

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СДВИГОВОГО РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

М.М. Алиев¹, З.Ф. Исмагилова¹, Н.Н. Бурмистрова¹

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт,
Альметьевск, Республика Татарстан, Россия, e-mail: nataliyavika@yandex.ru

Аннотация: Исследованы прочность и разрушения многослойных горных пород-сланцев, аргиллитов и др. Критерии, оценивающие состояния прочности и разрушения, разработаны в двух вариантах, как модификация теории Мора. Первый вариант критерия обобщает линейный закон Кулона в виде линейной огибающей предельных кругов Мора, а во втором варианте огибающая принята в виде параболической кривой. Решен ряд задач прочности многослойных пород в различных сложных напряженных состояниях. К многослойным породам относятся горные породы, образованные путем уплотнения чередующихся слоев в период многовекового осадконакопления. Горные породы, имеющие многослойные залегания, встречаются на различных глубинах земной коры, находясь в основном в условиях трехосного неравномерного напряженного состояния. Условия залегания многослойных пород, таких как аргиллиты, сланцы, обуславливают изменчивость их свойств по направлениям. Проектирование подземных сооружений, расположенных в различных породах, имеющих чередующиеся слои, осуществляется с определением местных напряжений, а устойчивое состояние сооружений проверяется с помощью соответствующих критериев прочности.

Ключевые слова: слоистость горных пород, геомеханическая модель, керновый материал, критерии прочности, испытание образцов, степень анизотропии, «бразильский тест», устойчивость скважины.

Для цитирования: Алиев М.М., Исмагилова З.Ф., Бурмистрова Н.Н. Геомеханические модели сдвигового разрушения многослойных горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №8. – С. 52–61. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-52-61.

Geomechanical models of shear fracture of multi-layer rocks

M.M. Aliev¹, Z.F. Ismagilova¹, N.N. Burmistrova¹

¹ Almeteyevst State Oil Institute, Almeteyevsk, Tatarstan, Russia,
e-mail: nataliyavika@yandex.ru

Abstract: The strength and fracture of multi-layer rocks such as shale, clay stone, etc. are studied. The strength and fracture criteria are developed in two variants as a modification of the Mohr theory. The first variant generalizes the linear law of Coulomb in the form of a linear Mohr's envelope, which is assumed as a parabolic curve in the second variant. A series of problems on strength of multi-layer rocks in different stress conditions is solved. The multi-layer rocks are formed in compaction of alternate layers during many-centuries sedimentation. The multi-layer rocks occur at various depths mainly in the conditions of three-axial nonuniform stress state. Occurrence conditions of multi-layer rocks such as shale and clay stone govern

variability of their properties in different directions. Designing of underground structures in alternate-layer rocks involves determination of local stresses, and the stability of the structures is tested using the relevant strength criteria.

Key words: rock stratification, geomechanical model, core, strength criteria, sample testing, degree of anisotropy, Brazilian test, borehole stability.

For citation: Aliev M. M., Ismagilova Z. F., Burmistrova N. N. Geomechanical models of shear fracture of multi-layer rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):52-61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-52-61.

В работе рассматриваются вопросы, связанные с геомеханическими характеристиками многослойных пород, на основе разработанных двух критериев прочности и разрушения. Критерии получены в виде модификации (обобщения) классического критерия прочности Отто Мора. Первый из них имеет линейную зависимость между касательными и нормальными напряжениями на возможных площадках скольжения и является обобщением линейного критерия Кулона-Мора, а второй эту зависимость принимает в квадратичной форме.

Прочностные и другие свойства многослойных пород могут быть сформулированы некоторыми непрерывными функциями координат. В этом случае анизотропию свойств таких пород можно принять упорядоченной, тем самым упростить геомеханическую модель.

Такая модель была предложена в работе [1], где область ее приложения относилась к гражданскому строительству для расчета анизотропных оснований сооружений. Позже она была применена для оценки устойчивости скважин и подземных хранилищ газа в слоистых породах. Сцепление породы принимается переменным значением, которое зависит от направления, а угол внутреннего трения является величиной постоянной. В усложненном варианте, где сцепление и угол внутреннего трения принимаются изменяющимися по направлениям, модель была обобщена критерием прочности Кулона-Мора.

