ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(4):44-57
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.023.25:539.32 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ДАГИНСКОГО ГОРИЗОНТА ШЕЛЬФА САХАЛИНА

В.С. Жуков
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Россия,
e-mail: VZhukov@vniigaz.gazprom.ru

Аннотация: При освоении месторождений Сахалинского шельфа актуальной задачей является оценка деформационно-прочностных и упругих свойств горных пород, величины которых необходимо знать как при строительстве скважин, так и при разработке месторождений УВ. Объектом исследований при определении упругих параметров и прочности на сжатие и растяжение были сухие цилиндрические образцы песчаника с пористостью от 10% до 26,5%, изготовленные из керна дагинского горизонта пермского возраста, отобранного из скважин, пробуренных на восточном шельфе Сахалина. Определения пределов прочности на сжатие и растяжение, модуля Юнга (упругости), коэффициента Пуассона и паспортов прочности образцов горных пород проводились в соответствии с ГОСТами. Выявлена прямая линейная зависимость предела прочности на сжатие от пористости образцов, которую можно рекомендовать для оценки величины прочности в зависимости от пористости образцов. Зависимость предела прочности на сжатие от скорости продольной волны также оказалась информативной и позволила получить оценку величины прочности в зависимости от скорости продольной волны. В то же время сопоставление предела прочности на растяжение и пористости исследованных образцов не позволило получить приемлемой зависимости между этими параметрами. По результатам стандартных испытаний получены оценки средних величин прочностных и упругих свойств сухих образцов песчаника дагинского горизонта в атмосферных условиях: прочность на сжатие 27,2 МПа; прочность на растяжение 5,77 МПа; модуль Юнга (статический/динамический) 6,13/6,37 ГПа; коэффициент Пуассона (статический/динамический) 0,225/0,237; сцепление (когезия) 7,00 МПа; угол разрушения (внутреннего трения) 36,3 °. Построены несколько диаграмм с кругами Мора: по минимальным и максимальным величинам и по средним значениям пределов прочности на сжатие и растяжение. Огибающие кругов Мора позволили оценить значения нормальных и касательных напряжений при переходе от упругого к пластичному деформированию и рассчитать сцепление и угол разрушения. Для диапазона эффективных сжимающих напряжений 40—50 МПа, близких к действующим в пластовых условиях, показано, что угол внутреннего трения равен 6,8 °, а сцепление 17,77 МПа.

Ключевые слова: горная порода, песчаник, пористость, скорости упругих волн, прочность на сжатие, прочность на растяжение, упругие свойства, паспорт прочности, круги Мора.

Для цитирования: *Жуков В.С.* Оценка прочностных и упругих свойств горных пород дагинского горизонта шельфа Сахалина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 44–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57.

© В.С. Жуков. 2020.

Estimating the strength and elasticity of rocks in the Dagi formation on the Sakhalin shelf

V.S. Zhukov

«Gazprom VNIIGAZ» Ltd., Moscow, Russia, e-mail: VZhukov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract: Resource development on the Sakhalin shelf requires estimating the deformation–strength and elastic characteristics of rocks as these values are needed both in well construction and in hydrocarbon reservoir engineering. The test subjects in determining the elasticity parameters and strength in compression and tension were dry cylindrical sandstone specimens with porosity from 10 to 26.5%. The specimens were made of core sampled from the Permian-age Dagi formation using wells drilled on the eastern shelf of the Sakhalin Island. The tensile/compressive strengths, Young's modulus (elasticity), Poisson's ratio and the failure envelopes of rocks were determined in compliance with the state standards. The direct linear dependence revealed between the ultimate compression strength and porosity of the specimens can be recommended for estimating the strength of rocks depending on their porosity. The relationship between the ultimate compression strength and P-wave velocity also appeared to be informative and allowed the strength evaluation as function of the compressional velocity. On the other hand, the correlation of the ultimate tension strength and porosity of the test specimens provided no admissible dependence between these parameters. The standard tests yielded average estimations of strength and elastic characteristics for dry specimens of the Dagi formation sandstone in atmospheric conditions: compressive strength 27.2 MPa; tensile strength 5.77 MPa; Young's modulus (statics/dynamics) 6.13/6.37 GPa; Poisson's ratio (statics/dynamics) 0.225/0.237; cohesion 7.00 MPa; angle of rupture (internal friction) 36.3 deg. A few Mohr's circles are plotted by the minimal, maximal and average values of the ultimate strength in compression and tension. The Mohr's envelopes allowed evaluating the normal and shear stresses in the transition from the elastic to plastic deformation and made it possible to calculation the cohesion and angle of rupture. For the range of the effective compressive stresses from 40 to 50 MPa, close to the formation conditions, it is shown that the internal friction angle is 6.8 deg and the cohesion is 17.77 MPa.

Key words: rock, sandstone, porosity, compressional velocities, compression strength tension strength, elastic characteristics, failure envelope, Mohr's circles.

For citation: Zhukov V. S. Estimating the strength and elasticity of rocks in the Dagi formation on the Sakhalin shelf. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(4):44-57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57.

