теория Кулона.** В этой теории принимается, что разрушение произойдет в том случае, когда касательное напряжение, действующее в плоскости разрушения, достигнет критической величины, линейно зависящей от нормального давления, действующего по этой же плоскости. Условие Кулона в математической форме имеет вид, аналогичный (1):

$$|\tau_\theta| = \tau_0 + \mu\sigma_\theta \quad (2)$$

В (2)  $\tau_\theta = k$ ,  $\mu = f$ ,  $\sigma_\theta = \sigma_n$ . Заметим, что  $\mu$  — константа материала.

В терминах главных нормальных напряжений критерий (2) с учетом  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  может быть преобразован к виду [9]:

$$2\tau_0 = \sigma_1[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} - \mu] - \sigma_3[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu], \quad (3)$$

при этом угол  $\theta$ , определяющий положение плоскости разрушения, находится из уравнения:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{1}{\mu}$$

Выражение (3) может рассматриваться как уравнение линии, представляющей собой сечение поверхности разрушения плоскостью  $\sigma_2 = \sigma_3$ .

Со времени создания методики осевого деформирования образцов с одновременным наложением бокового гидростатического давления трехосные испытания стали основным видом испытаний, дающим наибольшее количество информации о прочностных свойствах горных пород [10].

Анализ результатов таких испытаний [10] показал, что линейная зависимость прочности  $\sigma_1$  от величины гидростатического давления  $\sigma_3$ , предсказываемая теорией Кулона, довольно хорошо выполняется для большинства изверженных и других прочных кристаллических пород в области сжатия при умеренных нагрузках и становится несправедливой при наличии растяжения. Угол разрушения  $\theta$ ,

определенный экспериментально, также неплохо совпадает со значением, предсказываемым теорией Кулона для мелкозернистых изотропных пород [11].

Для осадочных пород зависимость  $\sigma_1$  от  $\sigma_3$  при разрушении нелинейна, наклон линии уменьшается с увеличением  $\sigma_3$ . Этот факт побудил другого исследователя — Мора — предположить, что зависимость сдвигового  $\tau_\theta$  и нормального  $\sigma_\theta$  напряжений при разрушении может быть также нелинейной.

**Теория Мора.** В теории Мора постулируется, что материал разрушится или будет неограниченно деформироваться, когда касательное напряжение в плоскости разрушения  $\tau_\theta$  достигнет определенной величины, зависящей от нормального давления  $\sigma_\theta$ . В общем виде условие Мора можно записать следующим образом [4]:

$$\tau_\theta = f(\theta), \quad (4)$$

где вид функции (4) устанавливается экспериментально.

Кривая разрушения определяется по данным трехосных испытаний, представленных в плоскости  $\tau_\theta$ ,  $\sigma_\theta$ , в виде предельных (отвечающих разрушающим напряжениям  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3$ ) кругов Мора (рис. 2) как огибающая этих кругов. Если круг касается огибающей, то материал будет разрушаться по плоскости, для которой угол разрушения равен  $\theta$  (рис. 2).

Нетрудно заметить, что теория Мора есть обобщение теории Кулона и не только [10]. Это становится очевидным при рассмотрении графического представления теории Мора. Действительно, представим связь между  $\tau_\theta$  и  $\sigma_\theta$  при разрушении в виде (рис. 2).

$$\tau_\theta = \tau' + \sigma_\theta \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

где  $\varphi$  — угол наклона огибающей к оси  $\sigma_\theta$  в точке разрушения Р.

