

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.114-118>

УДК 622.276.031:550.822.3

Выбор оптимального критерия прочности для терригенных отложений пашийского горизонта Ташлиярской площади Ромашкинского месторождения

И.И. Гирфанов^{1*}, М.М. Ремеев¹, О.С. Сотников¹, А.А. Лутфуллин², И.Р. Мухлиев³

¹Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть», Бузульма, Россия

²ПАО «Татнефть», Альметьевск, Россия

³Центр геолого-технических мероприятий ПАО «Татнефть», Альметьевск, Россия

С начала эксплуатации нефтяного месторождения происходит изменение напряженного состояния массива горных пород. Определение предельных состояний, при которых происходит разрушение, позволяет прогнозировать поведение горных пород при изменении действующих напряжений. В данной работе использованы результаты исследований керна, отобранного из пашийского горизонта, проведенных на шести комплектах образцов, представленных песчаником. Каждый комплект включал в себя три образца, отобранных из однородных участков с одной глубины и использованных для определения пределов прочности при растяжении, одноосном и объемном сжатии, соответствующим пластовым условиям. Приводится анализ методик построения паспорта прочности породы, сравнение критериев прочности описанного в ГОСТ 21153.8-88, линейного критерия прочности Мора-Кулона и критерия Хоека-Брауна. Критерий Хоека-Брауна имеет преимущество в описании нелинейного увеличения прочности с увеличением давления обжима и более адекватно отображает свойства пород. На основе лабораторных исследований керна впервые проведено сравнение применимости критериев прочности для продуктивных отложений пашийского горизонта Ромашкинского месторождения для определения их практической применимости. Комплексные исследования прочностных характеристик ранее не проводились, и полученные результаты послужат основой для дальнейшего анализа и применения с целью повышения эффективности разработки терригенного девона Ромашкинского месторождения.

Ключевые слова: критерий прочности, паспорт прочности, критерий Мора-Кулона, критерий Хоека-Брауна, предел прочности, растяжение, одноосное сжатие, объемное сжатие

Для цитирования: Гирфанов И.И., Ремеев М.М., Сотников О.С., Лутфуллин А.А., Мухлиев И.Р. (2019). Выбор оптимального критерия прочности для терригенных отложений пашийского горизонта Ташлиярской площади Ромашкинского месторождения. *Георесурсы*, 21(4), с. 114-118. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.114-118>

С начала эксплуатации нефтяного месторождения происходит изменение напряженного состояния массива горных пород. В процессе техногенного воздействия (добыча пластового флюида, применение системы поддержания пластового давления (ППД), осуществление гидравлического разрыва пласта (ГРП) и т.д.) изменяются пластовое давление, эффективные напряжения, режим напряжений, температура пласта как на локальных участках, так и по месторождению в целом.

Изменение действующих напряжений может стать причиной разрушения горной породы, изменения объема порового пространства, активации существующих разломов, изменения проводимости естественных трещин и т.д.

Определение предельных состояний, при которых происходит разрушение, позволяет прогнозировать поведение горных пород при изменении действующих напряжений. Сопrotивление породы разрушению под действием внешней нагрузки называется прочностью. Пределы прочности определяются в лабораторных испытаниях образцов горных пород при растягивающих и сжимающих нагрузках.

Прочность горных пород определяется двумя составляющими: прочностью матрицы породы и прочностью нарушений сплошности породы (трещины, поры, включения, дефекты и т.д.). Условия, которые приводят к разрушению горной породы, могут быть описаны критериями напряжений или так называемым критерием прочности. Общим в вопросе разрушения является то, что горные породы обладают большей прочностью на сжатие, чем на растяжение.

Критерии прочности, описываемые через напряжения, являются наиболее распространенными в механике горных пород. Большинство из них используют только минимальные и максимальные главные напряжения без учёта промежуточного главного напряжения. Кривая, огибающая круги предельных напряжений, построенных в координатах – нормальные эффективные напряжения – касательные напряжения (σ , τ), представляет собой критерий, называемый паспортом прочности горной породы.

