

УДК 539.42

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ НА ОРИЕНТАЦИЮ ВЫВАЛОВ В СКВАЖИНАХ

© 2023 г. К. Б. Устинов^а, В. И. Карев^а, Ю. Ф. Коваленко^{а,*},
С. О. Барков^а, В. В. Химуля^а, Н. И. Шевцов^а

^аИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

*e-mail: perfolinkgeo@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.09.2022 г.

После доработки 28.09.2022 г.

Принята к публикации 29.09.2022 г.

На образцах породы, отобранных из сеноманского горизонта пласта ПК1 газового и газоконденсатного месторождений Арктического шельфа России, проведено прямое физическое моделирование образования под действием равнокомпонентных напряжений вывалов в скважинах, направленных по нормали и вдоль залегания. В первом случае форма вывалов была цилиндрической, а во втором – в виде двух каверн. Подобная форма вывалов при интерпретации геофизических исследований скважин, как правило, предполагается вызванной неравнокомпонентным полем напряжений, что, очевидно, не соответствует результатам проведенных экспериментов. Также проведены независимые эксперименты по определению анизотропии упругих и прочностных свойств исследуемой породы. Обнаружено, что исследуемая порода обладает прочностной анизотропией специфического вида, не связанной непосредственно с ослаблением вдоль залегания. Показано, что данный вид прочностной анизотропии может приводить к формированию вывалов наблюдаемой формы. Основная цель статьи – привлечь внимание к тому факту, что анизотропия напряжений не обязательно является основной или единственной причиной наблюдаемых вывалов в скважинах. Результаты могут быть использованы при проектировании и разработке углеводородных месторождений и подземных хранилищ газа, а также при интерпретации данных скважинных измерений для определения естественного поля напряжений в Земной коре.

Ключевые слова: истинные трехосные испытания, анизотропия прочности, упругая анизотропия, интерпретация данных каротажа, вывалы в скважинах, измерения напряжений в массиве пород

DOI: 10.31857/S0572329922600384, EDN: FRYKBE

1. Введение. При бурении и эксплуатации скважин подземных хранилищ газа (ПХГ), созданных в пластах с неустойчивыми коллекторами, на первый план выходят вопросы обеспечения устойчивости стенок скважин и снижения пескопроявлений. Известно, что основной причиной выноса песка в скважину является потеря устойчивости стенки скважины под действием напряжений в околоскважинной области, превышающих предел прочности породы. Одним из основных типов потери устойчивости являются вывалы породы на стенках скважин [1–3].

Поэтому, чтобы минимизировать риск пескопроявлений и их интенсивность, необходимо понимать причины появления вывалов и выявить основные факторы, влияющие на их возникновение и интенсивность.



Рис. 1. Образец В5 с отверстием, соосным оси керна.

Помимо этого, исследование форм вывалов наряду с методами микрогидроразрыва считается надежным инструментом для определения напряжений в массиве горных пород [4, 5]. Это явно подразумевает, что неравенство компонент тензора напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной стволу скважины, является основной и едва ли не единственной причиной формирования форм вывалов, отличных от цилиндрических, наблюдаемых в скважинах. М. Зобак рассмотрел влияние других факторов, таких как анизотропия прочности и наличие структуры, на формирование вывалов [4]. Однако чаще другие факторы, в лучшем случае, лишь упоминаются [5, 6]. В настоящее время объяснение наблюдаемых форм вывалов в скважинах исключительно неравнокомпонентностью действующих напряжений стало основой интерпретации каротажных измерений.

В вертикальных скважинах, пробуренных в массивах горных пород либо изотропных, либо анизотропных с плоскостью изотропии, перпендикулярной оси скважины, в условиях равнокомпонентного сжатия наблюдаются кольцевые вывалы [4, 5], Рис. 1. При неравнокомпонентном исходном напряженном состоянии из-за концентрации сжимающих напряжений [7] вывалы развиваются от контура скважины по ее диаметру в направлении минимального горизонтального напряжения. Формы таких вывалов характеризуются как чешуйчатые отколы (системы изогнутых трещин, распространяющихся параллельно контуру скважины), “собачьи уши” (широкие вывалы), “червоточины” (узкие разрезоподобные вывалы) [5]. Вышеуказанные формы можно назвать однолопастными, в отличие от двухлопастных вывалов [6], характерных для скважин, ориентированных в плоскостях напластования, появившихся из-за анизотропии прочности, вызванной ослаблением вдоль залегания [4, 8, 9]. Термины одно- и двухлопастные вывалы являются общепринятыми [4], количество “лопастей”-вывалов относится к половине контура скважины.

