ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION, MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

Научная статья УДК 622.2 DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-110-118

УНИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД УЧЕТА АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Алиев Мехрали Мирзали оглы, Созонтова Екатерина Андреевна *

Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»

* для корреспонденции: sozontovaea@agni-rt.ru



Информация о статье Поступила: 14 октября 2024 г.

Одобрена после рецензирования: 10 июня 2025 г.

Принята к публикации: 20 июня 2025 г.

Опубликована: 26 июня 2025 г.

Ключевые слова: горные породы, геомеханическая модель, напряженное состояние, критерий прочности, критерий Кулона-Мора.

Аннотация.

Актуальность работы. Анизотропные породы, обладающие различными механическими свойствами в разных направлениях, требуют большого количества экспериментальных образцов для определения их свойств. Ввиду отсутствия необходимого количества кернового материала, извлеченного из скважин, изготовление образцов-близнецов в таком случае практически не представляется возможным. Таким образом, разработка унифицированного метода учета анизотропии горных пород, представленная в настоящей работе, является актуальной задачей.

Цель работы: рассмотреть подход к определению предельного напряженного состояния, приводящего к разрушению анизотропной горной породы, где будут использоваться результаты испытания на одноосное сжатие под различными углами относительно к оси полноразмерного керна. При невозможности получения образцовблизнецов можно уменьшить количество испытаний до минимума (4 испытания).

Методы исследования: с использованием обобщенного критерия Кулона-Мора для анизотропии горных пород определяются прочностные характеристики при сдвиге вдоль и поперек слоев в виде сцепления и угла внутреннего трения. Также из линейного критерия прочности для анизотропных горных пород теоретически возможно вычислить значения предельных напряжений при объемном сжатии под различными углами к направлению слоистости.

Результаты: исходными параметрами при этом принимается пределы прочности, сцепление и угол внутреннего трения в разных направлениях слоистости. Прочностные характеристики при разрыве под различными углами также можно определить расчетным путем, если отсутствуют результаты испытаний, определяемых простым растяжением или бразильским тестом.

Для цитирования: Алиев М. М., Созонтова Е. А. Унифицированный метод учета анизотропии прочности горных пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 110-118. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-110-118, EDN: ETTXNQ

Введение

Одним из сложных вопросов при расчетах в области геомеханики, касающихся анизотропных горных пород, является определение исходных упруго-прочностных параметров. Часто эти параметры определяются при одноосных испытаниях на сжатие или путем сдвига. При этом характеристики породы, обладающие ярко выраженной анизотропией, могут быть определены путем вырезания отдельных образцов под разными углами относительно оси полноразмерного керна. Не составляет труда найти образцы пород, к которым имеется человеческий доступ, например тоннели, шахты подземные И другие сооружения, гле непосредственно можно добыть эти образцы. Из извлеченных путем выбуривания в глубоких скважинах полноразмерных кернов вырезаются стандартные образцы. Значимость образцов из нефтенасыщенной породы очень высока, так как данные керны исследуются методом неразрушающего контроля для изучения петрофизических, акустических, фильтрационных и других свойств. Кроме того, получить керновый материал, обладающий схожими свойствами. сложно, так как отступление от определенной точки глубокой приводит различным скважины К причине характеристикам [15]. По этой необходимых теоретическое определение параметров, исходных таких как предел прочности при трехосных напряженных состояниях, в которых оказывается горная порода, требует исходить из минимального количества керна. Исследования показывают, что механические свойства горных пород могут различаться в пределах одной и той же партии извлеченного керна [10, 13, 14, 16, 17]. Эти свойства варьируются в зависимости от не только минералогического состава, но и от формирования условий пластов пол воздействием тектонических сил, способов изготовления и методов испытания образцов керна в лабораторных условиях, а также от вида напряженного состояния.

Влияние всестороннего давления на твердость и пластичность горных пород изучено в работах [3, 5, 6]. Испытание керна в лабораторных условиях на одноосное и на трехосное сжатие показало, что коэффициент Пуассона для образцов керна, поднятых с глубины 3700 метров [3, 6], почти в 2 раза отличается от этого же коэффициента для образцов-гомологов, расположенных на поверхности. Причиной такого результата авторы считают разупрочнение породы после их извлечения, приводящее к изменению свойств керна.