По ГОСТ Р 50544-93 паспорт прочности горной породы – это зависимость предельных разрушающих касательных напряжений от действующих в горной породе нормальных напряжений, графически представляющая собой огибающую серии предельных кругов напряжений (ГОСТ Р 50544-93, 1993).

* Ответственный автор: Ильдар Ильясович Гирфанов
E-mail: gii@tatnpi.ru

© 2019 Коллектив авторов

Описанная в ГОСТ 21153.8-88 (ГОСТ 21153.8-88, 1988) методика построения паспорта прочности основана на использовании результатов определения пределов прочности при объемном сжатии не менее чем для трех образцов керн при различных значениях бокового давления, еще на двух образцах определяют пределы прочности при растяжении и одноосном сжатии. Строят пять окружностей в координатах σ - τ и проводят плавную кривую, огибающую все пять (или более) полуокружностей. Для данной методики необходимо минимум пять образцов керн, что зачастую не выполнимо из-за ограниченности объемов кернового материала.

Следующая методика основана на применении данных пределов прочности при срезе со сжатием по ГОСТ 21153.5-88 «Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием» (ГОСТ 21153.5-88, 1988), что не отвечает нуждам наших производственных и научно-исследовательских задач. Обе вышеописанные методики не являются расчётными и основаны на построении окружностей в координатах σ - τ по данным определения пределов прочности на керне.

Третья методика построения паспорта прочности породы является расчётной и предусматривает определение координат точек огибающей расчётным путём по эмпирическому уравнению:

$$\tau = \tau_{\max} \left(\frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + a^2} \right)^{3/8}, \quad (1)$$

где τ_{\max} – максимальное сопротивление породы сдвигу при гипотетически полностью закрывшихся под действием давления трещинах и порах, МПа; σ_k – нормальное напряжение относительно начала координат, перенесенного в точку пересечения огибающей с осью абсцисс, МПа; a – параметр формы огибающей кривой.

Расчёт τ по формуле (1) производится с использованием результатов лабораторных тестов по определению пределов прочности при растяжении и одноосном сжатии и табулированных параметров, приведенных в ГОСТ 21153.8-88.

В данной работе использованы результаты исследований керн, отобранного из пашийского горизонта скв. 14403р Ташлиярской площади, проведённых на шести комплектах образцов, представленных песчаником. Каждый комплект включал в себя три образца, отобранных из однородных участков с одной глубины и использованного для определения пределов прочности при растяжении, одноосном и объемном сжатии, соответствующим пластовым условиям. Результаты экспериментов

Номер комплекта	Номер образца	Глубина отбора, м	Размеры образца Dхh, мм	Тип испытания	Предел прочности МПа
1	32	1625,6	30х60	объемное сжатие	87,5
	31	1625,55	30х60	одноосное сжатие	43,20
	33	1625,6	30х15	растяжение	2,90
2	35	1626,3	30х60	объемное сжатие	61,0
	37	1626,35	30х60	одноосное сжатие	25,58
	36	1626,3	30х15	растяжение	2,70
3	43	1628,43	30х60	объемное сжатие	119,1
	41	1628,4	30х60	одноосное сжатие	43,48
	42	1628,4	30х15	растяжение	3,50
4	45	1629,33	30х60	объемное сжатие	144,9
	47	1629,36	30х60	одноосное сжатие	61,27
	46	1629,33	30х15	растяжение	5,70
5	51	1630,43	30х60	объемное сжатие	119,0
	49	1630,4	30х60	одноосное сжатие	75,69
	50	1630,4	30х15	растяжение	3,90
6	54	1632,25	30х60	объемное сжатие	78,0
	56	1632,28	30х60	одноосное сжатие	41,45
	55	1632,25	30х15	растяжение	4,40
Среднее по образцам			30х60	объемное сжатие	102,0
			30х60	одноосное сжатие	48,45
			30х15	растяжение	3,85

Табл. 1. Результаты определения пределов прочности при объемном сжатии, одноосном сжатии и растяжении

приведены в табл. 1. На рис. 1 приведены примеры построения паспортов прочности по ГОСТ 21153.8-88.

