

ISSN 1694-8335 (print)
ISSN 1694-8343 (online)

ИЗВЕСТИЯ

КЫРГЫЗСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. И. РАЗЗАКОВА

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
2024

№1 (69)

Теоретический и прикладной научно-технический
журнал

Учредитель: Кыргызский государственный
технический университет им. И.Раззакова
Адрес редакции: 720044, Кыргызская Республика,
город Бишкек, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66,
каб.272.

Тел.: +996(312) 54-51-40

Сайт: <https://kstu.kg/bokovoe-menju/zhurnal-izvestija-kgtu-im-i-razzakova>

email: journalkstu@gmail.com
journal@kstu.kg

Журнал зарегистрирован В Министерстве юстиции
Кыргызской Республики
Свидетельство № 925 от 16 января 2004 года.

ISSN 1694-8335

Журнал зарегистрирован В Российском индексе
научного цитирования

Материалы журнала проходит независимое
рецензирование

Подписан в печать 15.03.2024

Тираж 50 экз.

Отпечатано в типографии «Калем»

Главный редактор: *М.К. Чыныбаев*, кандидат
физико-математических наук, доцент, ректор КГТУ
им. И.Раззакова

Тел.: Тел.: (312)54-51-25

Электронная почта: rector@kstu.kg

Заместитель главного редактора: *Б.Т. Торобеков*,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе

Тел.: Тел.: (312)54-51-40

Электронная почта: torobekov@kstu.kg

Ответственный секретарь: *А.Б.Аманкулова*
тел.: 0550-660-442
0505-660-442

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. Алымкулов - д. т. н., профессор
М.З. Алмаматов - д. т. н., профессор
М.К. Асаналиев – д. педаг. н. профессор
А.А. Акунов – д. истор. н., профессор
М.Б. Баткибекова – д. хим. н., профессор
А.Б. Бакасова – д.т. н., профессор
Ж.И. Батырканов - д. т. н., профессор
И.В. Бочкарев - д. т. н., профессор
У.Н. Бримкулов - д. т. н., профессор, чл.-корр.
НАН КР
Ж.Т.Галбаев – д.т.н., профессор
М. Дж. Джаманбаев – д. физ.-мат. н. профессор
М.С. Джуматаев – д. т. н., профессор, академик
НАН КР
У.Р. Давлятов - д. т. н., профессор, член-корр. НАН
КР
Т.Б. Дуйшеналиев - д. физ.-мат. н., профессор
Т.Ш. Джунушалиева - д. хим. н., профессор
К.М. Иванов - д. т. н., профессор (Россия)
А.С. Иманкулова - д. т. н., профессор
Г.Дж. Кабаева - д. физ.-мат. н., профессор
К. Ч. Кожозулов - д. т. н., профессор, чл.-корр.
НАН КР
Т.Ы. Маткеримов - д. т. н., профессор
М.М. Мусульманова - д. т. н., профессор
А.Дж. Обозов – д.т.н., профессор, член-корр. НАН
КР
К.О. Осмонбетов – д. геолого-минерал. н.,
профессор
Н.Д. Рогалев - д. т. н., профессор (Россия)
А.Б. Салиев - д. физ.-мат. н., профессор
Р.М. Султаналиева - д. физ.-мат. н., профессор,
член-корр. НАН КР
А.Т. Татыбеков - д. т. н., профессор
Ж.Ж. Турдумбаев - д. т. н., профессор
А.С. Уметалиев – д.э.н., профессор

© Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Р.А.МЕНДЕКЕЕВУ 65 ЛЕТ	7
------------------------------------	----------

ГЕОДЕЗИЯ, КАРТОГРАФИЯ

Замирова А.З., Абдурашитов А.Ш., Имамбеков Э.Ж. Применение методов дистанционного зондирования земли в лесном хозяйстве	9
Калыков А.С., Сыдыков А.Б., Чолпонбек у. А. Применение беспилотных технологий при создании цифровых моделей местности	17
Тыныбекова А.Т., Исмаилов Н.Ы., Абдрашитов А.Р. Применение дистанционного зондирования и гис для тематического картирования бассейна реки Нарын в Кыргызстане	23
Юлдашев Ш.Р., Бектурсунова Н.Б., Акылбек к. А, Имамбеков Э.Ж. Применение дистанционного зондирования земли при изучении экологической катастрофы Аральского моря	30
Родионова Е.Г., Чортомбаев У. Т., Шергазыев Н. Ш. Применение современных методов съемки для поиска и обследования инженерных коммуникаций	36

ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ ДЕЛО

Джаманбаев М. Дж., Омуралиев С.Б., Фалалеев Г.Н. Расчет устойчивости оползневого склона методом FR в Сузакском районе Кыргызстана	45
Пазылов Т.Ш., Рахматов С.Н., Коробовский Н.В. , Курманалиев К.З. Анализ соглашений проекта Кумтор. Правовые аспекты	52
Рахматов С.Н., Пазылов Т.Ш., Коробовский Н.В., Курманалиев К.З. Горная отрасль в Кыргызской Республике, состояние и проблемы	61
Рычков Б.А., Комарцов Н.М. , Гончарова И.В., Кулагина М.А. Критерий прочности и паспортные характеристики горных пород	71
Сатыбеков М.Б., Зарлыков А.К., Шамшиев О.Ш. Влияние метода оценки и ограничения выдающихся проб на вывод среднего содержания	80
Сатыбеков М.Б., Зарлыков А.К., Шамшиев О.Ш. Особенности оценки основных параметров оруденения жильного золотокварцевого месторождения	92
Султаналиева Р. М., Омуралиев С.Б., Фалалеев Г.Н. Влияние влажности и толщины песчано-глинистого заполнителя межблочного пространства на режимы скольжения	107

ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

Кожобеков М. Ч., Карыева А. К. «Кыргыз» этнонимине байланышкан чаташуулар туурасында	115
Кожокулова А. Н., Кыдыралиев Д. С. Особенности подготовки архитекторов и дизайнеров в условиях актуальных проблем совершенствования высшего образования в Кыргызстане	122
Кувшинов А.А., Ларина Н.А., Кожобаева С.Т. Архитектор инженер как универсальный специалист будущего в малоэтажном строительстве	130
Раимкулова А.С. Цифровизация как фактор качественных преобразований в сфере образования	137
Сияев Т.М., Батырова Ы.М., Омүралиева М.Н. Болочоктогу педагогдордун инструменталдык компетенцияларын калыптоонун абалы	143
Сияев Т.М., Бердибекова С.К., Батырова Ы.М., Омүралиева М.Н. Социалдык тармактын педагогикалык процесске тийгизген таасири	150

Б.А. Рычков¹, Н.М. Комарцов², И.В. Гончарова³, М.А. Кулагина⁴

^{1,2,3,4} Б.Н. Ельцин атындагы КРСУ, Бишкек, Кыргыз Республикасы
^{1,2,3,4}Кыргызско- Российский славянский университет им. Б.Ельцина, Бишкек, Кыргызская Республика

B.A. Rychkov¹, N.M. Komartsov², I.V. Goncharova³, M.A. Kulagina⁴

^{1,2,3,4}Kyrgyz-Russian Slavic University n. a. B. Yeltsin, Bishkek, Kyrgyz Republic
e-mail: rychkovba@mail.ru komartsovm@mail.ru goncharovaiv@mail.ru
kulagina_m.a@mail.ru

КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ И ПАСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

КАТУУЛУК КРИТЕРИЙЛЕРИ ЖАНА ТОО ТЕКТЕРИНИН ПАСПОРТТУК МҮНӨЗДӨМӨЛӨРҮ

STRENGTH CRITERION AND PASSPORT CHARACTERISTICS OF ROCKS

Учурда конкреттүү материалдардын: айрыкча тоо тектеринин бекемдик касиеттерин чагылдырган ар кандай күч критерийлеринин интенсивдүү апробациясы жүрүп жатат. Бул үчүн бирдей эмес үч октуу кысуу жана бир октуу кысуу жана чыңалуу шарттарында цилиндрдик үлгүлөрдү сыноонун жыйынтыгы боюнча "нормалдуу - тангенс стресс" координаттарында чектик стресстин эң чоң чөйрөлөрүнүн конверт конструкциясы курулган Мор диаграммасы колдонулат. Бул конверт тоо тектеринин бекемдигинин паспорту катары кабыл алынат (ГОСТ 21153.8-88 ылайык), анын болушу тоо-кен ишинин ар кандай маселелерин чечүүдө зарыл.

Кээ бир учурларда, ал жылышуу участогунда жылышуу октору жана нормалдуу стресс компоненттери боюнча эмес, тоо тектеринин чектүү стресс абалынын шарттарын элестетүү кыйла ыңгайлуу болуп саналат, ал эми негизги нормалдуу стресс октору: максималдуу жана минималдуу. Бул ыкма Мора күчү теориясынын синтези менен бирге бул иште колдонулган

Түйүндүү сөздөр: тоо тектери, күч критерийлери, эң чоң Мора чектеринин тегерегин айланып өтүүчү Мора диаграммасы.

В настоящее время ведется интенсивная апробация различных критериев прочности, которые отражали бы прочностные свойства конкретных материалов: в частности, горных пород. Для этого используется диаграмма Мора, на которой в координатах «нормальное-касательное напряжение» строится огибающая наибольших кругов предельных напряжений, возникающих на площадке среза в результате испытания цилиндрических образцов в условиях неравномерного трехосного сжатия и одноосного сжатия и растяжения. Эта огибающая принимается в качестве паспорта прочности горных пород (согласно ГОСТ 21153.8-88), наличие которого необходимо при решении различных задач горного дела.

В некоторых случаях более удобно графически представлять условие предельных напряженных состояний породы не в осях сдвигающих и нормальных напряжений на площадке сдвига, а в осях главных (нормальных) напряжений: максимального и минимального. Такая зависимость между главными напряжениями также считается паспортной характеристикой для горных пород. Именно такой подход использован в данной работе наряду с синтезом теории прочности Мора.

Ключевые слова: горные породы, критерии прочности, диаграмма Мора, огибающая наибольших предельных кругов Мора.

Currently, intensive testing of various strength criteria is underway, which would reflect the strength properties of specific materials: in particular, rocks. For this, the Mohr diagram is used, on which, in the coordinates "normal - shear stress", the envelope of the largest circles of ultimate stresses is plotted based on the results of testing cylindrical samples under conditions of uneven triaxial compression and uniaxial compression and tension. This envelope is accepted as a rock strength passport (according to GOST 21153.8-88), the presence of which is necessary when solving various mining problems.