Исходя из этого, определение реальных механических свойств горных пород с относительно высокой точностью не всегда оправдано и не всегда возможно. Однако неучет таких свойств, как ярко-выраженная многослойность с сопровождающейся анизотропией, в большинстве случаев приводит к искажению результатов при проектировании гидроразрыва пласта в слоистых сланцевых породах, таких как аргилиты, и при обеспечении устойчивости стенок скважин, пробуренных в таких породах.

В работе [11] впервые была предложена и применена упрощенная модель для оценки устойчивости мультислойных оснований сооружений, с допущением переменности сцепления породы по направлениям при постоянном угле внутреннего трения.

В ходе дальнейшей работы был предложен более сложный вариант сдвигового разрушения анизотропной породы в виде модификации критерия Кулона-Мора, прочностные характеристики, сцепление и угол внутреннего трения, которые принимались непрерывными функциями направления [12].

Существуют различные схемы разрушения анизотропных пород, среди которых исследования Ramamurthy T. [8, 9], обобщенный критерий разрушения Hoek E. и Brown E.T.[2].

Также известны другие модели разрушения анизотропных горных пород, информацию о которых можно найти в работе [4].

Методы

В данной статье рассматривается подход к определению предельного напряженного состояния, приводящий к разрушению горной породы при минимальном количестве исходных параметров. В таком случае для горных пород экспериментально определяются пределы прочности при сдвиге в виде сцепления и угла внутреннего трения в разных направлениях или же предел прочности на одноосное сжатие в разных направлениях. Если известны сдвиговые характеристики вдоль и поперек оси образца, то исследования позволяют построить графики и определить значения предельных напряжений, которые определяются при боковых давлениях без проведения трехосных испытаний.

В данной статье используется нелинейный критерий разрушения Алиева-Гениева [12], который записан для условий плоской деформации, и проверяется пригодность этих критериев для различных случаев предельных напряженных состояний анизотропных горных пород.

Преобразование критерия [12] приводит к следующему выражению

 $\begin{aligned} & (\sigma_1 - \sigma_3)^2 a_1 = 4[c^2(\psi) + a_6(\sigma_1 + \sigma_3) + \\ & +k^2(\psi)0,25(\sigma_1 + \sigma_3)^2]a_2 - [a_3 + a_40,25(\sigma_1 + \\ & \sigma_3)^2] + \{[c'(\psi)^2] + a_5(\sigma_1 + \sigma_3) + \\ & [k'(\psi)]^20,25(\sigma_1 + \sigma_3)^2\}, \end{aligned} (1) \\ & z \partial e \ a_1 = [1 - 0,5k(\psi)cos^2\rho(\psi)]^2sec^2\rho(\psi), \\ & a_2 = 1 - k(\psi)cos^2\rho(\psi)(1 - 0,25k(\psi)), \end{aligned}$

сл

 $\begin{array}{ll} a_3 = c(\psi)c'(\psi)k(\psi)sin\rho(\psi), & a_4 = \\ k(\psi)k'(\psi)k(\psi)sin2\rho(\psi), a_5 = 2c'(\psi)k'(\psi)0,5, \\ a_6 = 2c(\psi)k(\psi)0,5 & ; & tg\rho(\psi) = tg\rho_0cos^2\psi + \\ tg\rho_{90}sin^2\psi; \end{array}$

 $c(\psi) = c_0 cos^2 \psi + c_{90} sin^2 \psi.$ $k = k(\psi) = tg\rho(\psi); c_0, c_{90}, -$ сцепление поперек и вдоль слоистости;

*ρ*₀, *ρ*₉₀ –угол внутреннего трения поперек и вдоль слоистости;

 σ_{I}, σ_{3} – максимальное и минимальное значение главных нормальных напряжений.