Как видно, критерий прочности не описывает точно окружность, построенную по значениям предела прочности и давления обжима, полученным при испытании образца при трёхосном сжатии. Обжим, создаваемый при трёхосном испытании на предел прочности, увеличивает значение последнего по сравнению с испытанием на предел прочности при одноосном сжатии, проводимым при атмосферном давлении и давлении обжима, равном

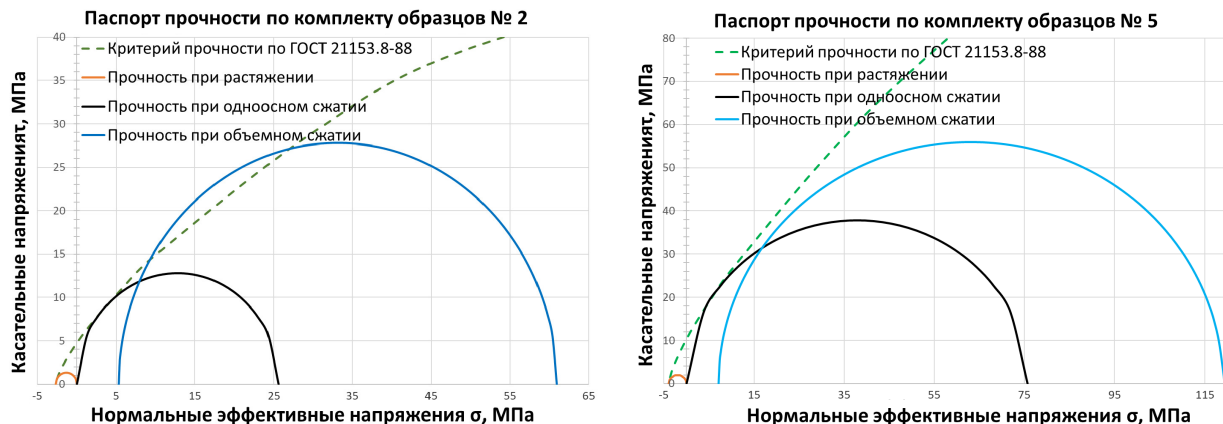


Рис. 1. Паспорт прочности ГОСТ 21153.8-88 для комплектов образцов №2 и №5

нулю. Это делает затруднительным применение ГОСТ 21153.8-88 для построения паспорта прочности горной породы по результатам испытаний образцов керна при пластовых условиях.

Рассмотренный линейный критерий прочности Мора-Кулона (Coulomb, 1776) не удовлетворяет необходимым требованиям по описанию границы прочности горной породы:

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (2)$$

где τ – величина касательных напряжений, МПа; C – значение когезии, МПа; σ – величина нормальных напряжений, МПа; $\operatorname{tg}\varphi$ – тангенс угла наклона кривой критерия прочности.

Критерий прочности Мора-Кулона основан на гипотезе Мора о зависимости касательных напряжений от нормальных и гипотезе Кулона о силах сцепления.

На рис. 2 представлен линейный критерий прочности Мора-Кулона. Как видно, в области прочности на разрыв критерий не проходит по касательной к окружности, и в области напряжений, лежащих дальше предела прочности при пластовых условиях, он показывает завышенную границу.

В качестве альтернативы способам построения критериев прочности по ГОСТ 21153.8-88 и по уравнению Мора-Кулона рассмотрен критерий Хоека-Брауна. Он, в отличие от линейного критерия Мора-Кулона, представляет собой нелинейную параболическую форму. Критерий Хоека-Брауна – это эмпирически полученная зависимость, используемая для описания нелинейного возрастания максимальной прочности породы с возрастанием эффективного напряжения.

В основу легли опыты Хоека с разрушением хрупкой породы и использованием параболической огибающей Мора, полученной из теории разрушения Гриффита, чтобы определить взаимосвязь между касательным и нормальным напряжением при возникновении трещины. Объединив возникновение трещины с распространением трещины и разрушением горных пород, Хоек и Браун предложили поправочные коэффициенты для того, чтобы адаптировать различные параболические кривые к данным трехосных испытаний (Хоек, Вроун, 1980). Таким образом, критерий Хоека-Брауна имеет преимущество в описании нелинейного увеличения прочности с увеличением давления обжима.