In some cases, it is more convenient to graphically represent the condition of the ultimate stress states of the rock not in the axes of the shear and normal stress components at the shear site, but in the axes of the main normal stresses: maximum and minimum. It is this approach that is used in this work along with the synthesis of Mohr's theory of strength.

Key words: rocks, strength criteria, Mohr diagram, envelope of the largest limiting Mohr circles.

Исходные положения. Согласно ГОСТ 21153.8–88 [1] паспортом прочности горных пород при объемном напряженном состоянии считается огибающая к наибольшим предельным кругам напряжений Мора, построенным в плоскости нормального (σ) и касательного (τ) напряжений по результатам измерения главных напряжений ($\sigma_i, i=1,2,3$). Эти круги в лабораторных условиях получаются в эксперименте при нескольких видах трехосного сжатия цилиндрических образцов по схеме Кармана ($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$), а также при растяжении и одноосном сжатии.

При заданном напряженном состоянии образца горной породы, имеем уравнение круга Мора:

$$\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sigma\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2, \quad (1)$$

где главные напряжения σ_1, σ_3 соответствуют моменту наступления разрушения образца.

Уравнение (1) (для удобства его исследования) записывается в виде:

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

где параметром семейства уравнений (φ) является напряжение $\sigma_i, i=1,3$. Выражение (2) можно рассматривать как алгебраическое уравнение второй степени относительно главных напряжений σ_1 и σ_3 .

Общее уравнение второй степени относительно осей x и y имеет вид [2]:

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0, \quad (3)$$

где $a_{ik} = a_{ki} (i, k=1, 2, 3)$.

Для рассматриваемого уравнения (3), принимая $\sigma_1 = x, \sigma_3 = y$, выразим коэффициенты a_{ik} , согласно (2):

$$a_{11} = a_{22} = 0; \quad a_{13} = a_{31} = -\sigma/2; \quad a_{23} = a_{32} = -\sigma/2; \quad a_{33} = \sigma^2 + \tau^2 \quad (4)$$

Инварианты уравнения (3), по которым судят о классификации соответствующей ему кривой, таковы:

$$D_{инв.} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \quad A_{инв.} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

Согласно (4):

$$D_{инв.} = -1/4 < 0, A_{инв.} = -\tau^2/4 \neq 0.$$

В соответствии с этими значениями инвариантов $A_{инв.}$ и $D_{инв.}$, выражение (2) представляет собой уравнение гиперболы [3]. Это обстоятельство использовано для формулировки зависимости между главными напряжениями, отражающей установленное свойство предельных кругов Мора, т.е. для представления критерия прочности.

Согласно известной теореме [3], огибающая семейства уравнений вида (2) должна удовлетворять также уравнению:

$$\varphi_{\sigma_i}(\sigma, \tau, \sigma_i) = 0, \varphi_{\sigma_i} = \partial \varphi / \partial \sigma_i. \quad (5)$$

Решением системы уравнений (2) и (5) при $i=1$ будут координаты огибающей:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma'_3}{1 + \sigma'_3}, \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma'_3} \sqrt{\sigma'_3}, \left(\sigma'_3 = \frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_1} \right) \quad (6)$$

При $i=3$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 \sigma'_1}{1 + \sigma'_1}, \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma'_1} \sqrt{\sigma'_1}, \left(\sigma'_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} \right) \quad (7)$$

Предварительно укажем следующее: уравнение кругов Мора можно представить еще в виде, отличном от (2):

$$\varphi(\sigma, \tau, \sigma_1) = \sigma^2 + \tau^2 - (1+c)\sigma_1\sigma + c\sigma_1^2 = 0, \quad (8)$$

где в качестве параметра данного семейства кругов фигурирует вид напряженного состояния $c = \sigma_3/\sigma_1$.

В этом случае координаты огибающей предельных кругов напряжений имеют вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_1(\sigma_1 + 2c(\sigma_1)_c)}{\sigma_1 + (1+c)(\sigma_1)_c}, \tau = \frac{(1-c)\sigma_1\sqrt{(\sigma_1 + c(\sigma_1)_c)(\sigma_1)_c}}{\sigma_1 + (1+c)(\sigma_1)_c}, (\sigma_1)_c = \frac{\partial \sigma_1}{\partial c}.$$

Зависимости (6)-(8) будут определены, если известен критерий прочности, т.е. связь между главными напряжениями σ_1 и σ_3 в момент разрушения испытуемых образцов.

Критерии прочности. Для некоторых технологических задач достаточно использовать линейную огибающую, представляющую собой касательную к кругам на растяжение и одноосное сжатие. Пределы прочности при этих двух видах напряженного состояния определяются экспериментально непосредственно для рассматриваемых горных пород при решении конкретных задач [4]. При объемном напряженном состоянии используются различные эмпирические критерии на основе детализации теории прочности Мора [5-10].

