

УДК 539.42

О НЕТИПИЧНОЙ ПРОЧНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ СЛАБОСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ПЕСЧАНИКОВ

© 2022 г. Академик РАН Д. М. Климов¹, В. И. Карев^{1,*}, Ю. Ф. Коваленко¹, К. Б. Устинов¹

Поступило 17.05.2022 г.

После доработки 18.07.2022 г.

Принято к публикации 21.07.2022 г.

В нескольких сериях независимых испытаний образцов сеноманских песчаников на установке истинно трехосного нагружения обнаружена прочностная анизотропия нетипичного вида, проявляющаяся в монотонном уменьшении прочности с уменьшением угла между максимальными сжимающими напряжениями и плоскостью, соответствующей напластованию. При анизотропии данного вида равнокомпонентное поле напряжений в массиве может вызвать вывалы на стенках скважин в двух противоположных направлениях. Подобные вывалы наблюдались при прямом физическом моделировании в образцах с отверстиями под действием равнокомпонентного сжатия. При анализе каротажных измерений наличие подобных вывалов в скважинах, как правило, интерпретируется как вызванное наличием неравнокомпонентного поля напряжений в массиве. Приведенные данные говорят о возможности иных интерпретаций.

Ключевые слова: анизотропия прочности, критерии разрушения, истинно трехосные испытания, интерпретация данных каротажа, вывалы в скважинах, измерения напряжений в массиве горных пород

DOI: 10.31857/S2686954322050137

1. ВВЕДЕНИЕ

Осадочные горные породы представляют собой гетерогенную среду, часто обладающую слоистой структурой, эффективные свойства которой описываются в приближении трансверсально изотропного континуума с плоскостью изотропии, параллельной напластованию. Обычно анизотропию прочности связывают с наличием площадок ослабления, параллельных слоистости [1–4]. При этом зависимость прочности при сжатии от угла между максимальными сжимающими напряжениями и плоскостью изотропии имеет минимум, соответствующий примерно 30 градусам, и два максимума, соответствующие максимальным сжимающим напряжениям, приложенным по нормали и вдоль данной плоскости, первый из которых обычно более ярко выражен [5, 4].

Учет прочностной анизотропии необходим при прогнозировании устойчивости скважин [6], а также используется при анализе данных о вывалах в скважинах в ходе их проводки и эксплуатации для оценки величин действующих в массиве напряжений [3, 7]. Однако, помимо этого, с обра-

зованием вывалов породы на стенках скважин связано проявление массивированного пескопроявления в газовых скважинах и скважинах подземных хранилищ газа, пробуренных в слабосцементированных песчаниках. Поэтому, чтобы минимизировать риск пескопроявлений и их интенсивность, необходимо разобраться в механизме появления вывалов в скважинах и понять, какие условия залегания и деформационно-прочностные свойства горных пород оказывают основное влияние на их возникновение.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ: ПРИБОРЫ, МАТЕРИАЛЫ, ИЗМЕРЕНИЯ

Эксперименты проводились на Испытательной системе трехосного независимого нагружения Института проблем механики РАН (ИСТНН) [8, 4]. Исследовались породы сеноманского горизонта пласта ПК1 газового и газоконденсатного месторождений Арктического шельфа России. Керновый материал представлял собой высокопроницаемый высокопористый песчаник со слабо выраженной структурой напластования. Керн был отобран из трех интервалов, в пределах каждого интервала свойства материала были однородными, свойства пород каждого из интервалов были также близки. Из керна для испытаний с высокой точностью вырезались кубические образцы с реб-

¹ Институт проблем механики Российской академии наук им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия

*E-mail: wikarev@ipmnet.ru

ром 40 мм, непараллельность граней не превышала 20 мкм. Для каждой серии опытов образцы по возможности изготавливались из одного куска керна.