Однако однолопастные вывалы наблюдались и в образцах с моделирующими скважину круговыми отверстиями, находящихся в равнокомпонентном напряженном состоянии [10, 11]. Так, в работе [11] было проведено прямое физическое моделирование вывалов скважин для пород-коллекторов четырех нефтяных и газоконденсатных месторождений. Было продемонстрировано, что для двух из четырех испытанных пород

в большинстве образцов наблюдались некруглые вывалы вокруг отверстий, просверленных в образцах перпендикулярно залеганию, хотя в этих условиях из-за предполагаемой изотропии упругих и прочностных свойств в плоскости залегания ожидалось образование кольцевых вывалов. Также при испытании образца с отверстием, просверленным в плоскости залегания, наблюдался однолопастный вывал, а не кольцевой или двухлопастный, как ожидалось в соответствии с общепринятыми представлениями [4, 8]. Ранее также сообщалось о формировании подобных однолопастных вывалов, хотя они и не назывались таковыми, в образцах угля с цилиндрическими отверстиями [10]. Для объяснения наблюдаемого явления было предложено несколько гипотез [11]:

– Комбинированное влияние прочностной и упругой анизотропии определенного типа.

– Нестабильность круглой формы вывалов из-за случайного изменения свойств породы и подавления образования вторичных вывалов после инициирования первичных.

– Особый тип анизотропии прочности, проявляющийся в виде монотонного изменения прочности от угла приложения нагрузки с максимумом, соответствующим сжатию, нормальному к плоскости залегания, и минимуму, соответствующему сжатию, параллельному плоскости залегания.

Однако имевшихся экспериментальных данных об упругих и прочностных свойствах исследованных пород, таких как модули Юнга, коэффициенты Пуассона и прочностные свойства в двух направлениях (нормальном и вдоль плоскости залегания), было недостаточно для проверки данных гипотез.

Чтобы заполнить пробел в понимании процессов, приводящих к образованию однолопастных вывалов, на испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) были проведены новые аналогичные эксперименты на образцах породы из кернового материала, отобранного из сеноманского горизонта пласта ПК1 газового и газоконденсатного месторождений Арктического шельфа России, а также эксперименты по определению упругих и прочностных свойств исследуемой породы, необходимых для проверки предложенных гипотез.

2. Эксперименты: приборы, материалы, измерения. Эксперименты проводились на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН), созданной в Институте проблем механики Российской академии наук и предназначенной для исследования деформационных, прочностных и фильтрационных свойств горных пород гидрокарбонатных и угольных месторождений [12–15] в условиях истинного трехосного нагружения. Испытания проводятся на кубических образцах с ребром 40 мм. Узел нагружения благодаря используемой кинематике с перекрывающимися нагружающими плитами позволяет передавать напряжения на всю поверхность образцов, не создавая препятствий друг другу. Для уменьшения трения между каждой гранью образца и нагружающими плитами вставлялись тонкие фторопластовые прокладки. В прокладках, закрывающих поверхности с отверстиями, вырезались центральные отверстия диаметром 10 мм.

Образцы были изготовлены из кернового материала, отобранного из трех интервалов, около 10 м каждый. Керновый материал был представлен высокопористым высокопроницаемым сеноманским песчаником со слабо выраженной структурой напластования. В пределах каждого интервала свойства материала были однородными, причем различия свойств породы между различными интервалами были также относительно невелики. Чтобы уменьшить влияние побочных эффектов для каждой серии экспериментов, образцы по возможности вырезали из одного куска керна.

Образцы были изготовлены с использованием камнерезных и шлифовальных станков с высокой точностью, непараллельность граней составляла не более 20 мкм. Боль-

шинство из образцов были вырезаны параллельно оси керна, но отдельные образцы были вырезаны под углами 30° , 45° и 60° к оси керна.

Для образцов применена следующая маркировка. Первая буква А, В или С соответствует одному из трех интервалов. Затем следует число, соответствующее номеру куска породы, из которого был вырезан образец. Последнее число (если таковое имеется) соответствует номеру образца, вырезанного из данного куска керна.

Перед нагружением в каждом образце были измерены продольные скорости акустических волн в трех направлениях.