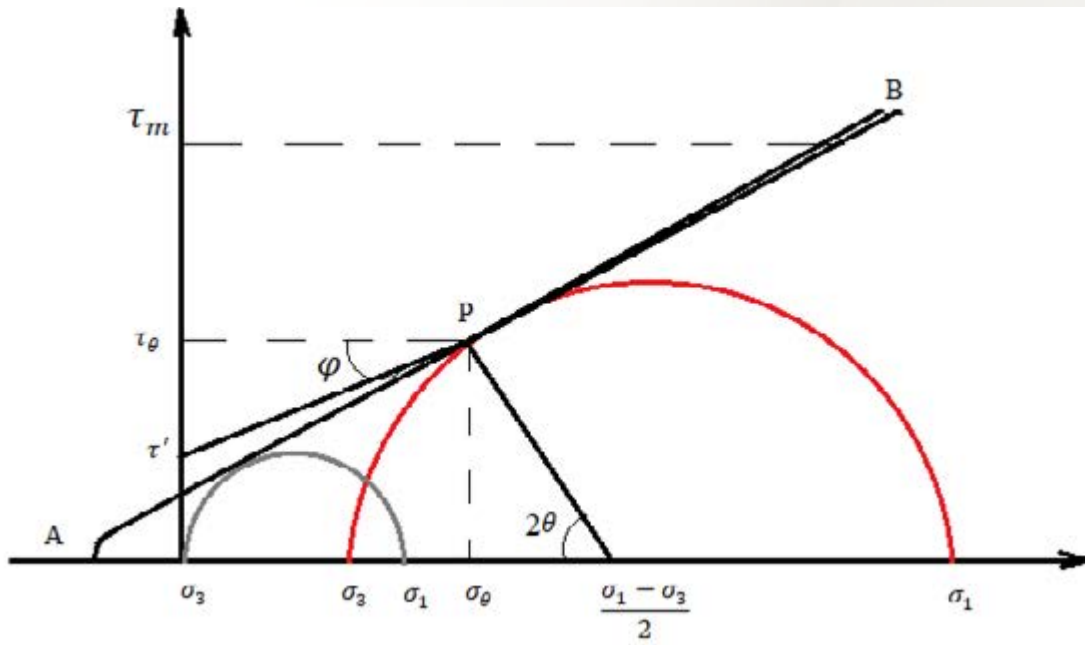


Рис. 2. Графическое представление теории разрушения Мора

В случае, когда огибающей Мора является прямая линия, то, полагая в (5)  $\tau' = \tau_\theta$  и  $\text{tg } \varphi = \mu$ , получим условие разрушения Кулона (2). Горизонтальный участок огибающей Мора АВ соответствует теории постоянства максимального касательного напряжения при разрушении, поскольку на этом участке:

$$\tau_\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_m,$$

что эквивалентно формуле Треска [4].

Кривые разрушения, определяемые по экспериментальным данным путем построения огибающей предельных кругов Мора, дают наиболее объективную прочностную характеристику материала и в силу этого широко используются в практике под названием паспортов прочности [10].

Отметим, что в [12] предложено для всех типов горных пород использовать обобщенное уравнение огибающих кругов Мора, которое имеет вид:

$$\tau_\theta = \tau_{\max} \left[ \frac{(\sigma_\theta + \sigma_p)^2}{(\sigma_\theta + \sigma_p)^2 + a^2} \right]^{3/8} \quad (6)$$

где  $\tau_{\max}$  — максимальное касательное напряжение, выдерживаемое горной породой в состоянии текучести,  $a$  — параметр формы кривой прочности,  $\sigma_p$  — прочность породы при всестороннем равномерном растяжении.

Уравнение (6), называемое обобщенной огибающей М.М. Протоdjяконова [12], при известных параметрах огибающих, позволяет определить паспорт прочности горной породы, если известны величины прочности при простом сжатии и растяжении.

Прежде чем отметить «недостаток» теории Мора и перейти к анализу другой теории, рассмотрим одну задачу, связанную с образованием воронки выброса [13]. При взрыве заряда массы  $Q$  образуется так называемая воронка выброса, основными параметрами которой являются видимая глубина и радиус воронки. Эти параметры меняются в зависимости от глубины заложения  $h_0$  заряда (при прочих равных условиях). Если  $h_0 = 0$  (накладной заряд), то глубина  $h$  небольшая, а радиус  $r$  максимален. При увеличении глубины заложения заряда глубина воронки возрастает, а радиус уменьшается. При так называемой оптимальной глубине объем воронки и видимая глубина достигают максимальных значений, а радиус  $r$  уменьшается до некоторого, соответствующего оптимальной глубине, значения. Дальнейшее углубление заряда приводит к образованию камуфлетной полости [13]. Отсюда следует, что для нахождения параметров воронки логично воспользоваться аналогией с кругами Мора. Начнем построение кругов Мора (рис. 3) с действия взрыва наклад-

ного заряда массы  $Q$ , т. е. при нулевой глубине ( $h_0=0$ ). Причем положительные значения радиуса будем откладывать вправо. Накладному взрыву соответствует круг с центром в точке  $A$ , проходящий через начало координат и точку  $a$ . Расстояние от  $O$  до  $a$  численно равно верхнему пределу величины радиуса воронки.

Построим теперь аналогично круга Мора для нижнего предела радиуса воронки, соответствующей оптимальной глубине заложения заряда. Положительные величины откладываются влево от начала координат (таким же образом, как строится обычный круг Мора для растягивающих и сжимающих напряжений).