Разрабатываемый нами модифицированный [Рычков Б.А., Комарцов Н.М., Гончарова И.В., Кулагина М.А. Модифицированный критерий прочности горных пород [13] критерий прочности (после корректировки [11] критерия, предложенного в [5] имеет вид:

$$\sigma_3 = A + \sqrt{Q\sigma_1^2 + B^2} \quad (A, B, Q - \text{const}), \quad (9)$$

где главные напряжения сжатия (σ_i , $i=1,2,3$) считаются положительными и $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

Входящие в зависимость (9) материальные параметры (A, B, Q) можно определить, опираясь на экспериментальные данные при каких-либо трех видах напряженного состояния (выбираемых в качестве «опорных точек»).

На основании формулы (9), выражая зависимость $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_1)$ при трех видах напряженного состояния $c = \sigma_3/\sigma_1$ (c_i , $i=1,2,3$), получим систему из трех уравнений относительно трех констант (A, B, Q). Ее решение доставляет:

$$A = \frac{(c_1^2 \sigma_{1(1)}^2 - c_2^2 \sigma_{1(2)}^2) - q(c_2^2 \sigma_{1(1)}^2 - c_3^2 \sigma_{1(3)}^2)}{2[(c_1 \sigma_{1(1)} - c_2 \sigma_{1(2)}) - (c_1 \sigma_{1(1)} - c_3 \sigma_{1(3)})q]}, \quad (10)$$

где

$$q = \frac{(\sigma_{1(1)})^2 - \sigma_c^2}{(\sigma_{1(2)})^2 - \sigma_c^2}, \quad \sigma_{1(i)} = \sigma_1|_{c=c_i}, \quad \sigma_c = \sigma_1|_{c=0}, \quad (11)$$

$$Q = \frac{c_2^2 \sigma_{1(2)}^2 - 2c_2 \sigma_{1(2)} A}{\sigma_{1(2)}^2 - \sigma_{1(1)}^2}, \quad (12)$$

$$B = \sqrt{A^2 - Q \sigma_c^2}. \quad (13)$$

Таким образом, зависимость (5) можно представить в виде:

$$\sigma_1(c) = \frac{-Ac + \sqrt{QA^2 - (Q - c^2)B^2}}{Q - c^2} \quad (14)$$

Используя выражение (14), получим:

$$(\sigma_1)_c = \frac{\partial \sigma_1}{\partial c} = \frac{c[2A^2 - (Q - c^2)B^2] - A(Q + c^2)\sqrt{QA^2 - (Q - c^2)B^2}}{(Q - c^2)^2 \sqrt{QA^2 - (Q - c^2)B^2}}. \quad (15)$$

Показано [11], что при $\sigma_1 \rightarrow \infty$ параметр $Q \rightarrow 1$. Поэтому наряду с зависимостью (9) можно рассматривать альтернативную ей следующую зависимость:

$$\sigma_3 = A + \sqrt{\sigma_1^2 + B^2}, \quad (16)$$

после установления области ее применимости.

Методика определения материальных констант. Рассмотрим зависимость (16). При одноосном сжатии $\sigma_3 = 0$, а напряжение σ_1 равно пределу прочности на сжатие (σ_c), т.е. $\sigma_1 = \sigma_c$. Это напряжение будет служить первой «опорной точкой» для определения искомых констант. В этом случае из формулы (16) следует:

$$A^2 - B^2 = \sigma_c^2. \quad (17)$$

Учитывая, что при произвольном виде напряженного состояния $\sigma_3 = c\sigma_1$, выразим константу A согласно (16) и (17):

$$A = \frac{(c^2 - 1)\sigma_1^2 + \sigma_c^2}{2c\sigma_1} \quad (18)$$

В формуле (18) напряжение σ_1 можно выбрать при каком-либо конкретном виде напряженного состояния, осуществленного в эксперименте. Целесообразно выбирать такое напряжение при максимальном осуществленном в опыте боковом давлении (т.е. при $c = c_{\max}$). Тогда это напряжение будет служить второй «опорной точкой» для определения константы A согласно (18). Затем константа B находится из формулы (17). В итоге (при известных константах A и B) при произвольном виде напряженного состояния напряжение σ_1 представим в виде:

$$\sigma_1(c) = \frac{-Ac + \sqrt{A^2 - (1 - c^2)B^2}}{1 - c^2}. \quad (19)$$

Зависимость (19), как и зависимость (9), позволяет определить предел прочности на растяжение (при найденных выше указанным образом константах

(A и B):

$$\sigma_p = A + B \quad (20)$$

Аналогичный по структуре критерий предложен в работе [12], который для ненарушенных (в исходном состоянии) горных пород может быть представлен в виде:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{A_h \sigma_3 + B_h^2} \quad (A_h, B_h - \text{const}) \quad (21)$$

Как подчеркивается авторами данного критерия [12], критерий (21) является эмпирическим. Он установлен методом проб и ошибок при согласовании между расчетными и экспериментальными данными трехосного сжатия образцов различных горных пород.

Соотношение (21) представим алгебраическим уравнением второй степени:

$$\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2 - A_h\sigma_3 - B_h^2 = 0. \quad (22)$$

В соответствии с классификацией уравнений второй степени [3], уравнение (22) (судя по его инвариантам) является уравнением параболы.