Было проведено три типа испытаний. В испытаниях первого типа осуществлялось прямое моделирование вывалов в скважинах. В этом типе экспериментов в центре каждого образца, параллельно его грани, просверливалось сквозное отверстие диаметром 10 мм. Образцы с центральными сквозными отверстиями помещались в нагружающий узел установки с двумя (из шести) противоположными нагружающими плитами, имеющими центральные каналы для подачи и отбора воздуха. Было использовано три варианта нагружения. В первом варианте (далее – испытания “полый цилиндр”) нагрузка, одинаковая по всем трем осям, прикладывалась с постоянной скоростью (31.25 кПа/с). Второй вариант (далее – испытания “полый цилиндр-2”) состоял в воспроизведении условий, близких к условиям плоской деформации: образцы нагружали, как в предыдущем варианте, до напряжений, приблизительно соответствующих действующим в глубине пласта в грунтовом скелете (15 МПа), затем нагружение вдоль сторон, параллельных оси отверстия, продолжалось с той же скоростью, в то время как на гранях, перпендикулярных оси отверстия, сохранялись постоянные напряжения. Третий вариант (далее – испытания “полый цилиндр-0”), соответствовал условию плоского напряженного состояния: к боковым граням кубического образца прикладывалась двухосная нагрузка; грань с отверстием оставалась свободной, что позволяло осуществлять видеозапись процесса образования вывала. Поток воздуха в образец в этом случае не подавался.

Большинство испытаний данного типа проводились на образцах с отверстиями, ориентированными вдоль залегания, моделирующими горизонтальные скважины; некоторые испытания проводились с отверстиями, нормальными к залеганию, а также ориентированными под углами 30° и 60° к нормали к залеганию, моделирующими вертикальные и наклонные скважины (далее испытания полый цилиндр- ν , полый цилиндр-2- ν , полый цилиндр- 30° и полый цилиндр- 60° соответственно). Во всех вариантах образцы разгружались одновременно по всем осям (чтобы избежать возникновения касательных напряжений, способных привести к изменению конфигурации вывалов).

Вторым типом испытаний были трехосные испытания. В данном типе экспериментов на первом этапе к образцу прикладывалась гидростатическая (одинаковая по всем граням) нагрузка (давление обжима). Затем нагрузка по двум осям образца поддерживалась постоянной, а нагрузка по третьей оси S_3 увеличивалась, причем управление нагружением образца по данной оси на этом участке осуществлялось по перемещению, а не по нагрузке. Нагружение по данной оси доводилось до уровня начала неупругого деформирования S_3^* , а затем осуществлялась разгрузка образца по данной оси до исходного уровня напряжений. Далее нагрузка по всем осям увеличивалась до следующего значения, и цикл нагружения по третьей оси (той же что и в предыдущем цикле) повторялся. Далее аналогичным образом осуществлялось нагружение на третьем цикле. Затем образец разгружался. Таким образом, каждый опыт состоял из трех циклов, отвечающих трем значениям всестороннего обжима образца. Первоначально напряжение обжима по циклам для части образцов составляло 2 МПа, 10 МПа и 20 МПа, но затем, в связи с малой прочностью исследуемых пород, оно было уменьшено до 1 МПа, 5 МПа и 10 МПа.

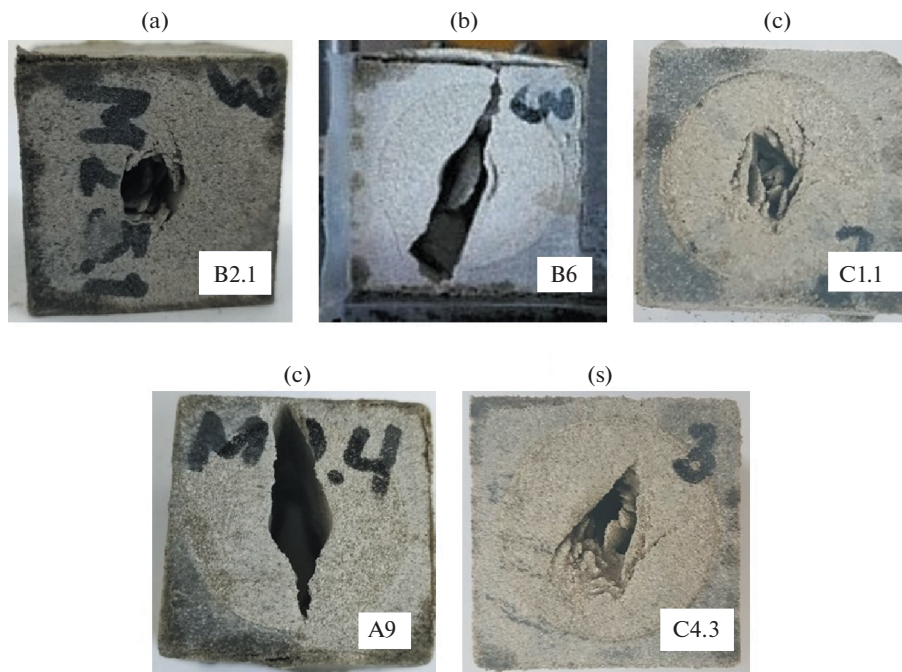


Рис. 2. Отверстия с вывалами после испытания образцов из месторождения № 1 в образцах с отверстиями, перпендикулярными оси керна; образцы вырезаны соосно оси керна (ось керна вертикальна на рисунках), а–d; образец вырезан наклонно к оси керна (ось керна наклонена на 30° от вертикали), e.