Изображенный подобным образом круг будет проходить через начало координат,

точку  $b$  и иметь центр в точке  $B$ , причем он будет меньше круга  $O-a$ . Проведем теперь прямую, касательную к обоим кругам соответственно в точках  $c$  и  $d$ . Определим, по аналогии с теорией прочности Мора, линию, включающую дугу круга от точки  $b$  до точки  $c$  и далее прямую  $cd$ , как огибающую зон разрушений в среде зарядов данной массы. Поскольку прямая  $cd$  касается обоих кругов, то угол наклона этой прямой может служить мерой относительной способности к образованию воронки при взрывах от накладного заряда до оптимальной глубины. Угол  $\theta$ , по аналогии, «соответствует» углу трения  $\varphi$  в теории прочности Мора (рис. 3)

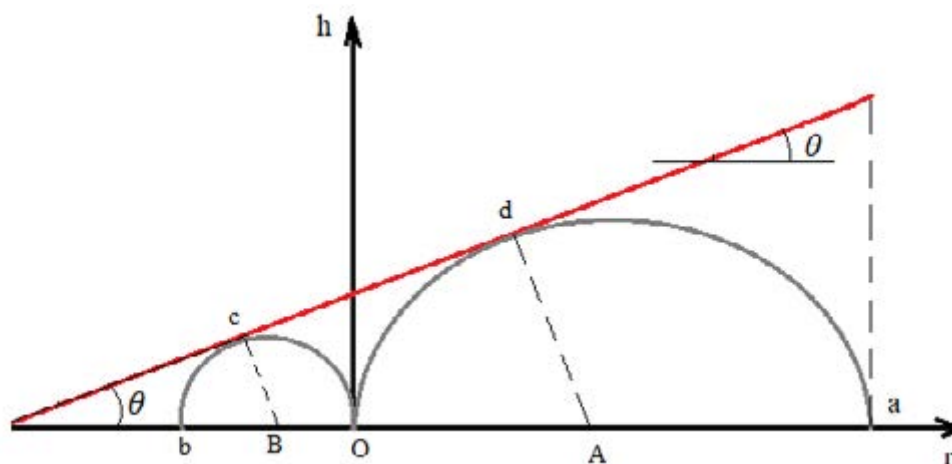


Рис. 3. Схема к определению радиуса и глубины воронки выброса

Таким образом, благодаря аналогии круга Мора, можно определить радиусы и глубины воронки выброса, т. е. параметры, определяющие, при прочих равных условиях, форму воронки в зависимости от глубины заложения заряда. Здесь проявляется «универсальность» теории Мора. Заметим, что в [14] задача о форме воронки выброса решена с помощью кривых второго порядка.

Вернемся вновь к предельной поверхности разрушения. Теории Кулона и Мора, позволяющие удовлетворительно описывать прочностные свойства горных пород в области сжимающих нагрузок, оказываются неудовлетворительными при растяжении. В этой области напряженных состояний, согласно [15], более подходящей оказывается теория Гриффитса.

**Теория Гриффитса.** Гриффитс предположил, что всякий хрупкий материал содержит множество случайно ориентированных трещин. Нагружение приводит к появлению у кончиков трещин концентрации растягивающих напряжений, вызывающих прорастание трещин и в конечном счете разрушение материала. Исходя из концепции Гриффитса, условия разрушения можно получить двумя способами: из рассмотрения энергетического баланса трещин и из рассмотрения напряженного состояния вблизи кончика трещин [16].

В первом подходе принимается, что упругая энергия, освобождаемая при прорастании трещины, должна быть достаточной для образования новой поверхности в материале (т. е. достаточной для обеспечения дальней-

шего устойчивого продвижения трещины). Такой подход приводит к критерию разрушения, который имеет вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l}},$$

где  $\gamma$  удельная поверхностная энергия,  $l$  — полудлина трещины,  $E$  — модуль Юнга.

В силовом подходе принимается, что развитие трещины наступает тогда, когда концентрация растягивающих напряжений вблизи кончика трещины сравнивается с прочностью молекулярной связи материала. При таком методе критерий разрушения, выраженный в терминах прочности на одноосное растяжение  $R_p$ , записывается следующим образом:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = 8R_p \quad \text{для } (\sigma_1 + 3\sigma_3) > 0,$$

$$\sigma_3 = -R_p \quad \text{для } (\sigma_1 + 3\sigma_3) < 0.$$

Теория Гриффитса неоднократно отвергалась и принималась вновь. Известны ее различные усовершенствования и модификации [12]. Эта теория имеет определенное применение, о чем свидетельствует обширная литература по определению величин удельной поверхностной энергии [10, 12].