Введение

В процессе освоения новых месторождений Сахалинского шельфа возникает необходимость оценки деформационно-прочностных свойств горных пород, величины которых необходимо знать как при строительстве скважин, так и при разработке месторождений УВ для предупреждения негативных геодинамических последствий [1]. Актуальной задачей при этом является получение фактических экспериментальных данных о прочности пород, слагающих коллектор. Основными параметрами, характеризующими способность горной породы деформироваться при увеличении нагрузки, являются упругие модули, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона [2 — 7]. Важными прочностными характеристиками являются пределы прочности породы на сжатие и растяжение, используемые при построении геомеханических моделей месторождений [3, 4]. Данная работа посвящена анализу

результатов экспериментальных исследований упругих и прочностных свойств горных пород.

Аппаратура и методика исследований

Испытания образцов для определения предела прочности на сжатие, модуля Юнга, коэффициента Пуассона и предела прочности при растяжении проводились на модернизированном испытательном прессе ИП-6011-500-1 с наибольшей нагрузкой 500 кН. С помощью цифровых датчиков с ценой деления 0,001 мм проводились измерения поперечной и продольной деформации образцов. Определения предела прочности при одноосном сжатии, модуля Юнга (упругости), коэффициента Пуассона образцов горных пород проводились в соответствии ГОСТ 28985-91 и ГОСТ 21153.2-84. Измерения поперечной деформации образцов проводились с помощью индикаторов часового типа, расположенных горизонтально под углом 90 ° по окружности вокруг образцов напротив их средней части перпендикулярно образующей цилиндра. Измерения продольной деформации образцов проводились с помощью датчиков перемещения расположенных вертикально по окружности через 90 ° вокруг образцов на одинаковом удалении от направления приложения нагрузки, проходящей по оси испытуемых цилиндрических образцов горных пород. Деформации регистрировали ежесекундно в процессе роста нагрузки при сжатии образца вплоть до его разрушения.

Образцы сухих горных пород (песчаники) для испытаний при определении прочности на сжатие, прочности на растяжение были изготовлены из отобранного в скважинах керна дагинского горизонта пермского возраста. Они имели форму цилиндров диаметром 30 мм и длиной 30 мм. Испытания на сжатие проводились в атмосферных условиях с регистрацией приложенного осевого напряжения и продольной и поперечной деформации образцов горных пород (рис. 1). На зависимости «напря-

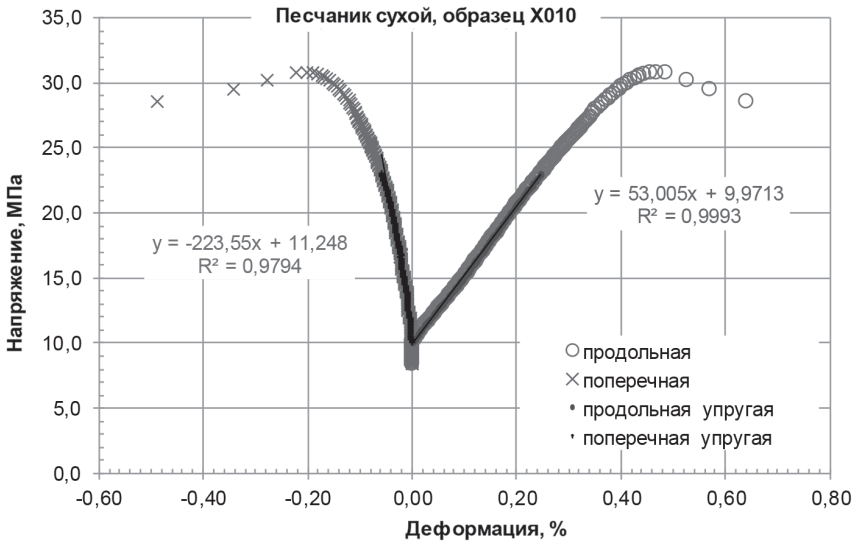


Рис. 1. Пример диаграммы напряжение-деформация при определении предела прочности и статических упругих модулей

Fig. 1. Example of stress–strain curve for determining ultimate strength and static elastic moduli

жение-деформация» выделялся прямолинейный участок, характеризующий упругое деформирование образца, и по нему, в соответствии с ГОСТ 28985-91, вычислялись упругие статические модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Нарушение прямолинейной зависимости «напряжение-деформация» свидетельствовало о переходе от упругой деформации к пластической деформации образца [3, 4], зачастую сопровождающемся возникновением большого числа трещин [10, 11]. Неупругое деформирование продолжалось вплоть до разрушения образца, которое фиксировалось по наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом. Предел прочности рассчитывался в соответствии ГОСТ 21153.2-84 по максимальному напряжению с учетом размеров образца.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты испытаний образцов при одноосном сжатии приведены в табл. 1.

Кроме статического способа определения упругих параметров широко применяется и динамический способ, основанный на определении скоростей распространения упругих волн и объемной

Таблица 1

Предел прочности на сжатие, статические модуль Юнга, коэффициент Пуассона образцов дагинского горизонта
Ultimate compression strength, static Young's module and Poisson's ratio of the Dagi formation samples