Было проведено три типа испытаний. Первым типом были так называемые трехосные испытания, каждое из которых состояло из трех циклов. В данных опытах сначала к образцу прикладывалась равная по всем граням нагрузка, далее нагрузка по двум осям образца поддерживалась постоянной, а по третьей оси s_3 увеличивалась до уровня начала неупругого деформирования s_3^* , после чего напряжение по данной оси снижалось до исходного уровня. На втором цикле нагрузка по всем осям увеличивалась до следующего значения, далее шли нагружение по третьей оси до перехода к неупругому деформированию и разгрузка по ней до уровня равномерного обжатия. Аналогичным образом осуществлялось нагружение на третьем цикле, но уже при большем обжатии. Напряжение обжатия на циклах составляло 2, 10 и 20 МПа, либо 1, 5 и 10 МПа. В ходе опытов измерялись критические значения напряжения сжатия s_3^* по третьей оси для трех величин всестороннего обжатия, также определялись упругие характеристики. Опыты данного типа проводились для трех направлений максимального напряжения s_3 относительно плоскости залегания породы: вдоль нее, по нормали и под углом 45° .

Второй тип испытаний соответствовал воссозданию в образцах напряженного состояния на контуре горизонтальной скважины. В данном типе опытов на первом этапе образец доводился до состояния всестороннего сжатия, соответствующего исходному напряжению от горного давления, действующему на грунтовый скелет. На втором этапе по одной из осей напряжение (s_2) продолжало увеличиваться, по другой (s_3) — уменьшаться на ту же величину, по третьей (s_1) — сохранялось постоянным: образец приводился в состояние, когда скважина пробурена и давление в ней равно пластовому. На третьем этапе моделировалось уменьшение давления на забое скважины путем роста компоненты напряжений s_2 , соответствующей кольцевому напряжению. Образцы вырезались и нагружались так, чтобы угол между максимальным сжимающим напряжением и нормалью к залеганию породы составлял для различных образцов 0° , 30° , 45° и 90° (что соответствовало состоянию в точках контура горизонтальной скважины, отстоящих от вертикальной оси на соответствующий угол). Подробно данный тип испытаний и программы нагружения описаны в [4]. В ходе этих опытов определялась величина давления на забое скважины, при которой в данной точке контура горизонтальной скважины начиналось разрушение.

Третий тип испытаний состоял в прямом моделировании вывалов в скважинах. Для этого в каждом образце, параллельно плоскости залегания породы, просверливалось центральное сквозное отверстие диаметром 10 мм. Во время испытаний поток воздуха с избыточным давлением 0.01–0.02 МПа подавался в отверстие в образце через коаксиальный канал диаметром 9 мм в нагружающей плите. Поток воздуха выводился через аналогичный канал в противоположной нагружающей плите. Нагружение осуществлялось согласно одному из трех вариантов. В первом варианте прикладывалась одинаковая нагрузка по всем трем осям. Второй вариант состоял в воспроизведении условий, близких к условиям плоской деформации: образцы нагружали, как в предыдущем варианте, до напряжений, приблизительно соответствующих горному давлению, затем напряжения вдоль сторон, параллельных оси отверстия, увеличивались, а на гранях, нормальных оси отверстия, сохранялись постоянными. Третий вариант соответствовал условию плоского напряженного состояния: нагрузка прикладывалась к боковым граням образца, а грань с отверстием оставалась свободной, что позволяло осуществлять видеозапись процесса образования вывала. Поток воздуха в образец в этом случае не подавался, таким образом, исключался фактор влияния потока на форму образующегося вывала. Во всех вариантах, во избежание возникновения касательных напряжений, способных привести к изменению конфигурации вывалов, образцы разгружались одновременно по всем осям.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Было испытано 40 образцов: 12 образцов по программе трехосных испытаний; 20 образцов по программе, моделирующей напряженное состояние в различных точках контура горизонтальной скважины при уменьшении давления на ее забое; на 8 образцах осуществлялось прямое моделирование вывалов.

Основные результаты испытаний двух серий из трех образцов по программе трехосных опытов представлены в табл. 1. Образцы были вырезаны из двух кусков керна, отобранных из интервалов 1 и 2 соответственно. Значения максимальных сжимающих напряжений в зависимости от угла их приложения относительно залегания в серии опытов второго типа представлены в табл. 2. Представленные в табл. 2 результаты получены на образцах, вырезанных из одного куска керна интервала 2.