**Оценка огибающих кругов.** Проведем оценку огибающих максимальных кругов Мора, используя рассмотренные формулы.

Поскольку каждый автор считал свою гипотезу наиболее близкой к действительности, а значения  $\tau = f(\sigma)$ , вычисленные по рассмотренным формулам, значительно различаются между собой, то есть смысл оценить эти различия. Однако, чтобы можно было сравнивать, огибающие должны строиться при подходящем, одинаковом для всех кривых, показателе. Для этой цели (и не только) можно выбрать так называемый коэффициент хрупкости, определяемый как отношение между пределом прочности при сжатии  $\sigma_c$  и при растяжении  $\sigma_p$ . Согласно [8], это отношение меняется от 10 до 2.

К огибающим принято предъявлять следующие требования [10]:

1. Быть плавными и непрерывными;
2. Пересекать перпендикулярно ось абсцис  $\sigma$ ;
3. Иметь конечный радиус в точке пересечения.

Так как теория Мора есть обобщение теории Кулона (и не только), то рассмотрим их огибающие как огибающую Кулона — Мора, выражаемую уравнением:

$$\tau_\theta = \tau_0 + \sigma_\theta \operatorname{tg} \varphi, \quad (7)$$

Если прямая уравнения (7) касается кругов  $\sigma_p$  и  $\sigma_c$ , получаются очень низкое значение для  $\tau_0$  и нереально высокие  $\varphi$  (рис. 4, прямая 1), где  $\varphi = \operatorname{arctg} f$ ,  $f$  — коэффициент прочности М.М. Протоdjяконова. Это отмечается и в [12].

Таким образом,

$$f = \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \operatorname{arcsin} \frac{\sigma_c - \sigma_p}{\sigma_c + \sigma_p}.$$

Если  $f = 20$ ,  $\varphi = 87^\circ 5'$ , то  $\sigma_c / \sigma_p = 1599$ . Такое соотношение не встречается и при самых прочных породах (кварциты, базальты).

Если  $\sigma_c / \sigma_p = 10$ , то  $\varphi = 54^\circ 55'$ ,

$$\text{а } f = \operatorname{tg} \varphi = 1,423,$$

что не может быть верным в одно и то же время как для слабых глинистых песчаников, так и для прочных гранитов с  $\sigma_c / \sigma_p = 10$ .

Чаще всего уравнение (7) представляется в виде:

$$\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} - \operatorname{tg} \varphi \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = C = \tau_0$$

и касается двух предельных кругов Мора, отображая объемное напряженное состояние при  $\sigma > 0$  [10].

**Огибающая М.М. Протоdjяконова.** Физическая модель ее учитывает неоднородность и дефекты (трещины, поры и др.) в горных породах. При увеличении сжимающих напряжений перпендикулярно к плоскости среза дефекты залечиваются (трещины закрываются), фактическая площадь среза стремится к геометрической и  $\tau = f(\sigma)$  асимптотически приближается к  $\tau_{\max}$ , что соответствует максимальному напряжению среза в горных породах без дефектов. При срезе в области растяжения получается обратная картина —  $\tau > 0$ , а  $\sigma \rightarrow \sigma_p$ .

Огибающая (рис. 4, кривая 2) построена по уравнению:

$$\tau = 27,65 \left[ \frac{(\sigma+1)^2}{(\sigma+1)^2+1434,8} \right]^{3/8}.$$

**Огибающая Кузнецова Г.Н.** Она построена по уравнению [17] (рис. 4, кривая 3):

$$\tau^2 = (2 - 2\sqrt{11} + \pi)(\sigma + 1) = 5,3668(\sigma + 1).$$

**Огибающая Гриффитса.** Она выражается уравнением [18]

$$\tau = 4G_p(\sigma_p + \sigma)$$

и отображает начало трещинообразования, а само разрушение описывается касательной, проведенной в исследованной точке от огибающей при хрупком разрушении, обычно в области растягивающих напряжений

$$\tau = c + \operatorname{tg} \varphi * \sigma. \quad (8)$$

Выражение (8) формально совпадает с (7). Эксперименты показывают, что для  $\frac{\sigma_c}{\sigma_p} < 8$  теория Гриффитса недействительна. Огибающая (рис. 4, кривая 4) построена по уравнению