Пусть $\sigma_1 = \sigma_c(\psi)$, $\sigma_3 = 0$, где $\sigma_c(\psi)$ – предел прочности породы при одноосном сжатии. Тогда из (1) получим квадратное уравнение для определения $\sigma_c(\psi)$ в виде

$$\begin{aligned} \sigma_c^2(\psi) &= \frac{1}{a_1} (4[c^2(\psi) + \sigma_c a_6 + 0.25\sigma_c^2 k^2(\psi)]a_2 - [a_3 + a_4 0.25\sigma_c^2] + \\ \{[c'(\psi)]^2] - \sigma_c a_5 + [k'(\psi)]^2 0.25\sigma_c^2\}) &= 0 \quad (2) \\ \sigma_c^2(\psi)b_1 - \sigma_c(\psi)b_2 - b_3 &= 0, \quad (3) \\ \text{где } b_1 &= \frac{1}{a_1} (1 - k^2(\psi)a_2 + a_4 - k'(\psi)); \\ b_2 &= a_6 a_2 - a_5; \\ b_3 &= 4c^2(\psi)a_2 + a_3 - [c'(\psi)]^2. \end{aligned}$$

Аналогично можно получить значение $\sigma_3 = -\sigma_p(\psi)$, где $\sigma_p(\psi)$ – предел прочности породы при одноосном растяжении.

Результаты исследования

Для определение четырех параметров: c_0 , c_{90} , ρ_{0} , ρ_{90} достаточно провести испытания на одноосное сжатие для четырех образцов, выбуренных под разными углами относительно оси полноразмерного керна.

На Рис. 1 показан пример наклона образца под углом α =45⁰, который позволяет получить значения нормального и касательного напряжения в зависимости от разрушающего



$$\tau_n = \frac{1}{2}\sigma_1 \sin 2\alpha = 0.5\sigma_1 \qquad (4)$$

$$\sigma_n = \sigma_1 cos^2 \alpha = 0.5\sigma_1 \tag{5}$$

Согласно линейному закону Кулона определяем:

$$c_{90} = \tau_{n1} - \sigma_{n1}k_{90}; \qquad (6)$$

$$k_{90} = \frac{\tau_{n1} - \tau_{n2}}{\sigma_{n1} - \sigma_{n2}}, \qquad (7)$$

 $\pi_{90} - \frac{\sigma_{n1} - \sigma_{n2}}{\sigma_{n1} - \sigma_{n2}}$ (7) Таким же образом можно получить эти характеристики под углами $\alpha = 30^{\circ}$, $\alpha = 60^{\circ}$ и найти усредненное значение характеристик.

В случае $\sigma_3 \neq 0$, сцепление горной породы определяем исходя из следующего уравнения [11], принимая в (1) $k(\psi) = const$.

$$F = m_1^2 + m_2^2 - m_3^2, \qquad (8)$$

где $m_1 = (\sigma_1 - \sigma_3)cos2\alpha + k_{cp}sin2\alpha;$
 $m_2 = (\sigma_1 - \sigma_3)sin2\alpha - k_{cp}cos2\alpha + c_0 - c_{90};$
 $m_3 = (\sigma_1 + \sigma_3)k_{cp} + c_0 + c_{90}.$
 $k_{cp} = tg\rho_0. \qquad (9)$

В качестве примера рассмотрим [7]

едующие исходные данные:

$$\sigma_1(60^\circ) = 21,649 \ kpsi; \ \sigma_3 = 5 \ kpsi; \ \sigma_1(50^\circ)$$

 $= 24,388 \ kpsi; \ \sigma_3 = 5 \ kpsi;$

$$\sigma_1(40^0) = 28,262 \text{ kpsi}; \sigma_3 = 5 \text{ kpsi};$$

 $\sigma_1(30^0) = 32,622 \text{ kpsi}; \sigma_3 = 5 \text{ kpsi}.$

Подставляя данные в формулы (4-8), получаем следующие значения, приведенные в Таблице 1.



Table 1. Calculated values of adhesion and angle of internal friction in bedding direction

·		$\sigma_1(4$	40°)	$\sigma_1(30^0)$		
sd		c ₉₀	ρ90	c ₉₀	ρ90	
5 k	$\sigma_1(60^0)$	3,11	0,42	-	-	
Ш	$\sigma_1(50^0)$	5,15	0,33	7,08	0,187	
σ_3	$\sigma_1(40^0)$	-	-	10,12	0,071	

Таблица 2. Рассчитанные значения сцепления в направлении перпендикулярно напластованию Table 2. Calculated values of adhesion and angle of internal friction in bedding direction

		$\sigma_1(60^0)$	$\sigma_1(50^0)$	$\sigma_1(30^0)$		
= si			c_0			
r_{3}	$\sigma_1(40^0)$	-	10,4	8,7		
്ഗ	$\sigma_1(50^0)$	11,9	-	9,7		

По представленным в Таблице 1 данным найдем среднее значение

с₉₀ = 6,37 *kpsi* и р₉₀=0,252.