№ п/п	№ обр.	Длина, мм	Диаметр, мм	Площадь, см^2	Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона, д.ед.
1	X988	30,10	29,79	6,97	6,25	7,18	0,85	0,27
2	X997	30,27	29,87	7,01	72,18	82,4	22,3	0,11
3	X010	30,18	29,90	7,02	21,6	24,7	5,29	0,24
4	X032	30,19	30,11	7,12	21,35	24,0	4,67	0,20
5	X034	30,15	29,66	6,91	25,28	29,3	6,73	0,22
6	X061	30,17	29,64	6,90	10,47	12,1	1,81	0,26
7	X074	30,18	29,62	6,89	21,72	25,2	5,91	0,20
8	X087	30,16	29,59	6,88	19,72	22,9	5,31	0,29
9	X091	30,17	29,64	6,90	19,90	23,1	5,68	0,21
10	X136	30,17	29,64	6,90	21,25	24,6	5,36	0,25
11	X189	30,19	29,64	6,90	24,51	28,4	6,54	0,22
12	X214	30,20	29,62	6,89	24,86	28,9	5,55	0,24
13	X229	30,18	29,62	6,89	23,09	26,8	5,74	0,22
14	X259	30,18	29,42	6,80	19,51	23,0	5,08	0,21
15	X309	30,18	29,47	6,82	24,66	28,9	5,99	0,25
16	X314	30,16	29,46	6,82	20,10	23,6	5,31	0,23
	Среднее значение				23,5	27,2	6,13	0,23
	Среднеквадратичное отклонение				13,9	15,9	4,59	0,04
	Коэффициент вариации, %				59,2	58,4	74,8	17,2

плотности горных пород. Коэффициент Пуассона динамическим методом определялся по общеизвестной формуле (1):

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2\left(V_p^2 - 2V_s^2\right)}, \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона; V_p — скорость распространения упругой продольной волны, км/с; V_s — скорость распространения упругой поперечной волны, км/с.

Модуль Юнга динамическим способом определялся по формуле (2):

$$E = 2\delta\left(1+\nu\right)V_s^2, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга (динамический), ГПа; δ — объемная плотность образца, г/см^3; ν — коэффициент Пуассона; V_s — скорость распространения упругой поперечной волны, км/с.

Результаты определения фильтрационно-емкостных свойств и упругих модулей, определенных динамическим способом, исследованных образцов приведены в табл. 2.

Для получения более широкого представления о прочностных свойствах нами также выполнены определения предела прочности на растяжение в атмосферных условиях по ГОСТ 21153.3-85,

Таблица 2

Коэффициенты проницаемости и пористости, динамические модуль Юнга, коэффициент Пуассона образцов дагинского горизонта
Permeability and porosity coefficients, dynamic Young's modulus and Poisson's ratio of the Dagi formation samples

№ п/п	№ обр.	$K_{пр\ атм}$, мД	$K_{п\ атм}$, %	Объемная плотность δ, г/см^3	$V_{р\ атм}$, км/с	$V_{s\ атм}$, км/с	Модуль Юнга *E*, ГПа	Коэффициент Пуассона ν, д.ед.
1	Х988	1288	26,5	1,94	1,536	0,930	4,37	0,210
2	Х997	2,70	9,8	2,39	4,181	2,314	14,1	0,279
3	Х010	177	24,8	2,02	1,986	1,165	5,83	0,237
4	Х032	41,0	23,2	2,03	2,126	1,233	6,24	0,247
5	Х034	48,0	24,0	2,04	2,123	1,231	6,26	0,247
6	Х061	282	23,5	2,04	1,676	1,018	5,02	0,208
7	Х074	162	23,9	2,06	2,252	1,313	6,72	0,243
8	Х087	214	24,7	2,02	1,984	1,165	5,82	0,237
9	Х091	146	25,3	2,02	2,110	1,225	6,16	0,246
10	Х136	114	25,2	2,02	1,874	1,112	5,52	0,228
11	Х189	47,0	20,1	2,16	2,141	1,250	6,70	0,242
12	Х214	42,0	21,8	2,11	2,097	1,219	6,40	0,245
13	Х229	37,0	22,4	2,10	2,081	1,211	6,33	0,244
14	Х259	116	24,4	2,00	1,796	1,075	5,25	0,221
15	Х309	41,0	23,9	2,02	1,960	1,153	5,75	0,235
16	Х314	124	24,5	1,99	1,850	1,101	5,37	0,226
	Среднее значение				2,111	1,232	6,369	0,237
	Среднеквадратичное отклонение				0,58	0,30	2,17	0,02
	Коэффициент вариации, %				27,6	24,7	34,07	7,08

Таблица 3

Прочность на растяжение образцов дагинского горизонта
Tension strength of the Dagi formation samples

№ п/п	№ обр	Длина, мм	Диаметр, мм	Площадь, см^2	Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	$K_{п\,тр}$, абс.%
1	X496	30,0	30,5	7,31	4,10	5,61	0,385
2	X497	30,0	30,5	7,31	4,23	5,79	0,345
3	X498	29,9	30,3	7,21	4,76	6,61	0,348
4	X501	29,8	30,5	7,31	4,11	5,63	0,377
5	X503	29,8	30,4	7,26	4,04	5,56	0,382
6	X507	29,8	30,5	7,31	4,00	5,47	0,408
7	X508	30,0	30,4	7,26	5,69	7,85	0,360
8	X510	30,0	30,5	7,31	3,98	5,45	0,382
9	X511	29,9	30,3	7,21	4,15	5,76	0,341
10	X522	30,0	30,5	7,31	2,89	3,96	0,478
	Среднее значение				4,20	5,77	0,380
	Среднеквадратичное отклонение				0,70	0,98	0,04
	Коэффициент вариации, %				16,7	16,9	10,6

результаты которых представлены в табл. 3.