В работе [4] для расчета устойчивости стенок скважин, пробуренных в анизотропных породах, использован линейный критерий Кулона-Мора, записанный для случая выполнения его при сдвиге вдоль напластования и по основной породе.

Другие модели разрушения анизотропных пород предложены в работах [5–8]. В работах [7, 8] рассматривается теория пластичности анизотропной среды на основании принятой математической модели деформирования.

Линейная геомеханическая модель разрушения

Введем некоторый угол ψ (рис. 1), который является углом между нормалью к некоторой площадке и осью x декартовой системы координат. Пусть ось совпадает с направлением наименьшего сопротивления породы, имеющей ортогональную анизотропию.

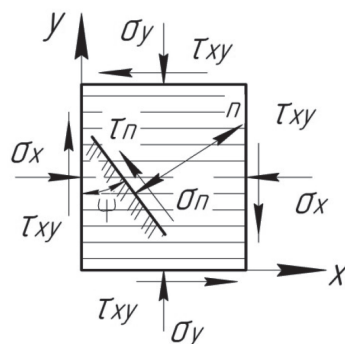


Рис. 1. Схема расположения площадки скольжения в системе координат

Fig. 1. Lay-out of slickenside in coordinate system

Для разработки модели принимаем, что причиной разрушения породы является сдвиг по некоторой площадке с нормалью n , а закономерность Кулона-Мора имеет вид

$$\tau_n = \sigma_n \kappa(\psi) + c(\psi), \quad (1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \tau_n &= 0,5(\sigma_x + \sigma_y) \sin^2 \psi - \tau_{xy} \cos^2 \psi, \\ \sigma_n &= 0,5(\sigma_x + \sigma_y) + 0,5(\sigma_x - \sigma_y) \cos^2 \psi + \tau_{xy} \sin^2 \psi \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

τ_n и σ_n – касательное и нормальное напряжение на площадке сдвига; $c(\psi)$ и $\kappa(\psi)$ – сцепление и тангенс угла внутреннего трения, которые являются функциями угла между нормалью к площадке сдвига и осью x .

При определенном сочетании компонентов напряжения на площадке сдвига выполняется условие

$$(d/d_\psi) [\tau_n + \sigma_n \kappa(\psi) - c(\psi)] = 0. \quad (3)$$

Решая совместно (1), (2) и (3), получим три уравнения для определения σ_x , σ_y и τ_{xy} . Примем

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xy} &= \sigma \pm \Pi_1 \\ \tau_{xy} &= -\Pi_2 \end{aligned} \right\},$$

где

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \{s[\sin(2\psi - \rho) - 0,5\rho' \operatorname{secp} \sin 2\psi] + 0,5s' \cos(2\psi - \rho)\} \chi, \\ \Pi_2 &= \{s[\cos(2\psi - \rho) - 0,5\rho' \operatorname{secp} \sin 2\psi] + 0,5s' \sin(2\psi - \rho)\} \chi, \\ \chi &= \chi(\psi) = \operatorname{cosp}/(1 - 0,5\rho), \quad \sigma = 0,5(\sigma_x + \sigma_y), \quad s = s(\psi) = c(\psi) + \kappa(\psi)\sigma, \\ s' &= s'(\psi) = c'(\psi) + \kappa'(\psi)\sigma. \end{aligned}$$

Возведя в квадрат разность $\sigma_x - \sigma_y$ и τ_{xy} , и суммируя эти результаты, получим критерий прочности (разрушения) слоистой среды с ортогональной анизотропией.