При прямом моделировании вывалов в горизонтальной скважине во всех случаях наблюдалось образование вывалов, ориентированных вдоль оси керна, т.е. перпендикулярно плоскости

Таблица 1. Результаты трехосных испытаний

	Интервал 1				Интервал 2			
	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \cdot 10^{-3}$ МПа	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \cdot 10^{-3}$ МПа
0°	1	1	18.2	1.9	1	1	14	1.6
	2	5	29	3.3	2	5	26	2.7
	3	10	38.2	4.1	3	10	36	4.0
90°	1	1	20	2.1	1	1	22	2.4
	2	5	30	4.1	2	5	34	4.0
	3	10	42	5.4	3	10	45	4.4
45°	1	1	24	2.4	1	1	23	2.3
	2	5	38	4.1	2	5	33	3.8
	3	10	49	5.3	3	10	44	4.3

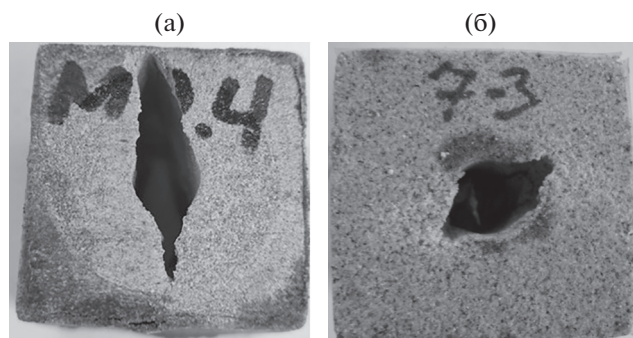
Таблица 2. Результаты испытаний по программе, моделирующей напряженное состояние на контуре горизонтальной скважины

Угол между максимальными напряжениями и плоскостью залегания, град	0	30	45	90
Предельное максимальное напряжение s_2 , МПа	29.5	34.2	34.7	40.1

залегания. Типичный результат представлен на фото рис. 1а. Отличий в форме вывалов в случае всестороннего трехосного сжатия и двухосного нагружения в условиях, близких к условиям плоской деформации, не выявлено. Опыты в условиях плоского напряженного состояния продемонстрировали образование вывалов при более низких значениях напряжений, а также появление сквозных трещин, параллельных свободной границе, наряду с вывалами, наблюдаемыми в других испытаниях. Отметим, что подобные формы вывалов в условиях равнокомпонентного нагружения образцов наблюдались в экспериментах, проводимых на ИСТНН и ранее. Так, на рис. 1б представлена фотография образца песчаника, отобранного из юрских отложений, после проведения подобного теста. Интересно отметить, что в этом образце отверстие было ориентировано

вдоль оси керна (по нормали к плоскости залегания) и ориентация вывала не связана с направлением напластования. Подобные формы разрушения вблизи отверстий при сходных условиях нагружения наблюдались ранее также в образцах угля [9].

Две независимых серии экспериментов, а именно моделирование напряженного состояния в различных точках контура горизонтальной скважины и трехосные испытания, продемонстрировали наличие анизотропии прочности исследуемых пород, проявляемой в монотонном изменении предельных напряжений при изменении угла между направлением приложения максимальных сжимающих напряжений и плоскостью залегания породы. При этом максимум соответствовал сжатию, приложенному по нормали к данной плоскости, а минимум соответ-

**Рис. 1.** Отверстия с вывалами после испытания образцов из месторождения: (а) сеноманский песчаник, отверстие вдоль плоскости залегания; (б) юрский песчаник, отверстие по нормали к плоскости залегания.

ствовал сжатию вдоль данной плоскости. В опытах по прямому моделированию разрушения вокруг цилиндрического отверстия разрушения наблюдались именно в точках, соответствующих минимальной прочности.

Полученный результат, состоящий в монотонном изменении прочности породы при изменении угла между направлением действия максимальных сжимающих напряжений и плоскостью залегания, достаточно неожиданен. Дело в том, что проявление анизотропии прочности горных пород обычно связывают исключительно с наличием в породе плоскостей ослабления, обусловленных обычно наличием напластования в плоскостях залегания [2, 3]. В этом случае наименьшая прочность должна отвечать точкам, где преобладают напряжения сдвига вдоль плоскостей ослабления, что соответствует, в зависимости от коэффициента внутреннего трения, углам около 30° . В описанных выше опытах подобного не наблюдалось.