Аналогичным способом найдем с₀ при к=0,6.

По представленным в Таблице 2 данным найдем среднее значение с₀=10,18 *kpsi*.

Чтобы определить недостающую характеристику ρ_0 , воспользуемся формулой (9), учитывающей переменность угла внутреннего трения по направлениям, в ходе проведения расчетов получаем $\rho_0 = 0,443$.

Исходными данными для определения характеристик прочности используются полученные при расчетах параметры с₀ = 10,18 kpsi, c_{90} = 6,37 kpsi и $\rho_0 = 0,443, \rho_{90} = 0,252.$

В Таблице 3 представлены зависимости между σ_1 и углом β при различных боковых давлениях, полученные в результате расчетов согласно модели.

На графике (Рис. 2) представлены зависимости напряжения σ_1 от угла β при различных боковых давлениях для Austin Slate по (сплошные линии), где точками отмечены результаты экспериментальных данных [7].

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о сходимости результатов

эксперимента и расчета, составляющей 7,1%. Также желтой линией отражен расчет, полученный при отсутствии бокового давления, данный эксперимент не был отражен в источниках [4, 7] из-за возможной хрупкости образца, что доказывает наличие анизотропии.

Рассмотрим еще один пример, где результатами для определения исходных данных послужили эксперименты из источника [1].

Из имеющихся результатов определим исходные данные для определения характеристик прочности $\sigma_1(30^0) =$ 32,51kpsi; $\sigma_3 = 6$ kpsi;

Таблица 3. Зависимость между σ_1 и углом β при различных значениях σ_3 Table 3. Dependence between σ_1 and angle β for different values of σ_3													
σ3,	Данные		σ ₁ , kpsi										
kpsi		00	100	200	200	100	β° 50°	600	70°	80°	90°		
	D	0	10	20	30	40	30	00	25.07	20.26	50.24		
5	Эксп.	4/,64	44,58	38,28	32,62	28,26	24,38	21,64	25,07	39,30	50,24		
	Расчет	40,3	37,14	32,15	27,2	25,3	24,8	25,07	26,76	30,65	40,41		
10	Эксп.	60,27	52,5	48,95	43,13	36,5	34,25	31,35	37,85	54,09	68,86		
10	Расчет	52,07	48,2	42,17	36,1	33,75	33,14	33,46	35,56	40,3	52,1		
20	Эксп.	85,51	78,55	73,06	63,51	53,47	53,33	53,35	60,18	77,87	95,24		
20	Расчет	75,46	70,34	62,23	53,93	50,66	49,8	50,25	53,14	59,62	75,57		
20	Эксп.	105,5	100,8	92,14	83,24	71,26	68,68	71.29	83,47	98,09	120,9		
30	Расчет	99,2	93,26	82,32	71,76	67,57	66,46	67,04	70,74	78,95	99,31		
4.0	Эксп.	124,16	115	108,6	97,62	86,28	84,52	86,48	99,31	112,1	136		
40	Расчет	123,05	116,04	102,4	89,45	84,45	83,13	83,83	88,33	98,6	123,07		
0	Расчет	28.57	25.94	22	18.42	16.96	16.48	16.7	17.9	20,54	28.7		



ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА $\sigma_1(60^0) = 23,856 \ kpsi; \ \sigma_3 = 6 \ kpsi; \ \sigma_1(0^0) = 52,557 \ kpsi; \ \sigma_3 = 6 \ kpsi.$

По аналогии с предыдущим расчетом по формулам (4-8) были определены следующие характеристики $c_0 = 8 \ kpsi, c_{90} = 5,2 \ kpsi$ и $\rho_0 = 36,9, \rho_{90} = 14,96.$

В Таблице 4 представлены зависимости между σ₁ (*kpsi*) и углом β при различных боковых давлениях, полученные в результате расчетов согласно модели.

Ha графике (Рис. 4) представлены зависимости напряжения σ₁ от угла β при различных боковых давлениях для Penrhyn Slate, определенные по критерию (1). Сплошными линиями обозначены зависимости, исходными данными для которого послужили найденные расчетным путем ИЗ заимствованных экспериментов [1], пунктирными линиями показаны зависимости с исходными данными, тпринятыми по теории Джагера [4].