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4(\Pi_1^2 + \Pi_2^2). \quad (4)$$

В случае ярко выраженной слоистости, когда порода сложена из чередующихся тонких слоев сдвиговыми характеристиками, могут быть приняты сцепление и тангенс угла внутреннего трения вдоль (c_{90} , ρ_{90}) и поперек (c_0 , ρ_0) напластова-

Таблица 1

Результаты испытания образцов керн на одноосное (неограниченное) сжатие
Unrestrained uniaxial compression test data of core

Горная порода	σ_1 , МПа									
	угол напластования, β°									
	0°	15°	30°	40°	45°	55°	60°	65°	75°	90°
Кварц филлит Quartz Phyllite [9]	101,64	82,76	59,48	51,72	48,27	45,41	45,51	46,86	51,72	65,6
Углеродистый филлит Carbona Phyllite [9]	79,53	68,96	48,58	44,13	41,37	35,86	37,42	38,51	48,27	65,14
Гнейс А / Gneiss A [9]	39	30	27	28	30	34	38	42	52	68
Мрамор / Marble [9]	77	73	71	71,5	72	74	77	79	83	91

Таблица 2

Результаты одноосного сжатия образцов кернов разных пород
Uniaxial compression test data of different rock core

Горная порода	σ_1 , МПа						
	β°						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Анжуйский сланец Angers Schist [9]	148,33	70,22	36,40	10,34	12,10	25,60	97,22
Пенринский сланец Penrhyn Slate [9]	208,51	126,92	86,12	62,70	43,82	113,32	187,35
Боссьерский сланец Bossier shale [9]	113,55	82,75	45,35	38,36	12,48	27,58	42,34
Гнейс В / Gneiss В [9]	39	23	18	23	36	62	85
Хлористый сланец Chlorite schist [9]	110	62	51	53	68	100	113

ния, а закономерности изменения $c(\psi)$ и $\text{tg}\rho(\psi)$ в самом простом виде

$$c(\psi) = c_0 \cos^2\psi + c_{90} \sin^2\psi, \quad (5)$$

$$\text{tg}\rho(\psi) = \text{tg}\rho_0 \cos^2\psi + \text{tg}\rho_{90} \sin^2\psi, \quad (6)$$

Определение характеристик прочности, входящих в критерий (4)

Для определения характеристик прочности были использованы результаты испытания образцов керна на одноосное (неограниченное) сжатие под различны-

ми углами действия сжимающего напряжения относительно слоев. Эти данные, взятые для некоторых видов горных пород из источника [9], представлены в табл. 1 и табл. 2, на рис. 2 и рис. 3. Результаты подобных испытаний для разных пород приведены в работах [11 – 14].

Результаты, отмеченные в таблицах жирным шрифтом, соответствуют экспериментам. Остальные результаты восстановлены приблизительно из графиков зависимостей, заимствованных из соответствующих источников.