Возможность проявления обнаруженного типа прочностной анизотропии в породах необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации скважин для предотвращения разрушения и пескопроявлений, а также при анализе скважинных измерений, поскольку наличие несимметричных вывалов, подобно наблюдаемым в описанных экспериментах, как правило, трактуется как вызванное наличием неравнокомпонентного поля напряжений [7], подобная интерпретация может быть не всегда верной.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При испытаниях образцов слабосцементированных песчаников обнаружена прочностная анизотропия нетипичного вида, проявляющаяся в монотонном уменьшении прочности с уменьшением угла между максимальными сжимающими напряжениями и плоскостью залегания породы. Для сеноманских песчаников данный феномен наблюдался в нескольких сериях независимых опытов с использованием различных программ нагружения.

Анизотропия данного вида способна вызывать вывалы в скважинах, направленные в двух противоположных направлениях, под действием равнокомпонентного поля напряжений в массиве. Появление подобных вывалов наблюдалось при прямом физическом моделировании на образцах с отверстиями под действием равнокомпонентного сжатия как исследуемых сеноманских песчаников, так и других пород.

Поскольку появление подобных вывалов в скважинах и их направление при анализе коротажных измерений, как правило, интерпретируется как вызванное наличием неравнокомпо-

нентного поля напряжений в массиве и используется для определения их ориентации и величины, полученные данные заставляют по-иному взглянуть на проблему интерпретации скважинных измерений: по крайней мере, заставляют учитывать возможность иных интерпретаций, кроме различия в величинах действующих напряжений.

Наличие прочностной анизотропии, особенно данного типа, необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации скважин с целью снижения риска разрушения и предотвращения или минимизации пескопроявлений, вызванных разрушением породы. В особенности это относится к слабосцементированным высокопроницаемым породам коллекторов газовых, газоконденсатных месторождений, пластов-объектов хранения газа ПХГ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-11-00273.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goodman R.E.* Introduction to rocks mechanics. New York, John Wiley and Sons, 1980. 478 p.
2. *Germanovich L.N., Galybin A.N., Dyskin A.V., Mokhel A.N., Dunayevsky V.* Borehole stability in laminated rock. In G. Barla (Ed.) // Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, CRC Press/Balkema. Torino, Italy ed, 1996. V. 2. P. 767–776.
3. *Zoback M.D.* Reservoir Geomechanics. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. 443 p. ISBN-978-0-521-77069-9. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>
4. *Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K.* Geomechanics of Oil and Gas Wells Springer. 2020. 184 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26608-0>
5. *Singh M., Samadhiya N.K., Kumar A., Kumar V., Singh B.* A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks // Rock Mech. and Rock Eng. 2015. V. 48 (4). P. 1387–1405.
6. *Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Y.F., Ustinov K.B.* Mechanic almathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media // Mechanics of Solids. 2013. V. 48 (4). P. 357–363. <https://doi.org/10.3103/S0025654413040018>
7. *Zang A., Stephansson O.* Stress field of the earth's crust. Dordrecht, Springer, 2010. 322 p.
8. *Karev V.I., Kovalenko Yu.F.* Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production, True Triaxial Testing of Rocks, Leiden, CRC Press. Balkema. 2013. P. 301–310.
9. *Kaiser P.K., Guenot A., Morgenstern N.R.* Deformation of small tunnels. IV. Behaviour during failure // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1985. V. 22: 141–152.

ON THE ATYPICAL STRENGTH ANISOTROPY OF WEAKLY CEMENTED SANDSTONES

Academician of the RAS D. M. Klimov^a, V. I. Karev^a, Yu. F. Kovalenko^a, and K. B. Ustinov^a

^a Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

An atypical strength anisotropy manifesting itself in a monotonous decrease in strength with a decrease in the angle between the maximum compressive stresses and the plane corresponding to the bedding was found in several series of independent tests of samples of Cenomanian sandstones on a true triaxial loading facility. An equal component stress field in the massif can cause breakouts on wells walls in two opposite directions. Such breakouts were observed in direct physical modeling in samples with holes under the action of equal component compression. Such breakouts in wells is usually interpreted in the analysis of logging measurements, as caused by the presence of an unequal component stress field in the rock mass. The data given indicate the possibility of other interpretations.

Keywords: strength anisotropy, failure criteria, true triaxial tests, interpretation of logging data, borehole breakouts, stress measurements in rock mass