$$\tau^2 = 4(4 + \sigma).$$

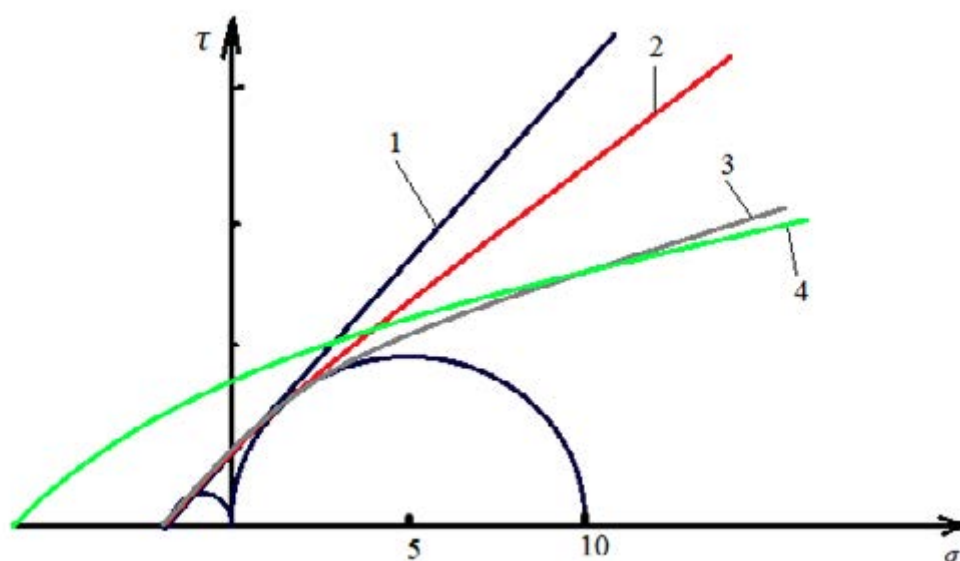


Рис. 4. Оценка огибающих кругов Мора по рассмотренным формулам

Итак, как видно из рис. 4 поведение огибающих сильно отличается друг от друга. Иными словами, из рассмотренных формул нельзя сказать, что какая-то из них представляет собой обобщенную огибающую максимальных кругов Мора [12]. По-видимому, это и послужило причиной для многих исследователей как целью уточнения существующих, так и получения новых формул. Основ-

ной вопрос состоит в том, какую огибающую и в каких случаях можно использовать. Ответ на этот вопрос можно получить, по-видимому, с помощью значительного числа экспериментов. В таком направлении есть смысл продолжать поиски огибающих. Заметим, что ни одна из рассмотренных теорий прочности не использует физической сущности прочности твердых тел [18].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джегер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. М., 1975. 254 с.
2. Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // Прикладная механика и техническая физика. 1961. № 4. С. 3–56.
3. Ставрогин А.Н. Статистические основы прочности и деформации горных пород при сложных напряженных состояниях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1974. № 4. С. 3–18.

4. Введение в механику скальных пород. М., 1983. 276 с.
5. Штейн М.Ж. Об одном обобщении условия Кулона – Мора для идеальных связных сред с трением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1987. № 2. С. 26–36.
6. Борулев А.Д., Подымов В.В. Расчет параметров процесса разрушения взрывными нагрузками горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1991. № 3. С. 41–46.
7. Тарасов Б.Г. О статистической природе прочности горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1991. № 5. С. 36–44.
8. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М., 1974. 224 с.
9. Lundborg N. Strength of rock-like materials // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 1968. Issue 5. P. 427–454.
10. Николаевский В.Н., Лившиц Л.Д., Сизов И.А. Механические свойства горных пород. Деформации и разрушение // Механика твердого деформируемого тела. Т. 11. 1978. С. 123–250.
11. Кунтыш М.Ф., Чирков С.Е. Поведение горных пород при всестороннем сжатии // Научные сообщения ИГД им. академика А.А. Скочинского. 1970. № 76. С. 23–30.
12. Протоdjяконов М.М. Обобщенное уравнение огибающих к предельным кругам напряжений Мора // Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. М.: АН СССР, 1962. С. 27–38.
13. Ромашов А.Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. М., 1980. 243 с.
14. Арутюнов О.А., Дыскин В.Г., Камалян Р.З. О форме воронки выброса в грунтах // Физика горения и взрыва. 1986. № 3. С. 128–131.
15. Оберт Л. Хрупкое разрушение горных пород // Разрушение. Т. 7. Ч. 1. М., 1976. С. 59–129.
16. Разрушение. Т. 2. М., 1975. 763 с.
17. Кузнецов Г.Н., Будько М.Н. Исследование предельных состояний хрупкого материала в различных условиях трехосного сжатия // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела. 1968. Т. 70. С. 22–44.
18. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М., 1973. 288 с.