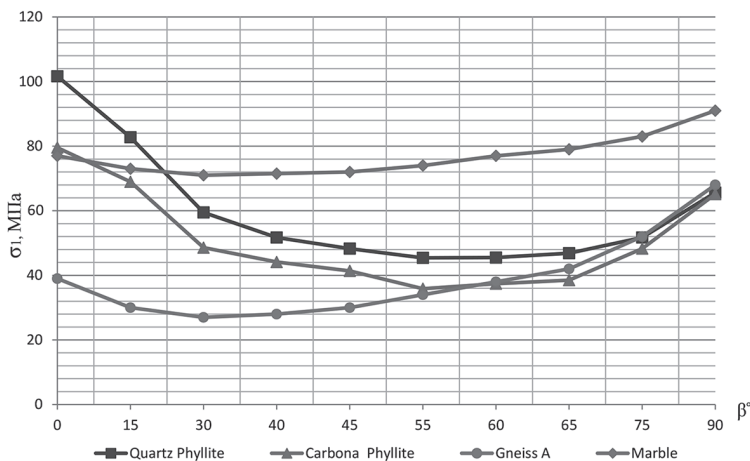


Рис. 2. График зависимости между σ_1 и β при одноосном сжатии

Fig. 2. Cross-plot of σ_1 and β in uniaxial compression

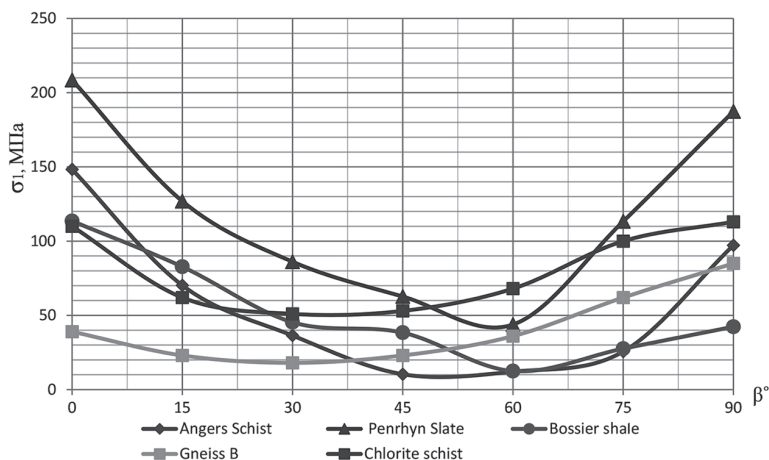


Рис. 3. График зависимости между σ_1 и β при одноосном неограниченном сжатии
 Fig. 3. Cross-plot of σ_1 and β in unrestrained uniaxial compression

В первом приближении предполагаем, что сдвиг происходит по плоскостям, вдоль которых угол внутреннего трения постоянный. При этом критерий прочности, полученный на основании (4), упрощается и при записи в главных напряжениях имеет вид

$$\begin{aligned}
 & (\sigma_1 - \sigma_3)^2 (\cos 2\alpha + k \sin 2\alpha)^2 + \\
 & + [(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\alpha - k \cos 2\alpha) + \\
 & + (c_0 - c_{90})]^2 = \\
 & = [(\sigma_1 + \sigma_2)k + c_0 + c_{90}]^2, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где $k = \tan \rho = \text{const}$; α — угол между σ_1 и осью x ; σ_1 и σ_3 — главные напряжения.

Для определения расчетным путем трех характеристик, входящих в (7), достаточно трех результатов одноосного сжатия образца горной породы.

Например, для кварцевого филлита принимаем $\sigma_1 = 46,86 \text{ МПа}$ ($\beta = 65^\circ$), $\sigma_1 = 45,41 \text{ МПа}$ ($\beta = 55^\circ$), $\sigma_1 = 59,48 \text{ МПа}$ ($\beta = 30^\circ$).

Подставляя эти результаты в (7), получим систему из трех уравнений, совместным решением которых определяется $c_0 = 3,52 \text{ psi}$, $c_{90} = 2,01 \text{ psi}$, $\rho_{90} = 0,49513$. Для определения угла внутреннего трения поперек слоев используются результаты неограниченного сжатия вдоль и поперек слоистости. Угол

внутреннего трения породы поперек слоев определяется усреднением этих результатов. Для данного примера получим $\rho_0 = 0,58$.

С помощью формул (2) — (4) при различных значениях бокового давления σ_3 вычисляется разрушающее напряжение σ_1 . Полученные результаты сведены в табл. 3.

Нелинейная геомеханическая модель разрушения

Линейная зависимость между касательным и нормальным напряжениями на площадках возможного сдвига имеет место при малых интенсивностях шарового тензора.

Реальный паспорт прочности для большинства горных пород имеет нелинейную форму, которая должна быть монотонной кривой, симметричной относительно горизонтальной оси, вдоль которой откладываются нормальные напряжения. При больших всесторонних давлениях предельная линия, отделяющая области прочного сопротивления от областей разрушения, приближается к прямой параллельной горизонтальной оси, а с увеличением шарового тензора может иметь замкнутую форму.