Опыты второго типа проводились для трех направлений действия максимального сжимающего напряжения S_3 относительно плоскости залегания – вдоль нее, по нормали и под углом 45° к ней. Целью таких экспериментов было выяснение характера изменения прочности породы в зависимости от угла приложения максимальной нагрузки по отношению к залеганию. При реализации механизма прочностной анизотропии, связанного с наличием плоскостей ослабления вдоль залегания, прочность породы при приложении нагрузки под углом к залеганию должна быть меньше, чем при приложении нагрузки параллельно или по нормали к залеганию. Дополнительной целью данных экспериментов было получение упругих характеристик породы, в частности упругих модулей по различным направлениям.

Испытания такого типа будут называться “трехосными”, за которыми следует значение (в градусах) угла между максимальными сжимающими напряжениями и направлением залегания.

Третий тип экспериментов заключался в прямом моделировании напряженно-деформированных состояний, возникающих в различных точках контура горизонтальной скважины при понижении давления на ее забое, и изучении процесса разрушения породы в этих точках под действием создаваемых напряжений. В ходе опытов моделировались напряженно-деформированные состояния в точках, отстоящих от вертикальной оси на 0° , 30° , 45° и 90° , в которых постоянное по величине максимальное окружное сжимающее напряжение, действующее вдоль данного контура отверстия, по-разному наклонено к плоскости залегания. Еще одной целью данных экспериментов, как и “трехосных” опытов, было получение дополнительных данных о характере обнаруженной прочностной анизотропии исследуемых пород.

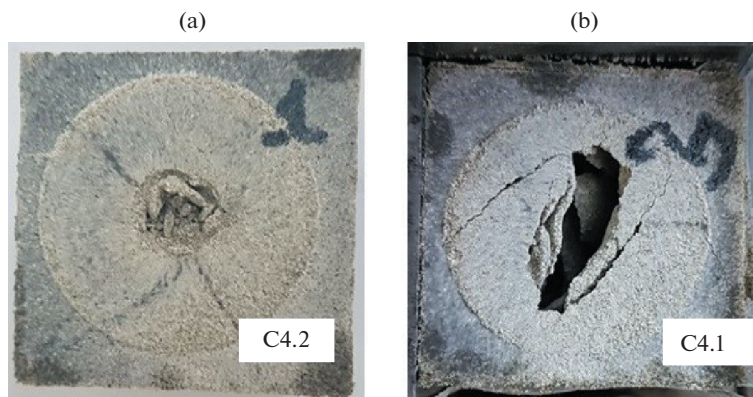


Рис. 3. Отверстия с вывалами после испытания образцов из месторождения № 1 в образцах с отверстиями, наклоненными к оси керна; на 30° а); на 60° б).

Помимо моделирования напряженно-деформированного состояния на контуре горизонтальной скважины, был выполнен один эксперимент по моделированию состояния на контуре вертикальной скважины. В данном случае, поскольку скважина перпендикулярна плоскости залегания, все точки на контуре скважины находятся в равных условиях.

Испытания такого типа будут называться “скважиной”, за которыми следует значение (в градусах) угла между максимальными сжимающими напряжениями и направлением залегания. Таким образом, “скважина 0° ” соответствует образцам, моделирующим верхнюю (нижнюю) точку горизонтальной скважины, “скважина- 90° ” соответствует образцам, моделирующим левую (правую) точку горизонтальной скважины, “скважина- 30° ” и “скважина- 45° ” соответствуют образцам, моделирующим точки горизонтальной скважины, расположенные под углом 30° и 45° от вертикали, соответственно. Опыт, моделирующий напряженное состояние, возникающее на контуре вертикальной скважины, будет называться “скважина- v ”.

Подробное описание программы испытаний образцов в ходе выполнения опытов “скважина” представлено ниже в Приложении.