Обсуждение результатов исследований. Общеизвестно, что прочность горных пород зависит от их пористости [5, 6, 8—10]. Полученная нами зависимость предела прочности на сжатие от пористости исследованных образцов (рис. 2) подтверждает это, а достаточно высокая степень достоверности аппроксимации (R^2 = 0,87) прямолинейной зависимостью позволяет использо-

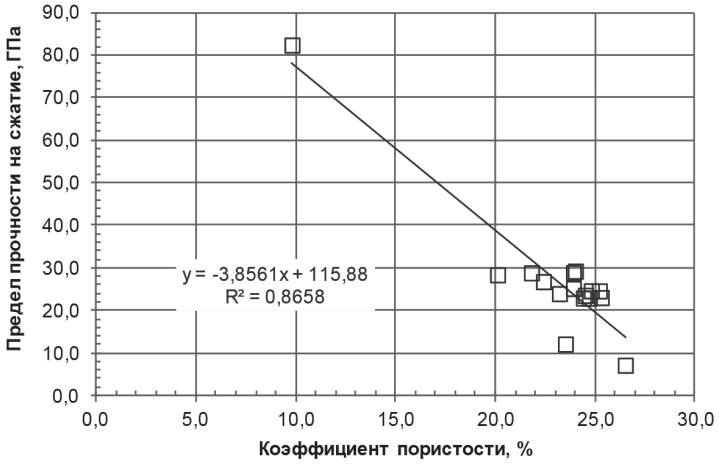


Рис. 2. Зависимость предела прочности при одноосном сжатии в атмосферных условиях от пористости образцов горных пород дагинского горизонта

Fig. 2. Uniaxial compression strength versus porosity of the Dagi formation rock specimens in atmospheric conditions

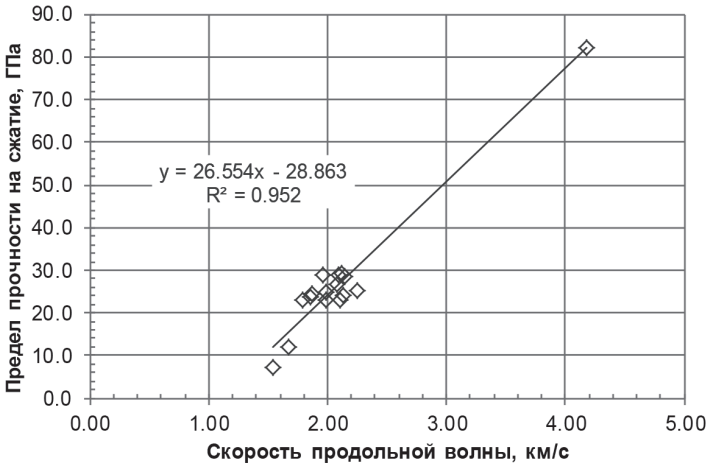


Рис. 3. Зависимость предела прочности при одноосном сжатии в атмосферных условиях от скорости продольной волны в образцах горных пород дагинского горизонта

Fig. 3. Uniaxial compression strength versus P-wave velocity in the Dagi formation rock specimens in atmospheric conditions

вать эту зависимость для качественной оценки величины прочности в зависимости от пористости образцов.

Среди комплекса геофизических исследований скважин наиболее актуальным для определения упругих параметров коллектора являются разновидности акустического каротажа, которые позволяют определять скорости распространения упругих волн. Зависимость предела прочности на сжатие от скорости продольной волны (рис. 3), полученная по результатам экспериментальных исследований образцов горных пород дагинского горизонта, как и в работах [4, 6, 8, 10], оказалась весьма информативной. Высокая степень достоверности аппроксимации (R^2 = 0,95) прямолинейной зависимостью, позволила получить качественную оценку величины прочности в зависимости от скорости продольной волны в исследованных образцах дагинского горизонта.

По данным определения продольной и поперечной скоростей упругих волн и объемной плотности образцов были вычислены значения упругого модуля (динамического) Юнга по всем исследованным образцам и проведено сопоставление с пределом прочности при одноосном сжатии (рис. 4).

Аналогичное сопоставление предела прочности с упругим модулем Юнга, определенного статическим способом, показало (рис. 4), что в обоих случаях достоверности аппроксимации прямолинейными зависимостями довольно высокие (R^2 = 0,95) и (R^2 = 0,99), что позволяет рекомендовать их использование для оценки прочностных свойств коллекторов дагинского горизонта для геомеханического моделирования залежи и проектирования процесса ее разработки.

Сопоставление предела прочности на растяжение и пористости исследованных образцов не позволило получить приемлемой зависимости между этими параметрами. Дальнейший анализ образцов по методике, описанной в работах [11—15], выявил наличие образца Х522 (маркер с заливкой) с повышенной (0,48 абс.%) трещинной пористостью (рис. 5). Прочность его оказалась самой низкой (3,96 МПа) среди исследованных образцов.