Таблица 3

Зависимость между σ_1 и углом β^0 при различных значениях σ_3
Cross-plot of σ_1 and angle β^0 at different values of σ_3

σ_3 , psi	Данные	β^0				
		0°	30°	45°	60°	90°
0	эксперимент	14,739	8,624	—	—	9,512
	расчет	11,8	8,15	7	6,75	11,8
725	эксперимент	18,077	9,715	—	8,356	12,119
	расчет	14,2	10,3	9,1	8,7	14,2
2176	эксперимент	25,38	18,117	—	14,719	20,364
	расчет	19	14,6	13,3	12,9	19
4351	эксперимент	32,627	25,623	—	—	28,55
	расчет	26,1	21	19,45	19	26,1
7252	эксперимент	39,709	34,064	—	27,008	39,709
	расчет	35,8	29,6	27,7	27,2	35,8
10 153	эксперимент	47,732	40,415	—	—	47,418
	расчет	45,4	38,2	35,9	35,3	45,4

Существующие модификации теории Мора для изотропных горных пород направлены на устранение имеющегося главного недостатка этой теории — неучета влияния среднего главного напряжения. В работах [2, 3] принята параболическая зависимость между касательным и нормальным напряжениями и получены нелинейные паспорта прочности для изотропных горных пород.

Пусть между касательным τ_n и нормальным σ_n напряжениями, действующими на площадке сдвига, имеется параболическая зависимость в виде

$$\tau_n^2 = \sigma_n a + b, \quad (8)$$

где a и b — прочностные характеристики горной породы.

В работе [2] доказано, что для изотропной горной породы, исходя из (8), после определения параметров a и b , можно получить паспорт прочности в следующем виде

$$\tau_n^2 = \frac{1}{2}(\sigma_c - \sigma_p)\sigma_n + \left(\frac{\sigma_c + \sigma_p}{4}\right)^2. \quad (9)$$

Примем, что входящие в (8) параметры прочности в случае многослойной породы являются функциями угла ψ и, согласно (9), определяются в виде

$$a = a(\psi) = 1/2[\sigma_c(\psi) - \sigma_p(\psi)], \quad (10)$$

$$b = b(\psi) = \left[\frac{\sigma_c(\psi) + \sigma_p(\psi)}{4}\right]^2, \quad (11)$$

где

$$\sigma_c(\psi) = \sigma_c(0) \cos^2\psi + \sigma_c(90) \sin^2\psi + [\sigma_c(45) - 0,5(\sigma_c(0) + \sigma_c(90))]\sin^2\psi, \quad (12)$$

$$\sigma_p(\psi) = \sigma_p(0) \cos^2\psi + \sigma_p(90) \sin^2\psi + [\sigma_p(45) - 0,5(\sigma_p(0) + \sigma_p(90))]\sin^2\psi, \quad (13)$$

$\sigma_c(0)$, $\sigma_c(90)$ и $\sigma_c(45)$ — пределы прочности горной породы при сжатии поперек и вдоль слоев и под углом 45° к оси x ; $\sigma_p(0)$, $\sigma_p(90)$ и $\sigma_p(45)$ — те же самые при отрыве.

Допускается, что неограниченное сжатие образца многослойной породы по любым направлениям соответствует сопротивлению породы сдвиговому разрушению. В условиях однородного нап-

раженного состояния это допущение подтверждается экспериментально, так как при сжатии образца одноосно поперек слоев происходит равномерное уплотнение по всему сечению образца вплоть до появления трещин сдвига, направление которых зависит от степени анизотропии, а при сжатии вдоль слоев имеет место потеря устойчивости всех слоев одновременно. Что касается определения предела прочности при отрыве, существуют схемы испытаний анизотропных пород по «бразильскому методу». Исследования в таком направлении приведены в работах [1, 3, 10].

Для получения выражения критерия прочности в компонентах тензора напряжений предполагаем, что в результате наступления предельного напряженного состояния одна часть многослойной породы скользит относительно другой по некоторой площадке.

Тогда направление площадок скольжения можно определить из условия экстремума

$$d/d_{\psi} [\tau_n + \sigma_n a(\psi) - b(\psi)] = 0. \quad (14)$$

В дальнейшем для простоты записи формул примем $a = a(\psi)$, $b = b(\psi)$, $\tau_n = T_1$, $\sigma_n = \sigma + T_2$, где $\sigma = 0,5(\sigma_x + \sigma_y)$.