---

**DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.95.78.002**

**UDC 622.011. 4; 622.023**

**© R.Z. Kamalyan, S.R. Kamalyan, N.S. Nesterova, 2023**

**R.Z. KAMALYAN**

Doctor of Engineering Sciences,  
Professor of Department  
IMSIT, Krasnodar  
e-mail: kasarub@gmail.com

**S.R. KAMALYAN**

Candidate of Engineering Sciences,  
Head of the Department of the Southern Interregional Security Department  
PJSC «Gazprom», Krasnodar  
e-mail: kasarub@gmail.com



---

**N.S. NESTEROVA**

Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor  
IMSIT, Krasnodar  
e-mail: nnnnnn46@mail.ru

**ON ULTIMATE FRACTURE SURFACE AND EVALUATION OF ROCK STRENGTH**

*Determining the type of ultimate rock fracture surface depending on the stress level is the main task of fracture mechanics. To solve it, various semi-empirical hypotheses of strength have become widespread.*

*The most common rock fracture criteria are considered and an attempt is made to conduct a comparative strength assessment based on them.*

Keywords: STRESS, DESTRUCTION, LIMIT SURFACE, ROCK, CRITERION, READABILITY, ENVELOPE.

**REFERENCE**

1. Jaeger Ch. Mechanics of rocks and engineering structures. M., 1975. 254 p. [In Russ.].
2. Barenblatt G.I. Mathematical theory of equilibrium cracks formed during brittle fracture // Applied Mechanics and technical physics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 1961. No. 4. P. 3–56. [In Russ.].
3. Stavrogin A.N. Statistical bases of strength and deformation of rocks under complex stress conditions // Physico-technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1974. No. 4. P. 3–18. [In Russ.].
4. Introduction to the mechanics of rocks. M., 1983. 276 p. [In Russ.].
5. Stein M.J. On one generalization of the Coulomb condition – Mora for ideal connected media with friction // Physico-technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1987. No. 2. P. 26–36. [In Russ.].
6. Borulev A.D., Podymov V.V. Calculation of parameters of the process of destruction by explosive loads of mine workings // Physico-technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1991. No. 3. P. 41–46. [In Russ.].
7. Tarasov B.G. On the statistical nature of rock strength // Physico-technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1991. No. 5. P. 36–44. [In Russ.].
8. Hanukaev A.N. Physical processes in the breaking of rocks by explosion. M., 1974. 224 p. [In Russ.].
9. Lundborg N. Strength of rock-like materials // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 1968. Issue 5. P. 427–454.
10. Nikolaevsky V.N., Livshits L.D., Sizov I.A. Mechanical properties of rocks. Deformations and destruction // Mechanics of a solid deformable body [Mekhanika tverdogo deformiruemogo tela]. Vol. 11. 1978. P. 123–250. [In Russ.].
11. Kuntyshev M.F., Chirkov S.E. Behavior of rocks under comprehensive compression // Scientific reports of the A.A. Skochinsky Institute of Mining. 1970. No. 76. P. 23–30. [In Russ.].
12. Protodiakonov M.M. Generalized equation of envelopes to limiting circles of Mora stresses // Investigation of physico-mechanical properties of rocks in relation to problems of rock pressure control. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1962. P. 27–38. [In Russ.].
13. Romashov A.N. Features of the action of large underground explosions. M., 1980. 243 p. [In Russ.].
14. Arutyunov O.A., Dyskin V.G., Kamalyan R.Z. On the shape of an ejection funnel in soils // Combustion and explosion physics [Fizika goreniya i vzryva]. 1986. No. 3. P. 128–131. [In Russ.].

15. Obert L. Brittle destruction of rocks // Destruction [Razrushenie]. Vol. 7. Part 1. M., 1976. P. 59–129. [In Russ.].
16. Destruction. Vol. 2. M., 1975. 763 p. [In Russ.].
17. Kuznetsov G.N., Budko M.N. Investigation of the limiting states of brittle material under various conditions of triaxial compression // Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Mining Geomechanics and Surveying [Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gornoj geomekhaniki i markshejderskogo dela]. 1968. Vol. 70. P. 22–44. [In Russ.].
18. Rzhnevsky V.V., Novik G.Ya. Fundamentals of rock physics. M., 1973. 288 p. [In Russ.].