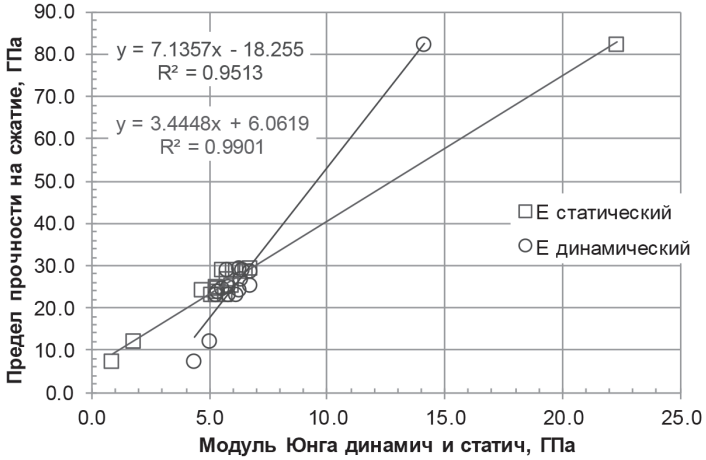


Рис. 4. Зависимость предела прочности при одноосном сжатии в атмосферных условиях от модуля Юнга динамического и статического образцов горных пород

Fig. 4. Uniaxial compression strength as function of dynamic and static Yong's moduli of rock specimens in atmospheric conditions

Теория прочности Кулона-Мора основана на предположении, что разрушение горной породы, т.е. переход от упругого состояния к пластичному, вызывается совместным действием нормальных и касательных напряжений и показывает связь касательных и нормальных напряжений, действующих в горной породе [19]. Она основана на том, что прочность тела на сдвиг в каждой конкретной площадке равна сумме величины сцепления C и нормального напряжения σn с учетом угла внутреннего трения (3):

Как известно, граница упругого и пластического состояний описывается критерием Кулона-Мора (3):

$$\tau = C + tg\varphi\ \sigma_n C, \qquad (3)$$

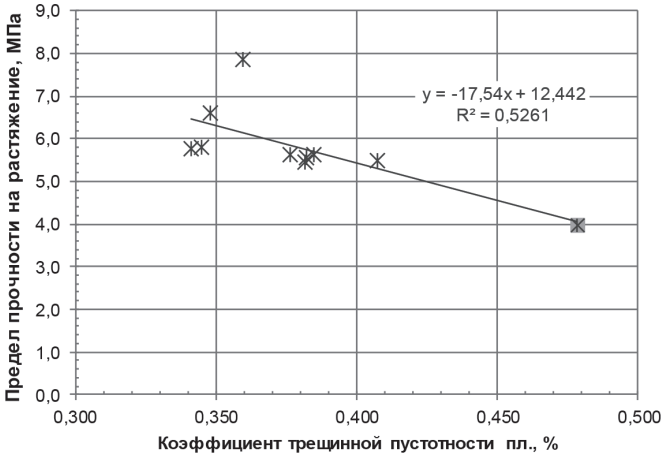


Рис. 5. Зависимость предела прочности при одноосном растяжении в атмосферных условиях от трещинной пористости образцов горных пород дагинского горизонта

Fig. 5. Uniaxial compression strength as function of joint porosity the Dagi formation rock specimens in atmospheric conditions

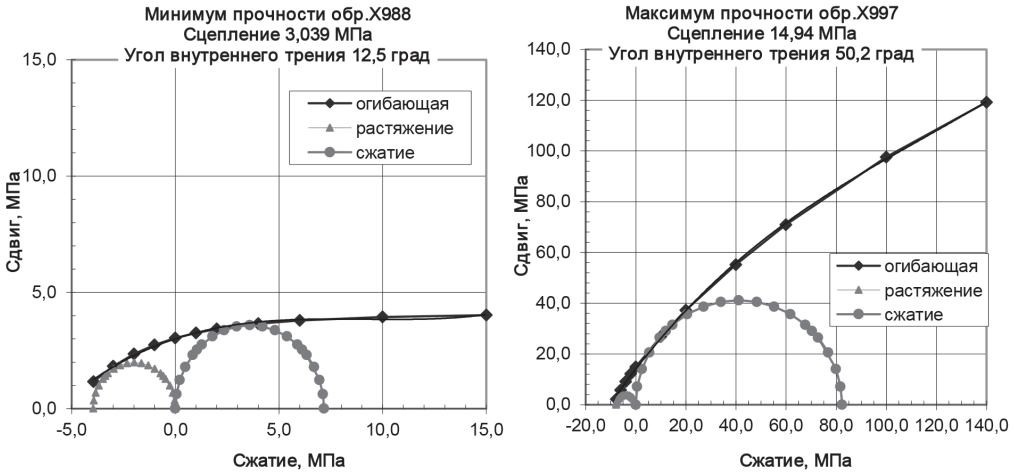


Рис. 6. Круги Мора и их огибающая по минимальным и максимальным величинам пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении в атмосферных условиях

Fig. 6. Mohr's circles and envelop plotted by minimal and maximal values of uniaxial strength in compression and tension in atmospheric conditions

где τ и σ_n — касательное (сдвиговое) и нормальное (сжимающее или растягивающее) напряжение на площадке скольжения; φ — угол внутреннего трения (иногда его называют угол внутреннего разрушения) и C — сцепление (когезия или модуль сцепления).