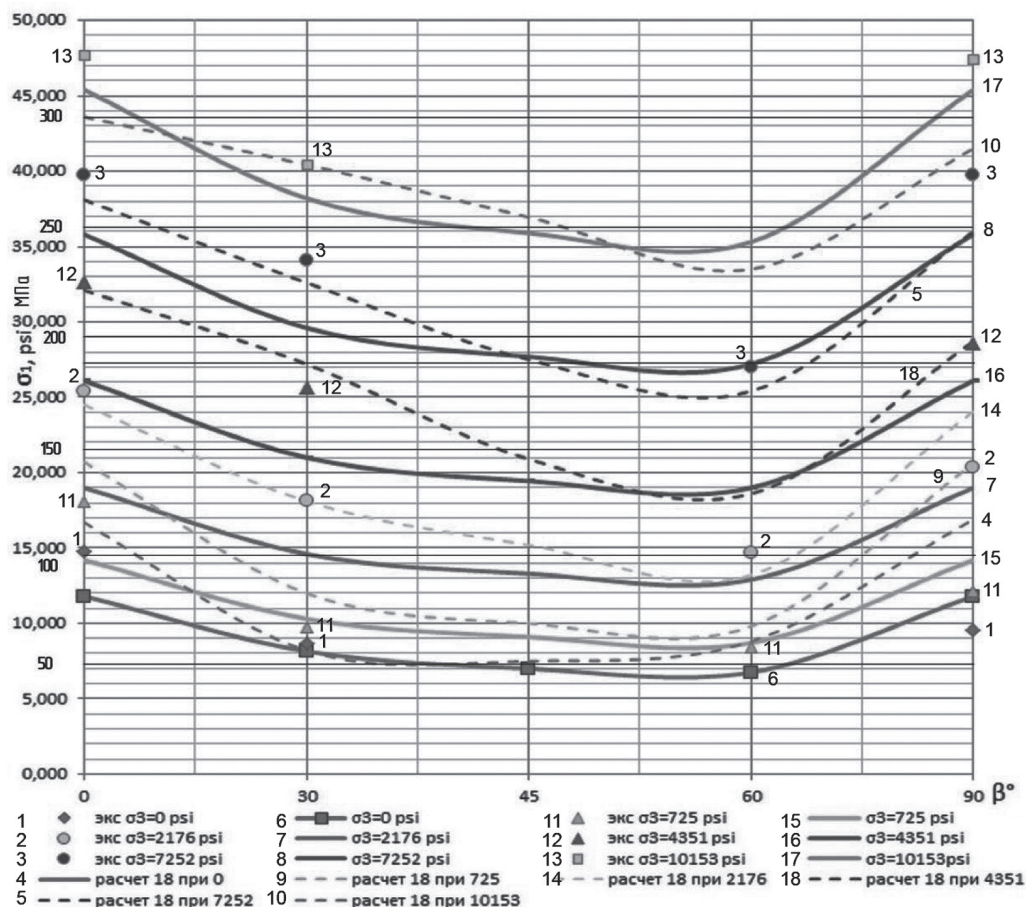


Рис. 4. График зависимости между σ_1 и β при трехосном сжатии

Fig. 4. Cross-plot of σ_1 and β in three-axial compression

Совместное решение (8) и (14) приводит к двум соотношениям, определяющим

$$T_1^2 = (\sigma + T_2)a + b, \quad (15)$$

$$T_2^3 + p_1 T_2^2 + p_2 T_2 + p_3 = 0, \quad (16)$$

где p_1, p_2, p_3 зависят от a, b и ψ .

Для напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ будем иметь соотношения

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma + (T_1 \sin 2\psi + T_2 \cos 2\psi) \\ \sigma_y &= \sigma - (T_1 \sin 2\psi + T_2 \cos 2\psi) \\ \tau_{xy} &= T_1 \cos 2\psi - T_2 \sin 2\psi \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Возводя в квадрат разность $\sigma_x - \sigma_y$, τ_{xy} и суммируя, получим критерий прочности в следующем виде

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4(T_1^2 + T_2^2), \quad (18)$$

где T_1 определяется по (15), а T_2 по (16).