В работе (Kumar, 1998) приводится следующая запись критерия Хоека-Брауна:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + C_0 \cdot \sqrt{m \cdot \frac{\sigma_3}{C_0} + s}, \quad (3)$$

где σ_1 – максимальное сжимающее усилие при трехосном разрушении, МПа; σ_3 – минимальное сжимающее усилие при разрушении, МПа; C_0 – прочность при одноосном сжатии, МПа; m, s – параметры, зависящие от свойств породы.

Для неповрежденных пород s равно единице, а для гранулированных сыпучих пород s равно нулю. Значения параметра m получают по данным лабораторных исследований образцов пород. Параметр m характеризует хрупкость породы: чем он меньше, тем более пластичная порода.

При отсутствии данных лабораторных тестов используются справочные данные, полученные Хоеком и Брауном. Например, для песчаников параметр m находится в диапазоне от 15 до 24 (Zoback, 2010).

Критерий Хоека-Брауна представлен соотношением максимального и минимального напряжений, и для его преобразования в параметры нормальных и касательных напряжений Кумаром (Kumar, 1998) предложен способ вычисления точек касательной в координатах (σ, τ):

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma'}, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma'} \cdot \sqrt{\sigma'}, \quad (5)$$

$$\sigma' = 1 + ma \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{a-1}, \quad (6)$$

где σ – нормальные напряжения, МПа; τ – касательные напряжения, МПа; σ_1 – максимальное сжимающее усилие при разрушении, МПа; σ_3 – минимальное сжимающее усилие при разрушении, МПа; σ' – отношение дифференциалов σ_1 и σ_3 ; σ_c – прочность при одноосном сжатии, МПа; a, m, s – параметры, зависящие от свойств породы.

Подбор параметров a, m и s осуществляется по условию из соотношения:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} = \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a. \quad (7)$$

В целях унификации для рассматриваемых терригенных отложений пашийского горизонта параметр a принят равным 0,5, параметр s – равным 1; осуществлялся только подбор параметра m по выполнению условия уравнения (7). Результаты определения данных параметров приведены в табл. 2. По комплекту 1 параметр a взят равным 0,54 для того, чтобы добиться хорошего описания огибающей предельных кругов напряжений и выполнения условия (7).

Примеры построения критерия прочности Хоека-Брауна по результатам лабораторных исследований

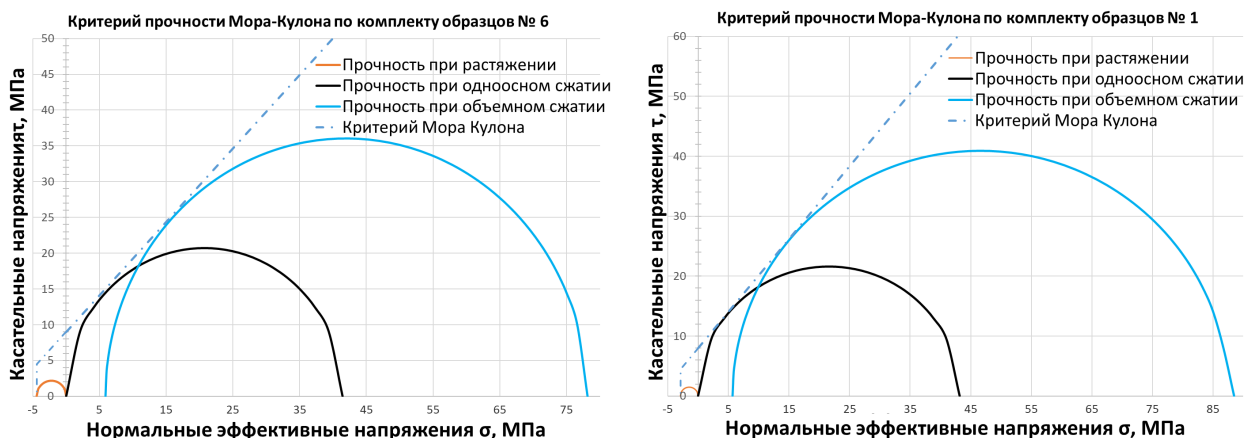


Рис. 2. Линейный критерий прочности Мора-Кулона для комплектов образцов №1, №6

Номер комплекта	Параметр		
	<i>a</i>	<i>s</i>	<i>m</i>
1	0,54	1	17
2	0,5	1	18,2
3	0,5	1	33
4	0,5	1	33,4
5	0,5	1	12,7
6	0,5	1	14,3
Средние значения параметров свойств породы	0,5	1	21,4

Табл. 2. Значения параметров *a*, *m*, *s* по комплектам образцов

пределов прочности приведены на рисунке 3.