Нормальные и касательные напряжения взаимосвязаны и могут быть рассчитаны путем сложения векторов и представлены в виде соответствующих кругов предельных напряжений. В частности, напряженному состоянию при растяжении ниже соответствуют круги

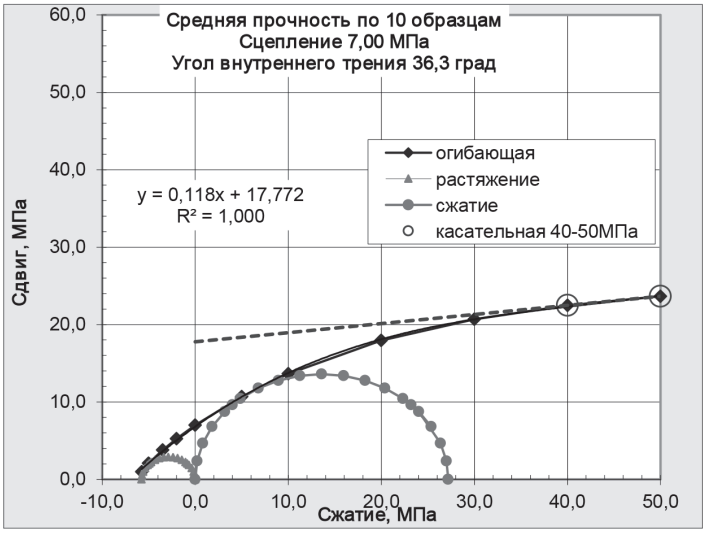


Рис. 7. Круги Мора и их огибающая по средним величинам пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении образцов горных пород в атмосферных условиях

Fig. 7. Mohr's circles and envelop plotted by average values of uniaxial strength in compression and tension of rock specimens in atmospheric conditions

Мора при растяжении, а напряженному состоянию при сжатии — круги Мора при сжатии.

Круги Мора строятся в соответствии с ГОСТ 21153.8-88 и по данным испытаний образцов горных пород на прочность [4, 16, 17] в различных условиях: при различных напряженных состояниях; при сжатии и растяжении; при сжатии и срезе со сжатием; при различных напряжениях обжима; а также методом разрушения образцов сферическими инденторами [18]. Были построены несколько диаграмм с кругами Мора (рис. 6 и 7) по результатам испытаний на сжатие и растяжение. Для этого были использованы данные по минимальным и максимальным величинам предела прочности при сжатии и растяжении, что показано на рис. 6.

Для получения средней величины (рис. 7) были использованы средние значения пределов прочности при сжатии и растяжении.

Кривая, огибающая круги предельных напряжений, называется огибающей кругов Мора или паспортом прочности и представляет собой совокупность точек, характеризующих предельной напряженное состояние горной породы. В работе Ю.М. Карташева с соавторами [20] показано, что огибающую кругов Мора можно описать уравнением гиперболы или параболы.

Так, в ГОСТ 21153.8-88 (приложение 2 п. 3) предусмотрено определение координат точек огибающей τ расчетным путем с использованием результатов определения пределов прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ и растяжении $\sigma_р$ по эмпирическому уравнению (4) гиперболы, которое имеет следующий вид:

$$\tau = \tau_{max}\left[\frac{\sigma_\chi^2}{\left(\sigma_\chi^2 + a^2\right)}\right]^{3/8}, \qquad (4)$$

где τ_{max} — максимальное сопротивление породы срезу (сдвигу) при гипотетически полностью закрывшихся трещинах и порах; $\sigma_\chi^{\ 2}$ — нормальное напряжение относительно начала координат, перенесенного в точку пересечения огибающей с осью абсцисс (рассчитывается из формулы (9), приведенной ниже); a — параметр формы огибающей кривой, рассчитываемый по формуле (7).

Для удобства расчетов и табулирования уравнение огибающей переводят в безразмерные координаты l и K, связанные соотношением (5):

$$l = 0{,}73\left(\frac{K^2}{K^2+1}\right)^{3/8}. \qquad (5)$$

Отношение пределов прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ и растяжении $\sigma_р$ рассчитывается по формуле (6):

$$q_2/q_1 = \sigma_{сж}/\sigma_р, \qquad (6)$$

где q_2 — безразмерный радиус предельного круга Мора для одноосного сжатия; q_1 — безразмерный радиус предельного круга Мора для одноосного растяжения.

Значение параметра а формы огибающей кривой рассчитывается по формуле (7).

$$a = \sigma_{сж}/(2q_2), \qquad (7)$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности при одноосном сжатии; q_2 — безразмерный радиус предельного круга Мора для одноосного сжатия.

Значение параметра переноса начала координат рассчитывается по формуле (8):

$$\sigma_0 = a(K_1 + q_1), \qquad (8)$$

где q_2 и $(K_1 + q_1)$ определяются по табл. 3 из ГОСТ 21183-88 для каждого соответствующего значения $\sigma_{сж}/\sigma_р$ или q_2/q_1.

Координаты σ и τ отдельных точек огибающей вычисляются по формулам (9) (10):

$$\sigma = \sigma_\chi - \sigma_0 = Ka - \sigma_0, \qquad (9)$$

$$\tau = la \qquad (10)$$

Значения *K* и *l* определяются из табл. 4 ГОСТ 21183-88, при этом сначала задается величина наибольшего нормального напряжения для верхней границы диапазона построения паспорта и по ней устанавливается обратным пересчетом граничное значение *K*.

Затем в диапазоне нормальных напряжений от максимальной величины до нулевого значения задаются не менее 6 значений напряжения для возможности достоверного и равномерного покрытия этого диапазона положительных напряжений. Аналогично задаются не менее 4 значений нормальных напряжений в отрицательной части нормальных напряжений. Такой подход позволяет получить не менее 11 точек огибающей, включая нулевое значение нормальных напряжений на пересечении с осью касательных (сдвиговых) напряжений, по которым проводится огибающая кругов Мора.

Полученные огибающие кругов Мора позволили для каждой точки, лежащей на них, оценить значения нормальных и касательных напряжений при переходе от упругого к пластичному деформированию, а также рассчитать сцепление (когезию) и угол внутреннего трения. Оценка величины сцепления и угла внутреннего трения в атмосферных условиях показала, что для исследованных образцов угол внутреннего трения в среднем равен 36,3 ° (изменения от 12,5 до 52,2 °), а сцепление 7,00 МПа (изменения от 3,04 до 14,9 МПа).