Как и при рассмотрении критерия (16), используя в качестве «опорных точек» случай одноосного сжатия и какой либо конкретный вид напряженного состояния, выразим константы A_h и B_h , входящие в критерий (21):

$$B_h = \sigma_c; \quad A_h = \frac{\sigma_1^2(1-c)^2 - \sigma_c^2}{\sigma_1 c} \quad (23)$$

При известных константах A_h и B_h для построения в случае трехосного сжатия кругов Мора, огибающей к ним и для определения предела прочности на растяжение получим соотношения:

$$\sigma_1 = \frac{A_h c + \sqrt{A_h^2 c^2 + 4(1-c)^2 B_h^2}}{2(1-c)^2} \quad (24)$$

$$(\sigma_1)_c = \frac{A_h(1+c)\sqrt{A_h^2 c^2 + 4(1-c)^2 B_h^2} + 4(1-c)^2 B_h^2 + A_h^2 c(1+c)}{2(1-c)^3 \sqrt{A_h^2 c^2 + 4(1-c)^2 B_h^2}}, \quad \left((\sigma_1)_c = \frac{\partial \sigma_1}{\partial c} \right) \quad (25)$$

$$\sigma_p = \frac{A_h - \sqrt{A_h^2 + 4\sigma_c^2}}{2}. \quad (26)$$

По критерию Хоека-Брауна, на основании исходной формулы (21) и значения параметра B_h согласно формуле (23), зависимость $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_1)$ определяется по формуле:

$$\sigma_3 = \frac{2\sigma_1 + A_h - \sqrt{4(\sigma_1 A_h + \sigma_c^2) + A_h^2}}{2}, \quad (27)$$

а координаты огибающей - формулами (6), в которых производная σ_3' имеет вид:

$$\sigma_3' = \frac{4(A_h \sigma_3 + \sigma_c^2) - 2A_h \sqrt{A_h \sigma_3 + \sigma_c^2}}{4(A_h \sigma_3 + \sigma_c^2) - A_h^2}, \quad (28)$$

где параметр A_h вычисляется (в отличие от формулы (23)) следующим образом:

$$A_h = \frac{\sigma_p^2 - \sigma_c^2}{\sigma_p}. \quad (29)$$

На основании проведенного исследования можно заключить, что параметр $Q=1$ отражает поведение горных пород, у которых приращение величины объемного сжатия к величине одноосного сжатия менее чем 5, а при большей этой величины $Q < 1$. Это

обстоятельство служит ориентиром для предварительного выбора формы используемого модифицированного критерия прочности.

Для примера выбраны экспериментальные данные [6] для следующих пород: 1 – талькохлорит, 2 – мрамор-II, 3 – песчаник П-03. Размерность напряжений и параметров A, B – МПа $\cdot 9,82^{-1}$.

Изобразим круги Мора и огибающую к ним, например, для талькохлорита.

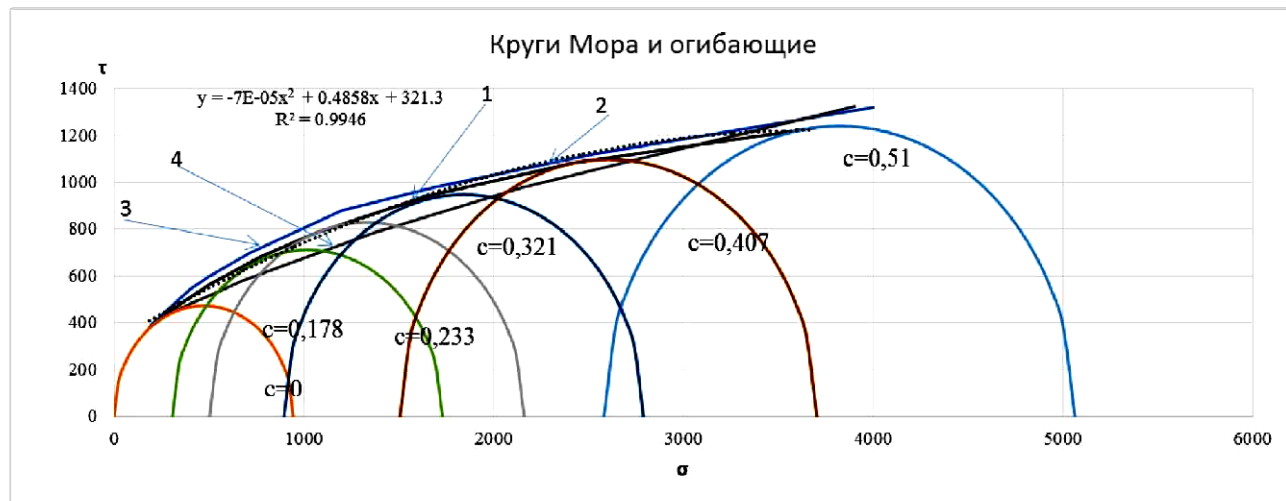


Рис. 1. Талькохлорит.

1 – Расчетная огибающая при использовании модифицированного критерия прочности; 2 – аппроксимация линией тренда огибающей 1 (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9946$); 3 – эмпирическая огибающая [6]; 4 – расчетная огибающая при использовании критерия прочности Хоека – Брауна.