Как показано на рис. 4, по комплекту образцов №6 не удалось добиться полного описания огибающей предельных кругов напряжений в области растягивающих напряжений. Недостающая часть достроена линией по тренду продолжения критерия.

Для определения общих параметров интервала пашийского горизонта взяты средние значения пределов прочности, определённые по результатам испытаний комплектов образцов. Параметры *a*, *m* приняты равными 0,5 и 1, соответственно, а параметр *s* принят средним по результатам тестов, равным 21,4. На рис. 5 приведены построенные критерии прочности по ГОСТ 21153.8-88, линейному критерию Мора-Кулона и критерий прочности Хоека-Брауна на основе средних значений для пашийского горизонта.

По полученным результатам видно, что линейный критерий прочности Мора-Кулона показывает завышенную

границу в области растягивающих напряжений; критерий прочности, построенный по ГОСТ 21153.8-88, даёт заниженную границу в области сжимающих напряжений; а критерий Хоека-Брауна в целом удовлетворительно описывает предельные круги напряжений в области растягивающих напряжений, одноосного и объёмного сжатий.

Выводы

1. На основе лабораторных исследований керна впервые проведено сравнение применимости критериев прочности для продуктивных отложений пашийского горизонта Ромашкинского месторождения для определения их практической применимости.

2. Комплексные исследования прочностных характеристик ранее не проводились, и полученные результаты послужат основой для дальнейшего анализа и применения с целью повышения эффективности разработки терригенного девона Ромашкинского месторождения.

3. Критерий Мора-Кулона представляет собой эмпирическую зависимость, полностью основанную на данных, полученных опытным путём, что делает её надёжной. Недостатком является линейность критерия, что приводит к снижению точности и влияет на результаты расчётов, например, устойчивости ствола скважины.

4. Критерий Хоека-Брауна благодаря его нелинейности более адекватно отображает свойства пород в части, где действуют растягивающие напряжения, и в области напряжений, лежащих за пределом прочности при пластовых условиях. Аналитический характер критерия делает его удобным для практического применения и

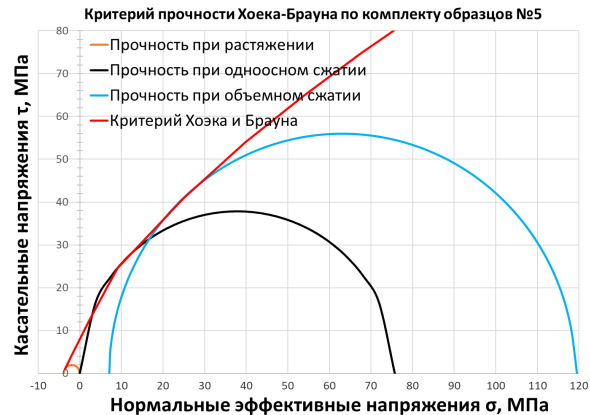
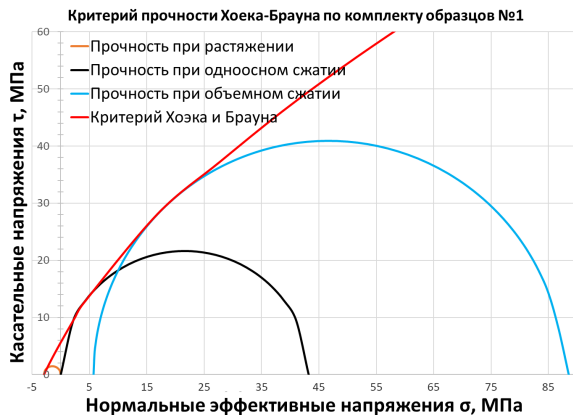