Полученные результаты (табл. 1 — 3) свидетельствуют о том, что прочностные свойства исследованных образцов изменяются в довольно широком диапазоне, что можно, в определенной мере, объяснить вариациями минерального состава горных пород, который отражается широким диапазоном изменений минералогической плотности: от 2,64 до 2,71 г/см^3.

Наибольший интерес представляет определение упругих характеристик, а также перехода от упругой деформации к пластической в условиях, моделирующих пластовые.

Для этого нами была построена касательная к огибающей кругов Мора для средних величин прочности в диапазоне сжимающих напряжений 40 — 50 МПа, близких по величине к напряжениям, действующим в пластовых условиях (рис. 7), которая позволила получить угол внутреннего трения равный 6,8° и сцепление 17,77 МПа. Эти величины, в соответствии с теорией Кулона-Мора, отражают границу перехода от упругого состояния к пластическому состоянию в условиях, близких к действующим в пласте.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований упругих и прочностных свойств пород дагинского горизонта позволили выявить линейную зависимость предела прочности при сжатии от пористости образцов с высокой степенью достоверности аппроксимации, которую можно рекомендовать для оценки величины прочности в зависимости от пористости образцов.

Зависимость предела прочности при сжатии от скорости продольной волны также оказалась информативной с точки зрения определения прочностных свойств.

Построены паспорта прочности горных пород с использованием диаграмм с кругами Мора по минимальным и максимальным величинам и по средним значениям пределов прочности при сжатии и растяжении.

Выполнена оценка значений нормальных и касательных напряжений при переходе от упругого к пластичному деформированию и рассчитаны величины сцепления и угла разрушения. Оцен-

ка паспорта прочности для диапазона сжимающих напряжений 40 — 50 МПа, близких к действующим в пластовых условиях, показала, что угол внутреннего трения равен 6,8 °, а сцепление 17,77 МПа.

Полученные экспериментальные оценки прочностных свойств коллекторов дагинского горизонта могут быть использованы для геомеханического моделирования залежи и проектирования процесса ее разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жуков В. С.*, *Кузьмин Ю. О.* Физическое моделирование современных геодинамических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 5. — С. 71 — 77.

2. *Жуков В. С.* Оценка прочностных и упругих свойств горных пород дагинского горизонта шельфа Сахалина / Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ROOGD-2018): тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции 27–28 ноября 2018 г. — М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2018. — С. 29.

3. *Zoback M. D.* Reservoir geomechanics. Cambridge university press. 2007. 505 p.

4. *Schön J. H.* Physical properties of rock, Handbook of Petroleum Exploration and Production, Elsevier, USA, 2015. 494p.

5. *Chang C., Zoback M. D., Khaksar A.* Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, Vol. 51, No 3, pp. 223–237.

6. *Sone H.*, *Zoback M. D.* Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks — Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy // Geophysics, 2013, Vol. 78, No 5, pp. 381–392.

7. *Hoek E.*, *Martin C. D.* Fracture initiation and propagation in intact rock — a review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, Vol. 6, No 4, pp. 278 — 300.

8. *Jamshidi A., Zamanian H.*, *Sahamien R. Z.* The effect of density and porosity on the correlation betmeen uniaxial compressive strength and p-wave velocity // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, Vol. 51, pp. 1279–1286.

9. *Kaiser P. K.*, *Kim B. H.* Characterization of strength of intact brittle rock considering confinement-dependent failure processes // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, Vol. 48, pp. 107 — 119.

10. *Motra H. B.*, *Zertani S.* Influence of loading and heating processes on elastic and geomechanical properties of eclogites and granulites // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018, Vol. 10, No 1, pp. 127 — 137. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.11.001.

11. *Туранк К., Фурментро Д., Денни А.* Распространение волн и границы раздела в породах / Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. Сборник научных статей. Перевод с англ. и фр. под ред. В. Мори и Д. Фурментро. — М.: Мир, 1994. — С. 176 — 184.

12. *Жуков В. С.* Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн / Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. Сборник научных статей. — М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2012. — С. 148 — 152.

13. *Жуков В. С.* Патент РФ № 2516392, 13.09.2012. Способ определения трещинной пористости пород. 2014. Бюл. № 14.

14. *Жуков В. С.*, *Моторыгин В. В.* Патент РФ № 2646956, 31.05.2017. Способ определения трещинной пористости горных пород. 2018. Бюл. № 8.

15. *Жуков В. С.*, *Моторыгин В. В.* Влияние межзерновой пористости и трещинной пустотности горных пород на скорость продольной волны // Научно-технический сборник Вести газовой науки. — 2018. — № 3 (35). — С. 249 — 255.

16. *Цой П. А.*, *Усольцева О. Н.* Применение кругов Мора для связи и модельной оценки прочностных данных разноразмерных образцов горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 2. — С. 23—29.

17. *Хажыылай Ч. В.*, *Еременко В. А.*, *Косырева М. А.*, *Янбеков А. М.* Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием Критерия Хука-Брауна и программы ROCDATA // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 92—101. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-92-101.

18. *Коршунов В. А.*, *Карташов Ю. М.*, *Козлов В. А.* Определение показателей паспорта прочности горных пород методом разрушения образцов сферическими инденторами // Записки Горного института. — 2010. — Т. 185. — С. 41—45.