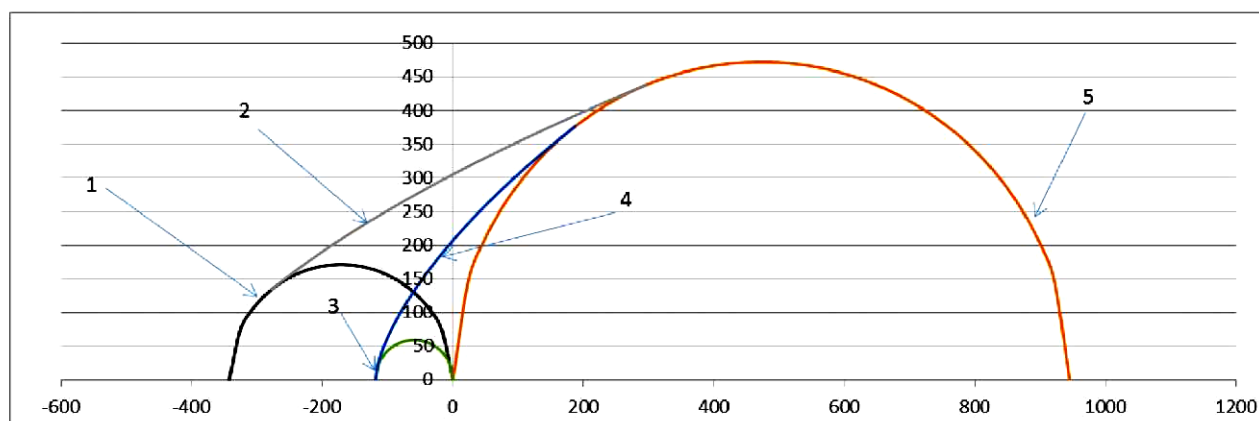


Рис. 2. Талькохлорит. Огибающая к кругам Мора на растяжение и одноосное сжатие.

1 – Расчетный круг на растяжение построенный по критерию Хоека – Брауна (константы определялись по «опорным» точкам трёхосного сжатия); 5 – экспериментальный круг на сжатие, который использован в качестве исходных данных по обоим критериям прочности; 3 - расчетный круг на растяжение, построенный по модифицированному критерию (практически совпадающий с экспериментальным); 2 – огибающая к указанным кругам на растяжение и сжатие согласно критерию Хоека-Брауна; 4 – огибающая к указанным кругам на растяжение и сжатие согласно модифицированному критерию.

Аналогичные примеры представим для мрамора-II и песчаника П-03 [6].

Таблица 1 - Опорные точки» и материальные константы

Порода	«Опорные точки»	A	B	Q	$\sigma_{p(M)}^T$	A_h	B_h	$\sigma_{p(h)}^T$
1	$c = 0; c = 0,51$	-3815,4	3696,5	1	-118,9	2260,4	945	-343,0
	$\sigma_p^s = -130; \sigma_c^s = 945$	-3499,7	3369,7	1		6739,4	945	
2	$c = 0; c = 0,508$	-6154,1	6106,4	1	-47,73	3921,6	765	-143,85
	$\sigma_p^s = -50; \sigma_c^s = 765$	-5877,3	5827,3	1		11654,5	765	
3	$c = 0; c = 0,116; c = 0,227$	-2157,7	1901,5	0,13	-256,21	—	—	—
	$\sigma_p^s = -250; \sigma_c^s = 2810$							
	$c = 0; c = 0,227$	—	—	—	—	32110	2810	-244,05

В представленной таблице параметр B_h вычислялся по двум способам: а именно, по формулам (23) и (29) в соответствии с выбранными опорными точками. Теоретический предел прочности на растяжение $\sigma_{p(M)}^T$ определялся согласно модифицированному критерию прочности; а предел $\sigma_{p(h)}^T$ определялся по формуле (26).

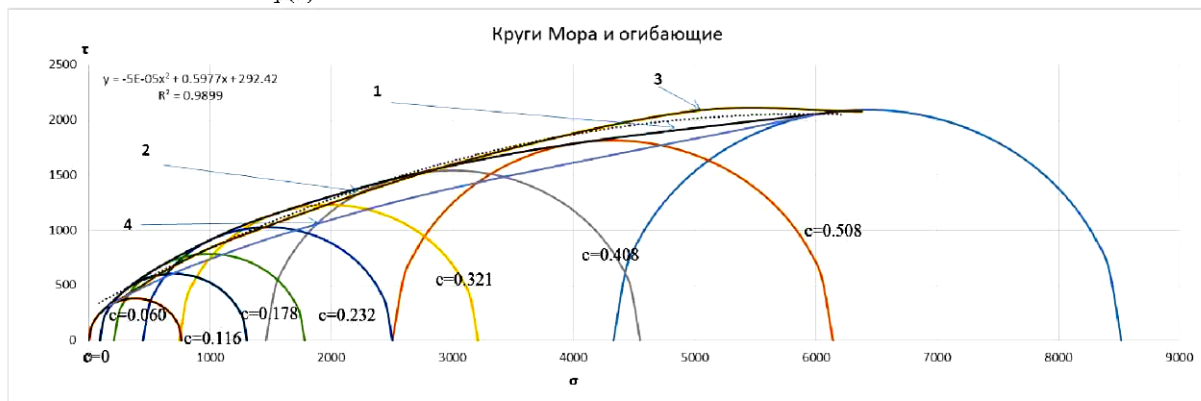


Рис. 3. Мрамор-II.