Направление главных нормальных напряжений находим из условия

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{T_1 \cos 2\psi - T_2 \sin 2\psi}{T_1 \sin 2\psi + T_2 \cos 2\psi}, \quad (19)$$

где α — угол между главным напряжением и осью x .

Совместным решением (19) с (15), получим

$$T_2 = z_1 - \sqrt{z_1^2 + (\sigma a + b) \operatorname{ctg}^2(\psi + \alpha)}, \quad (20)$$

где $z_1 = 0,5 \operatorname{actg}^2(\psi + \alpha)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Алиев М. М., Байбунова М. М., Ибрагимов И. И., Исмагилова З. Ф., Лутфуллин А. А. Исследование зависимостей геомеханических характеристик слоистых горных пород от величины гидростатического давления // Society of Petroleum Engineers — SPE Russian Petroleum Technology Conference. — 2017. — SPE-187886-RU.
2. Алиев М. М., Каримова Н. Г., Гилязова С. Р. Нелинейный вариант критерия Кулона-Мора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 7. — С. 226—231.
3. Алиев М. М., Шафиева С. В., Гилязова С. Р., Лутфуллин А. А. Модифицированный нелинейный критерий Мора многослойных пород // Society of Petroleum Engineers — SPE Russian Petroleum Technology Conference. — 2019. — SPE-196905-RU.

На рис. 4 представлено сравнение экспериментальных данных кварцевого филлита с расчетными значениями.

Испытание образцов пород на неограниченное сжатие и одноосное растяжение (с применением «бразильского теста») не составляет трудности независимо от того, является ли порода анизотропной или нет. Оборудованием для таких испытаний может быть выбран обычный пресс. Следует отметить, что использованные исходные данные, взятые из различных источников, не содержат результатов одноосного растяжения (на разрыв), а в критерий разрушения (18) такие характеристики входят. Учитывая это, с целью анализа пригодности критерия (18) для исследуемых многослойных пород, принимаем параметр $n = \sigma_p / \sigma_c = 0,1$, что позволяет достаточно точно определить предел прочности исследуемых пород при одноосном растяжении.

Выводы

1. Исследованы геомеханические задачи на основе разработанных линейного и нелинейного критериев разрушения многослойных пород, обладающих анизотропией прочностных свойств.
2. Прочностные характеристики пород, входящие в критерии, предложено определить испытанием на неограниченное сжатие и на одноосное растяжение методом «бразильского теста».

4. Ашихмин С. Г., Кашников Ю. А., Шустов Д. В., Кухтинский А. Э. Влияние анизотропии упругих и прочностных свойств пород на устойчивость ствола наклонно направленной скважины // Нефтяное хозяйство. — 2018. — № 2. — С. 54–57.
5. Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Сидорин Ю. В., Устинов К. Б. Геомеханическое моделирование процессов в призабойной зоне скважины // Мониторинг. Наука и технологии. — 2016. — № 3. — С. 85–91.
6. Карев В. И., Климов Д. М., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б. Модель разрушения анизотропных горных пород при сложном нагружении // Физическая мезомеханика. — 2016. — № 6. — С. 34–40.
7. Чанышев А. И. О пластичности анизотропных сред // Прикладная механика и техническая физика. — 1984. — № 2. — С. 149–151.
8. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Две характеристические функции поведения образцов сульфидной руды при двухосном сжатии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 6. — С. 30–36.
9. Ambrose J. Failure of anisotropic shales under triaxial stress conditions. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy and the Diploma of Imperial College, Imperial College London Department of Earth Science and Engineering, June 2014.
10. Yang Z., He B., Xie L., et al. Strength and failure modes of shale based on Brazilian test // Rock and Soil Mechanics, 2015. Vol. 12. Pp. 3447–3456.
11. Lü X., Huang M., Andrade J. E. Strength criterion for cross-anisotropic sand under general stress conditions // Acta Geotechnica. 2016. Vol. 11. No 6. Pp. 1339–1350.
12. Kawa M. Reliability analysis of bearing capacity of square footing on soil with strength anisotropy due to layered microstructure // Studia Geotechnica et Mechanica. 2015. Vol. 37. No 4. Pp. 19–28.
13. Amine S., Latifa O., Lahcen B. Adjusted anisotropic strength model for meta-siltstones and prediction of ucs from indirect tensile tests // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Pp. 598–611.
14. Singh M., Samadhiya N. K., Kumar A., Kumar V. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015. Vol. 48. Pp. 1387–1405. 