Таблица 4. Зависимость между σ_1 и углом β при различных значениях σ_3

Table 4. Depen	dence between	σ_1 and angle	β for different	values of σ_3
----------------	---------------	----------------------	-----------------	----------------------

σ2.	Данные				σı, kpsi					
kpsi		β°								
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
0	Эксперимент	30,235	18,404	12,488	9,092	6,354	16,432	22,834		
0	Расчет	30,46	26,6	15,77	13,75	13,78	16,8	30,5		
1	Эксперимент	36,383	24,443	18,308	14,803	13,379	21,485	29,373		
1	Расчет	34,28	30,2	18,1	15,47	15,51	19,26	34,33		
2	Эксперимент	45,271	31,139	25,443	20,404	18,542	29,496	40,013		
2	Расчет	38,15	33,6	19,99	17,19	17,24	21,43	38,22		
6	Эксперимент	52,557	37,44	32,51	25,28	23,856	37,002	51,462		
0	Расчет	53,53	48	27,75	24,02	24,15	30,39	53,66		
0	Эксперимент	63,321	43,931	37,139	33,415	27,171	41,193	55,105		
0	Расчет	61,27	55,35	31,75	27,46	27,61	35,16	61,41		
10	Эксперимент	77,919	50,751	40,125	36,948	-	50,203	70,908		
10	Расчет	69,08	62,39	35,48	30,9	31,07	39,82	69,12		



GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION, MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

Таблица 5. Зависимость между σ_1 и углом β при различных значениях σ_3 Table 5. Relationship between σ_1 and angle β for different values of σ_3

σ3,	Данные	σ1, kpsi							
kpsi		0°	15°	30°	β° 45°	60°	75°	90°	
0	Расчет по [4]	25,55	22,38	14,58	13,04	13,07	15,53	25,57	
	Расчет	30,46	26,6	15,77	13,75	13,78	16,8	30,5	
	Расчет по [4]	29,05	25,47	16,53	14,78	14,78	17,6	29,08	
1	Расчет	34,28	30,2	18,1	15,47	15,51	19,26	34,33	
2	Расчет по [4]	32,56	29,1	18,5	16,42	16,49	19,7	32,74	
2	Расчет	38,15	33,6	19,99	17,19	17,24	21,43	38,22	
6	Расчет по [4]	46,76	41,81	26,16	23,22	23,32	28,22	46,88	
0	Расчет	53,53	48	27,75	24,02	24,15	30,39	53,66	
0	Расчет по [4]	53,83	48,19	30,1	26,69	26,74	32,93	53,96	
8	Расчет	61,27	55,35	31,75	27,46	27,61	35,16	61,41	
10	Расчет по [4]	60,9	54,88	34	30,09	30,16	37,22	61	
	Расчет	69,08	62,39	35,48	30,9	31,07	39,82	69,12	



ис. 4. График зависимости межоу σ_1 и углом β при различных ооковых оавлениях Fig. 4. Graph of the relationship between σ_1 and angle β at various lateral pressures

Исходя из Рис. 4, можно сделать вывод, что результаты эксперимента для Penrhyn Slate по источнику [1] и расчеты, произведенные по теории (1) с определением исходных данных, полученных математическим путем по формулам (4-8), имеют большую сходимость, чем расчеты с

заимствованными исходными данными по теории Джагера [4, стр. 250].

Выводы

Исходя из полученных результатов, видно, что рассмотренный подход при минимальном количестве исходных параметров возможно применять для определения предельного напряженного состояния, приводящего к разрушению горной породы. В некоторых случаях возможно получить результаты для хрупких пород при отсутствии экспериментов на одноосное сжатие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Attewell P. B., Sandford, M. R. Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock. Part 1. Experimental and mechanical interpretation // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1974. Vol. 11. Pp. 423–430.

2. Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update // In: Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto. 1988. Pp. 31–38.

3. Jaak J. K. Daemen, Lumin Ma, Guohua Zhao. Long-Term Mechanical Behavior of Yucca Mountain Tuff and its Variability // Final Technical Report for Task ORD-FY04-021. DOE Cooperative Agreement DE-FC28-04RW12232. Department of Mining Engineering. University of Nevada, Reno. March 2006

4. Jasmin Ambrose. 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. 265 p.

5. Havens J. Mechanical properties of the bakken formation. A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial ful_llment of the requirements for the degree of Master of Science (Geophysics). 2017.