1 – Расчетная огибающая при использовании модифицированного критерия прочности; 2 – пунктирная линия – это аппроксимация линией тренда огибающей 1 (достоверность аппроксимации линией тренда $R^2 = 0,9899$); 3 – эмпирическая огибающая; 4 – расчетная огибающая при использовании критерия прочности Хоека-Брауна.

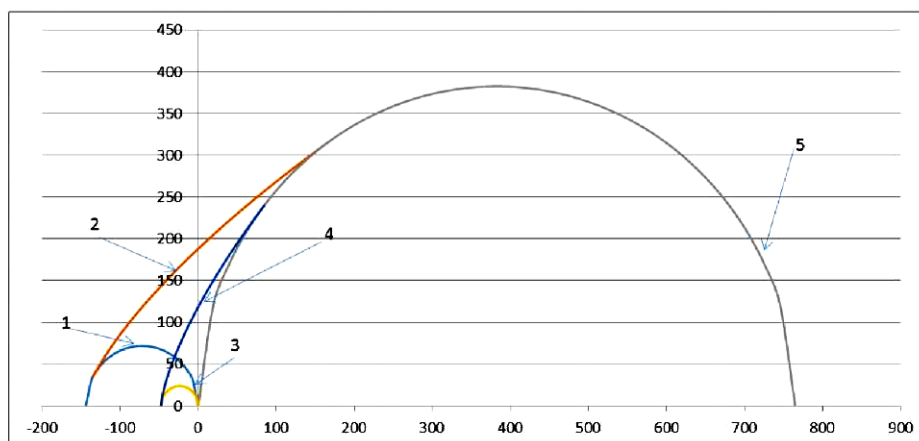


Рис. 4. Мрамор-II. 1 – Расчетный круг на растяжение, построенный по критерию Хоека-Брауна (константы определялись по «опорным» точкам трёхосного сжатия); 2 –

огibaющая к кругам на растяжение и сжатие согласно критерию Хоека-Брауна; 3 – совпадающий с экспериментальным расчетный круг на растяжение, построенный по модифицированному критерию; 4 – огibaющая к кругам на растяжение и сжатие согласно модифицированному критерию; 5 – экспериментальный круг на сжатие.

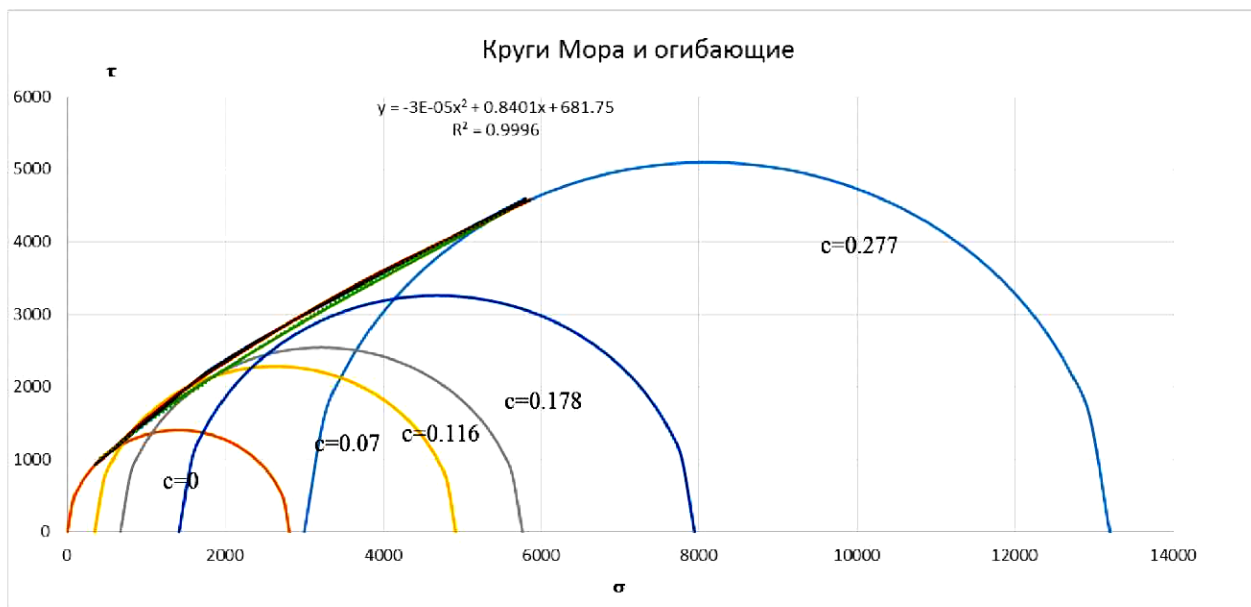


Рис. 5. Круги Мора для Песчаника П-03 при одноосном ($c = 0$) и трехосном сжатии ($c > 0$) и огibaющие к ним (эмпирическая – штрих-пунктирная линия, построенные по двум критериям: сплошная линия – по критерию Хоека-Брауна, пунктирная – по модифицированному критерию)

Как видно из рисунка 5, все огibaющие (эмпирическая и построенные по двум критериям) практически совпадают между собой.