19. *Латышев О. Г.*, *Корнилков М. В.* Направленное изменение фрактальных характеристик, свойств и состояния пород поверхностно-активными веществами в процессах горного производства: научная монография. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. — 407 с.

20. *Карташов Ю. М.*, *Матвеев Б. В.*, *Михеев Г. В. и др.* Прочность и деформируемость горных пород. — М.: Недра, 1979. — 269 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Zhukov V. S., Kuz'min Yu. O. Physical modeling of modern geodynamic processes. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003, no 5, pp. 71—77. [In Russ].

2. Zhukov V. S. Estimating the strength and elasticity of rocks in the Dagi formation on the Sakhalin island shelf. *Osvoenie resursov nefti i gaza rossiyskogo shel'fa: Arktika i Dal'niy Vostok (ROOGD-2018)*: tezisy dokladov VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii 27–28 noyabrya 2018 g. [Russian Offshore Oil and Gas Development: Arctic and Far East (ROOGD-2018): VII International Scientific–Technical Conference Proceedings, 27–28 November 2018], Moscow, Gazprom VNIIGAZ, 2018, pp. 29. [In Russ].

3. Zoback M. D. *Reservoir geomechanics.* Cambridge university press. 2007. 505 p.

4. Schön J. H. *Physical properties of rock, Handbook of Petroleum Exploration and Production*, Elsevier, USA, 2015. 494p.

5. Chang C., Zoback M. D., Khaksar A. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, Vol. 51, No 3, pp. 223–237.

6. Sone H., Zoback M. D. Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks — Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy. *Geophysics*, 2013, Vol. 78, No 5, pp. 381–392.

7. Hoek E., Martin C. D. Fracture initiation and propagation in intact rock — a review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, Vol. 6, No 4, pp. 278—300.

8. Jamshidi A., Zamanian H., Sahamien R. Z. The effect of density and porosity on the correlation betmeen uniaxial compressive strength and p-wave velocity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, Vol. 51, pp. 1279–1286.

9. Kaiser P. K., Kim B. H. Characterization of strength of intact brittle rock considering confinement-dependent failure processes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, Vol. 48, pp. 107—119.

10. Motra H. B., Zertani S. Influence of loading and heating processes on elastic and geomechanical properties of eclogites and granulites. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018, Vol. 10, No 1, pp. 127—137. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.11.001.

11. Turank K., Furmentro D., Denni A. Wave propagation and interfaces in rocks. Mekhanika gornykh porod primenitel'no k problemam razvedki i dobychi nefti. Sbornik nauchnykh statey [Rock mechanics in oil prospecting and production. Collection of scientific articles], Moscow, Mir, 1994, pp. 176—184.

12. Zhukov V.S. Assessment of fracturing in reservoirs by elastic wave velocity. *Problemy resursnogo obespecheniya gazodobyvayushchikh rayonov Rossii do 2030 g.* Sbornik nauchnykh statey [Resource supply problems in gas producing areas in Russia to 2030. Collection of scientific articles], Moscow, OOO «Gazprom VNIIGAZ», 2012, pp. 148—152.

13. Zhukov V.S. *Patent RU 2516392*, 13.09.2012.

14. Zhukov V.S., Motorygin V.V. *Patent RU 2646956*, 31.05.2017.

15. Zhukov V.S., Motorygin V.V. Effect of inter-grain porosity and joint porosity on P-wave velocity in rocks. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Vesti gazovoy nauki*. 2018, no 3 (35), pp. 249—255. [In Russ].

16. Tsoy P.A., Usol'tseva O.N. Use of Mohr's circles for the connection and model estimation of strength data in different size rock samples. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no 2, pp. 23—29. [In Russ].

17. Khazhyylay Ch.V., Eremenko V.A., Kosyreva M.A., Yanbekov A.M. In-situ rock mass failure envelope plotting using the Hoek–Brown criterion and RocData software toolkit. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 12, pp. 92–101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-92-101.

18. Korshunov V.A., Kartashov Yu.M., Kozlov V.A. Determination of rock failure envelope by fracturing rock samples by spherical indenters. *Zapiski Gornogo instituta*. 2010. vol. 185, pp. 41—45. [In Russ].

19. Latyshev O.G., Kornilkov M.V. *Napravlennoe izmenenie fraktal'nykh kharakteristik, svoystv i sostoyaniya porod poverkhnostno-aktivnymi veshchestvami v protsessakh gornogo proizvodstva*: nauchnaya monografiya [Directed change in fractal characteristics, properties and behavior of rocks by surface active substances in mining processes: scientific monograph], Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 2016, 407 p.

20. Kartashov Yu.M., Matveev B.V., Mikheev G.V. *Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod* [Strength and deformability of rocks], Moscow, Nedra, 1979, 269 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жуков Виталий Семенович — д-р техн. наук,
старший научный сотрудник, главный научный сотрудник,
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
e-mail: VZhukov@vniigaz.gazprom.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.S. Zhukov, Dr. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, Chief Researcher,
«Gazprom VNIIGAZ» Ltd., Moscow, Russia,
e-mail: VZhukov@vniigaz.gazprom.ru.

Получена редакцией 17.10.2019; получена после рецензии 21.01.2020; принята к печати 20.03.2020.
Received by the editors 17.10.2019; received after the review 21.01.2020; accepted for printing 20.03.2020.