6. M.H.B. Nasseri [et al.] Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists // International Journal of Rock Mechanics&Mining Sciences. 2003. № 40. Pp. 3–23.

7. McLamore R. T., Gray K. E. A strength criterion for anisotropic rocks based upon experimental observations // SPE Annual Meeting of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 19–23 February 1967. Los Angeles, paper SPE. 1721.

8. Ramamurthy T. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2001. Vol. 38. Issue 5.

Pp. 683–697.

9. Ramamurthy T. Strength and modulus response of anisotropic rocks. Comprehensive rock engineering // Pergamon Press, Oxford. 1993. Vol. 1. Pp. 313–329.

10. Wang Z., Qi C., Ban L., Yu H., Wang H., Fu Z. Modified Hoek- Brown failure criterion for anisotropic intact rock under high confining pressures // Bull. Eng. Geol. Environ. 2022. № 81. P. 333. DOI: 10.1007/s10064-022-02831-8.

11. Алиев М. М. Предельное равновесие анизотропного несимметричного сыпучего клина, нагруженного двухсторонним давлением // Строительная механика и расчет сооружений. 1984. № 4. С. 27–29.

12. Алиев М. М., Гениев Г. А. Расчет несущей способности анизотропных оснований сооружений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2001. № 6. С. 18–22.

13. 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.

14. Алиев М. М., Исмагилова З. Ф., Ульшина К. Ф. Определение прочностных характеристик анизотропных пород при сдвиге по результатам трехосного сжатия // Нефтепромысловое дело. 2016. № 9. С. 24–27.

15. Гирфанов И. И. Исследование напряженно-деформированного состояния в процессе разработки нефтяных месторождений Республики Татарстан: дис. ... канд. техн. наук. Бугульма. 2023. 172 с.

16. Карев В. И., Климов Д. М., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б. О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния // Изв. РАН. МТТ. 2016. № 5. С. 15–21.

17. Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б. Моделирование деформирования и разрушения анизотропных пород вблизи горизонтальной скважины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3. С.12–21.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Алиев Мехрали Мирзали оглы – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти» (423450, Россия, Республика Татарстан, Альметьевск, ул. Советская, д. 186а), e-mail: mmaliev@rambler.ru

Созонтова Екатерина Андреевна – старший преподаватель, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти» (423450, Россия, Республика Татарстан, Альметьевск, ул. Советская, д. 186а), e-mail: sozontovaea@agni-rt.ru

Заявленный вклад авторов:

Алиев Мехрали Мирзали оглы – постановка исследовательской задачи, нбаучный менеджмент, выводы. Созонтова Екатерина Андреевна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

UNIFIED METHOD FOR ACCOUNTING THE ANISOTROPY OF ROCK STRENGTH

Mehrali M. Aliev, Ekaterina A. Sozontova

Almetyevsk State Technological University «Petroleum Higher School»

* for correspondence: sozontovaea@agni-rt.ru



Article info Received: 14 October 2024

Accepted for publication: 10 June 2025

Accepted: 20 June 2025

Published: 26 June 2025

Keywords: layering, anisotropy, rocks, geomechanical model, stress state, strength criterion, Coulomb-Mohr criterion.

Abstract.

Relevance of the work. Anisotropic rocks, which have different mechanical properties in different directions, require a large number of experimental samples to determine their properties. The absence of the required amount of core material extracted from wells and the production of twin samples in this case is practically impossible. Thus, the development of a unified method for taking into account the anisotropy of rocks proposed by the approach in this work is an urgent task.

Purpose of the work: to consider an approach to determining the limiting stress state leading to the destruction of anisotropic rock, where the results of uniaxial compression tests at various angles relative to the axis of a full-size core will be used. If it is not possible to obtain twin samples, the number of tests can be reduced to a minimum (4 tests).

Research methods: using the generalized Coulomb-Mohr criterion for the anisotropy of rocks, the strength characteristics during shear along and across layers in the form of adhesion and the angle of internal friction are determined. Also, from the linear strength criterion for anisotropic rocks, it is theoretically possible to calculate the values of the ultimate stresses during volumetric compression at various angles to the direction of bedding.