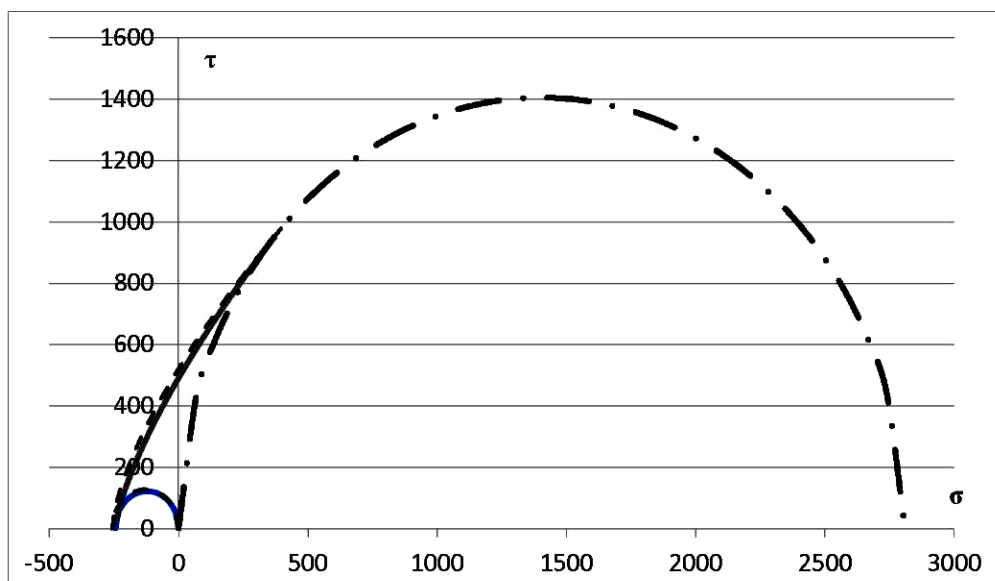


Рис.6. Круги Мора при одноосном растяжении и сжатии и огibaющие к ним для Песчаника П-03. Пунктирные линии – по модифицированному критерию, сплошные линии – по критерию Хоека-Брауна, штрих-пунктирная линия – круг на одноосное сжатие.

Как видно из рис.6, для Песчаника П-03 расчетные (по обоим рассматриваемым критериям) и экспериментальные значения пределов прочности на растяжение близки между собой, а огибающие к кругам на растяжение и сжатие, построенные по этим критериям, также практически совпадают.

Заключение. Эмпирический критерий Хоека-Брауна адекватно отображает пределы прочности при трехосном сжатии в случаях, когда параметр вида напряженного состояния (σ) изменяется в интервале $\sigma \in [0; 0,25]$. В случаях, когда $\sigma > 0,25$, этот критерий не отображает в достаточной мере экспериментальные данные, что продемонстрировано выше на примере Талькохлорита и Мрамора – II. В этих случаях предпочтение следует отдавать модифицированному критерию.

Из установленного различия уравнений для огибающих в области их построения (от растяжения до одноосного сжатия и далее при объемном сжатии) вытекает важный вывод. А именно: при экспериментальном построении огибающей к кругам Мора, включая одноосное растяжение не следует стремиться аппроксимировать такую огибающую единой эмпирической зависимостью, начиная от растяжения и экстраполируя её в область сжимающих напряжений. Попытки такой аппроксимации заканчивались, как правило, неудачами. Между тем таких затруднений не возникает при применении изложенной методики построения паспорта прочности горных пород.

Список литературы

1. ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. – Введ. 1988–15–03. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.
2. Погорелов, А.В. Аналитическая геометрия / А. В. Погорелов. - М.: Наука, 1968. - 176 с.
3. Погорелов, А.В. Дифференциальная геометрия. / А.В. Погорелов. - М.: Наука, 1974. - 178 с.
4. Султаналиева, Р.М. Определение прочностных показателей горных пород при одноосном сжатии и растяжении /Р.М. Султаналиева, А.Т. Конушбаева, Ч.Б. Турдубаева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 5. – С. 61-66.
5. Дуйшеналиев, Т.Б.. Уравнение огибающей линии предельных кругов напряжений / Т.Б. Дуйшеналиев, К.Т. Койчуманов. – Бишкек: Илим, 2006. – 130 с.
6. Ставрогин, А.Н. Пластичность горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
7. Mao-hong Yu. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th Century // Appl Mech Rev vol 55, no 3, 2002. – p. 169-218.
8. Литвинский, Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: Монография / Г.Г.Литвинский. –Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
9. Abigail Hackston, and Ernest Rutter. The Mohr–Coulomb criterion for intact rock strength and friction – a re-evaluation and consideration of failure under polyaxial stresses // Solid Earth, 7, 2016 – p. 493-508.
10. Протодяконов, М.М. Методы исследования механических свойств горных пород в условиях объемного напряженного состояния / В кн.: Механические свойства горных пород // М.М.Протодяконов, Е.И. Ильницкая, В.И. Карпов. – М.: Изд-во АН СССР, 1963, С. 38–56.
11. Рычков, Б.А. О прочностных характеристиках горных пород / Б.А.Рычков // Современные проблемы механики сплошных сред. – Бишкек: 2011. – Вып. 13. – С. 310-317.
12. Hoek, E. and Brown, E.T.. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 106(GT9), 1980.- p.1013-1035.
13. Рычков, Б.А. Модифицированный критерий прочности горных пород / Б.А.Рычков, Н.М.Комарцов, И.В. Гончарова, М.А. Кулагина // Известия КГТУ. -, 2023. - №4.