Рис. 3. Критерии прочности Хоека-Брауна для комплектов образцов №1 и №5

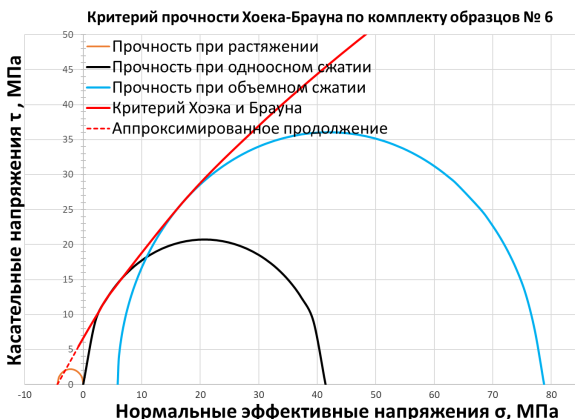


Рис. 4. Критерий прочности Хоека-Брауна для комплекта образцов №6

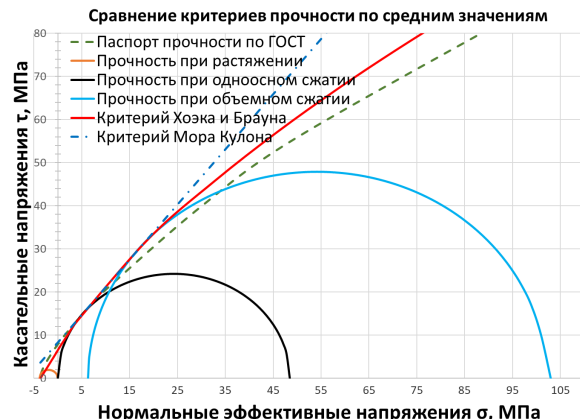


Рис. 5. Критерии прочности для средних по комплектам образцов значений пределов прочности

при численном моделировании свойств пород пашийского горизонта Ташлийарской площади Ромашкинского месторождения.

Литература

- ГОСТ Р 50544-93 (1993). Породы горные. Термины и определения. М: Госстандарт России; Изд-во стандартов, 47 с.
- ГОСТ 21153.8-88 (1988). Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. М: Изд-во стандартов, 15 с.
- ГОСТ 21153.5-88 (1988). Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием. М: Изд-во стандартов, 7 с.
- Coulomb C.A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Memoires de Mathematique et de Physique, presentes a l'Academie Royales Des Sciences*, 7, pp. 343-387.
- Hoek E., Brown E.T. (1980). Underground excavations in rock. London, The Institution of Mining and Metallurgy, 527 p.
- Kumar P. (1998). Shear Failure Envelope of Hoek-Brown Criterion for Rockmass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(4), pp. 453-458.
- Zoback M.D. (2010). Reservoir Geomechanics. Cambridge, Cambridge University Press, 461 p.

Статья поступила в редакцию 13.06.2019;

Принята к публикации 09.09.2019; Опубликована 01.12.2019

IN ENGLISH

Selection of optimal strength criteria for the terrigenous Pashiy horizon of the Romashkinskoe field Tashliyarskaya area