REFERENCES

1. Aliev M. M., Bayburova M. M., Ibragimov I. I., Ismagilova Z. F., Lutfullin A. A. Study of geomechanical behavior of stratified rocks as a function of confining pressure. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference*. 2017. SPE-187886-RU.
2. Aliev M. M., Karimova N. G., Gilyazova S. R. Nonlinear variant of the Mohr–Coulomb criterion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 7, pp. 226–231. [In Russ].
3. Aliev M. M., Shafieva S. V., Gilyazova S. R., Lutfullin A. A. Modified nonlinear Mohr’s criterion of multi-layer rocks. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference*. 2019. SPE-196905-RU.
4. Ashikhmin S. G., Kashnikov Yu. A., Shustov D. V., Kukhtinskiy A. E. Effect of anisotropy of elasticity and strength of rocks on inclined borehole stability. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2018, no 2, pp. 54–57. [In Russ].
5. Karev V. I., Kovalenko Yu. F., Sidorin Yu. V., Ustinov K. B. Geomechanical modeling of processes in wellbottom zone. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2016, no 3, pp. 85–91. [In Russ].
6. Karev V. I., Klimov D. M., Kovalenko Yu. F., Ustinov K. B. Fracture model of anisotropic rocks under complex loading. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2016, no 6, pp. 34–40. [In Russ].
7. Chanyshv A. I. Plasticity of anisotropic media. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1984, no 2, pp. 149–151. [In Russ].

8. Chanyshv A. I., Abdulin I. M. Two characteristic functions of behavior of sulphide ore samples under biaxial compression. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2018, no 6, pp. 30 – 36. [In Russ].

9. Ambrose J. *Failure of anisotropic shales under triaxial stress conditions*. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy and the Diploma of Imperial College, Imperial College London Department of Earth Science and Engineering, June 2014.

10. Yang Z., He B., Xie L., et al. Strength and failure modes of shale based on Brazilian test. *Rock and Soil Mechanics*, 2015. Vol. 12. Pp. 3447 – 3456.

11. Lü X., Huang M., Andrade J. E. Strength criterion for cross-anisotropic sand under general stress conditions. *Acta Geotechnica*. 2016. Vol. 11. No 6. Pp. 1339 – 1350.

12. Kawa M. Reliability analysis of bearing capacity of square footing on soil with strength anisotropy due to layered microstructure. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2015. Vol. 37. No 4. Pp. 19 – 28.

13. Amine S., Latifa O., Lahcen B. Adjusted anisotropic strength model for meta-siltstones and prediction of ucs from indirect tensile tests. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. Pp. 598 – 611.

14. Singh M., Samadhiya N. K., Kumar A., Kumar V. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015. Vol. 48. Pp. 1387 – 1405.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алиев Мехрали Мирзали оглы¹ — д-р техн. наук, профессор,

Исмагилова Зульфия Фаритовна¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: iiii.iskandar@inbox.ru,

Бурмистрова Наталия Николаевна¹ — старший преподаватель,

e-mail: nataliyavika@yandex.ru,

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт.

Для контактов: Бурмистрова Н.Н., e-mail: nataliyavika@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.M. Aliev¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Z.F. Ismagilova¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: iiii.iskandar@inbox.ru,

N.N. Burmistrova¹, Senior Lecturer,

e-mail: nataliyavika@yandex.ru,

¹ Almet'yevsk State Oil Institute,

423450, Almet'yevsk, Tatarstan, Russia.

Corresponding author: N.N. Burmistrova,

e-mail: nataliyavika@yandex.ru.

Получена редакцией 20.11.2019; получена после рецензии 06.03.2020; принята к печати 20.07.2020.

Received by the editors 20.11.2019; received after the review 06.03.2020; accepted for printing 20.07.2020.