Results: the initial parameters are taken to be the strength limits, adhesion and angle of internal friction in different directions of layering. Tensile strength at various angles can also be determined by calculation if test results determined by simple tensile or Brazilian test are not available.

For citation: Aliev M.M., Sozontova E.A. Unified method for taking into account the anisotropy of rock strength. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):110-118. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-110-118, EDN: ETTXNQ

REFERENCES

1. Attewell P.B., Sandford, M.R. Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock – Part 1. Experimental and mechanical interpretation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1974; 11:423–430.

2. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update. *In: Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium.* Toronto. 1988. Pp. 31–38.

3. Jaak J.K. Daemen, Lumin Ma, Guohua Zhao. Long-Term Mechanical Behavior of Yucca Mountain Tuff and its Variability. *Final Technical Report for Task ORD-FY04-021. DOE Cooperative Agreement DE-FC28-04RW12232.* Department of Mining Engineering. University of Nevada, Reno. March 2006.

4. Jasmin Ambrose. Failure of Anisotropic Shales under Triaxial Stress Conditions. *A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of*

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА Philosophy and the Diploma of Imperial College. Imperial College London Department of Earth Science and Engineering, June 2014. 265 p.

5. Jesse Havens. Mechanical properties of the bakken formation. A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial ful llment of the requirements for the degree of Master of Science (Geophysics). 2017.

6. M.H.B. Nasseri [et al.] Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. International Journal of Rock Mechanics&Mining Sciences. 2003; 40:3–23.

7. McLamore R.T., Gray, K.E. 1967. A strength criterion for anisotropic rocks based upon experimental observations. SPE Annual Meeting of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. 19-23 February. 1967 Los Angeles, paper SPE 1721.

8. Ramamurthy T. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2001; 38(5)683-697.

9. Ramamurthy T. Strength and modulus response of anisotropic rocks. Comprehensive rock engineering. Pergamon Press, Oxford. 1993; 1:313-329.

10. Wang Z., Qi C., Ban L., Yu H., Wang H., Fu Z. Modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock under high confining pressures. Bull. Eng. Geol. Environ. 2022; 81:333. DOI: 10.1007/s10064-022-02831-8.11.

2025 The Authors. This is an

11. Aliev M.M. Limit equilibrium of an anisotropic asymmetric granular wedge loaded with double-sided pressure. Structural mechanics and calculation of structures. 1984; 4:27-29.

12. Aliev M.M., Geniev G.A. Calculation of the bearing capacity of anisotropic foundations of structures. News of higher educational institutions. Construction. 2001; 6:18-22.

13. Aliev M.M., Ismagilova Z.F., Burmistrova N.N. Geomechanical models of shear failure of multilayer rocks. Mining Information and Analytical Bulletin. 2020; 8:52-61. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-52-61.

14. Aliev M.M., Ismagilova Z.F., Ulshina K.F. Determination of the strength characteristics of anisotropic rocks during shear based on the results of triaxial compression. Oilfield Business. 2016; 9:24-27.

15. Girfanov I.I. Study of the stress-strain state in the process of developing oil fields in the Republic of Tatarstan: dis. ...candidate of technical sciences. Bugulma. 2023. 172 p.

16. Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. On the destruction of sedimentary rocks under conditions of a complex triaxial stress state. Izv. RAS. MTT. 2016; 5:15-21.

17. Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Modeling of deformation and destruction of anisotropic rocks near a horizontal well. Physico-technical problems of mining minerals. 2017; 312-21.

O CCBYopen access article under the license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Mehrali M.Aliev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Almetyevsk State Technological University «Petroleum Higher School»(423450, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, Sovetskaya St., 186a), e-mail: mmaliev@rambler.ru

Ekaterina A. Sozontova - senior lecturer, Almetyevsk State Technological University «Petroleum Higher School» (423450, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, Sovetskaya St., 186a), e-mail: sozontovaea@agnirt.ru

Contribution of the authors:

Mehrali M.Aliev – formulation of the research problem, scientific management, conclusions. Ekaterina A. Sozontova - review of relevant literature, data collection and analysis, study conceptualization,

conclusions, writing.

All authors have read and approved the final manuscript.