I.I. Girfanov^{1*}, M.M. Remeev¹, O.S. Sotnikov¹, A.A. Lutfullin², I.R. Muhliev³

¹TatNIPIneft Institute Tatneft PJSC, Bugulma, Russian Federation

²Tatneft PJSC, Almetyevsk, Russian Federation

³EOR and Workover Operations Center Tatneft PJSC, Almetyevsk, Russian Federation

*Corresponding author: Ildar I. Girfanov, e-mail: gii@tatnipi.ru

Abstract. In the process of oil reserves' development, the in-situ stresses change. Knowledge of rock failure constraints will allow prediction of behavior of rock when subject to subsurface stress change. In this study, we used the results of studies of the Pashiy sandstone core samples recovered from the Tashliyarskaya area well No. 14403. Six sets of samples, each consisting of three samples taken from the homogeneous intervals at the same depth, were used to determine the ultimate tensile strength, uniaxial and triaxial compressive strength in the in-situ conditions. An analysis of the methods for constructing a rock strength certificate, and comparison of the strength criteria described in State Standard 21153.8-88, the Mohr-Coulomb linear strength criterion and the non-linear Hoek-Brown criterion are provided. The Hoek-Brown criterion has the advantage of describing a non-linear increase in strength with an increase in overburden pressure and more adequately reflects the properties of rock. For the first time, a comparison of applicability of strength criteria obtained by different methods and based on the laboratory core analysis was made to determine their practical applicability. Comprehensive studies of the strength characteristics have never been previously conducted, and the results obtained will serve as the basis for further analysis and application in order to improve the development of the terrigenous Devonian Romashkinskoe field.

Keywords: failure criterion, strength certificate, Mohr-Coulomb failure criterion, Hoek-Brown failure criterion, ultimate stress, tensile, uniaxial compression, triaxial compression

Recommended citation: Girfanov I.I., Remeev M.M., Sotnikov O.S., Lutfullin A.A., Muhliev I.R. (2019). Selection of optimal strength criteria for the terrigenous Pashiy horizon of the Romashkinskoe field Tashliyarskaya area. *Georesursy = Georesources*, 21(4), pp. 114-118. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.114-118>

Manuscript received 13 June 2019;

Accepted 9 September 2019; Published 1 December 2019

Сведения об авторах

Ильдар Ильясович Гирфанов – младший научный сотрудник, отдел исследований скважин, коллекторов и углеводородов, Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть»
Россия, 423230, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, д. 32

Олег Сергеевич Сотников – канд. тех. наук, начальник отдела исследований скважин, коллекторов и углеводородов, Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть»
Россия, 423230, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, д. 32

Марат Марселевич Ремеев – заведующий сектором, отдел исследований скважин, коллекторов и углеводородов, Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть»
Россия, 423230, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, д. 32

Азат Абузарович Лутфуллин – канд. тех. наук, заместитель начальника Управления по разработке нефтяных и газовых месторождений, ПАО «Татнефть»
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, д. 75

Ильнур Рашитович Мухлиев – заместитель руководителя, Центр геолого-технических мероприятий ПАО «Татнефть»
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Тельмана, д. 88

References

- Coulomb C.A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Memoires de Mathematique et de Physique, presentes a l'Academie Royales Des Sciences*, 7, pp. 343-387.
- Hoek E., Brown E.T. (1980). Underground excavations in rock. London, The Institution of Mining and Metallurgy, 527 p.
- Kumar P. (1998). Shear Failure Envelope of Hoek-Brown Criterion for Rockmass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(4), pp. 453-458.
- State Standard R 50544-93 (1993). Rocks. Terms and Definitions. 47 p. (In Russ.)
- State Standard 21153.5-88 (1988). Rocks. Method for determination of shear strength limit. 7 p. (In Russ.)
- State Standard 21153.8-88 (1988). Rocks. Method for determination of triaxial compressive strength. 15 p. (In Russ.)
- Zoback M.D. (2010). Reservoir Geomechanics. Cambridge, Cambridge University Press, 461 p.

About the Authors

Ildar I. Girfanov – Junior Researcher, Core Analysis, PVT and Well Testing Department, TatNIPIneft Institute Tatneft PJSC
32, M.Djalil st., Bugulma, 423326, Russian Federation

Oleg S. Sotnikov – PhD, Head of Core Analysis, PVT and Well Testing Department, TatNIPIneft Institute TATNEFT PJSC
32, M.Djalil st., Bugulma, 423326, Russian Federation

Marat M. Remeev – Sector Leader, Core Analysis, PVT and Well Testing Department, TatNIPIneft Institute TATNEFT PJSC
32, M.Djalil st., Bugulma, 423326, Russian Federation

Azat A. Lutfullin – PhD, Deputy Head of Reservoir Engineering Department, Tatneft PJSC
75, Lenin st., Almetyevsk, 423400, Russian Federation

Ilnur R. Mukhliev – Deputy Head, EOR and Workover Operations Center Tatneft PJSC
88, Telman st., Almetyevsk, 423450, Russian Federation