3. Результаты экспериментов и обсуждение. Всего было испытано 48 образцов: 15 образцов в соответствии с программой “полый цилиндр”, 21 образец в соответствии с программой, моделирующей напряженное состояние, возникающее в различных точках вдоль контура скважины (“скважина”), трехосные испытания (“трехосные”) были выполнены на 12 образцах. Информация об испытаниях и некоторые результаты обобщены в таблице 1. Столбец “Результаты” для образцов, подвергнутых трехосным испытаниям, разделен на три подколоники, в которых представлены напряжения сжатия, приложенные к боковым граням, предельные напряжения, приложенные к третьей грани, и касательный (дифференциальный) модуль Юнга в направлении максимальной нагрузки для каждого из трех циклов соответственно. Для испытаний “скважина”, моделирующих напряженное состояние в определенных точках контура скважины, в столбце “Результаты” указано максимальное сжимающее напряжение, соответствующее окружному напряжению в этой точке. Для испытаний типа “полый цилиндр” в колонке “Результаты” указаны формы вывалов и приведены ссылки на соответствующие рисунки.

Первая серия испытаний была проведена на образцах, вырезанных соосно оси керна (отверстия также были выполнены соосно) при равнокомпонентной нагрузке.

Таблица 1.

N	Образец	Вид испытания. Угол максимального сжатия к залеганию		Результат			
				цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа
1	A2.3	скважина-0	0°	$s_2 = 23.0$ МПа			
2	A2.2	скважина-90	90°	$s_2 = 27.6$ МПа			
3	A3.1	трехосный-0	0°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа
				1	2	14.6	1.1
				2	10	29.5	1.8
4	A4	трехосный-90	90°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа
				1	2	19.6	1.48
				2	10	35.4	3.42
5	A7	полый цилиндр-2-v	0°	Цилиндрический вывал			
				Однолопастные вывалы (рис. 2, d)			
				$s_2 = 27.0$ МПа			
6	A9	полый цилиндр-2	90°	Цилиндрический вывал			
				Однолопастные вывалы (рис. 2, a)			
				$s_2 = 31.2$ МПа			
7	V.1.1	скважина-0	0°	Цилиндрический вывал			
8	V.1.2	скважина-90	90°	Цилиндрический вывал (рис. 1)			
9	V.2.1	полый цилиндр-2	0°	Однолопастные вывалы (рис. 2, b)			
10	V.2.2	полый цилиндр-2-v	0°	Однолопастные вывалы (рис. 2, b)			
11	V.5	полый цилиндр-2-v	0°	Однолопастные вывалы (рис. 2, b)			
12	V.6	полый цилиндр-2	0°	Однолопастные вывалы (рис. 2, b)			
13	V.9.2	трехосный-0	0°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа
				1	1	12.0	1.26
				2	5	22.0	2.9
14	V.9.1	трехосный-90	90°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа
				1	1	21.6	1.96
				2	5	35.4	3.39
15	V.10.2	скважина -0	0°	$s_2 = 26.5$ МПа			
				$s_2 = 29.9$ МПа			
				Однолопастные вывалы (рис. 2, c)			
16	V.10.1	скважина 1-90	90°	Однолопастные вывалы (рис. 2, c)			
17	C.1.3	трехосный-0	0°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа
				1	1	12.1	1.35
				2	5	22.8	3.4
18	C.1.4	трехосный-45	45°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа
				1	1	16	1.9
				2	5	29	3.2
19	C.1.1	полый цилиндр	0°	Однолопастные вывалы (рис. 2, c)			
				Цилиндрический вывал			
				$s_2 = 29.6$ МПа			
20	C.1.2	полый цилиндр-v	0°	Цилиндрический вывал			
21	C.1.6	скважина-0	0°	$s_2 = 29.6$ МПа			
22	C.1.5	скважина-90	90°	$s_2 = 37.5$ МПа			
23	C.3.1	полый цилиндр-0	0°	Однолопастные вывалы (видео)			
24	C.3.2	полый цилиндр-0	0°	Однолопастные вывалы (видео)			

Таблица 1. Окончание

N	Образец	Вид испытания. Угол максимального сжатия к залеганию		Результат					
				цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа		
25	C4.1	полый цилиндр- v		Однолопастные вывалы (рис. 3, b)					
26	C4.2			Цилиндрический вывал (рис. 3, a)					
27	C4.3			Однолопастные вывалы (рис. 2, e)					
28	C4.5	скважина-0	0°	$s_2 = 29.6$ МПа					
29	C4.4	скважина-90	90°	$s_2 = 36.1$ МПа					
30	C2.4	трехосный-0	0°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа		
				1	1	14	1.6		
				2	5	26	2.7		
				3	10	36	4.0		
31	C2.3			трехосный-90	90°	1	1	22	2.4
						2	5	34	4.0
		3	10			45	4.4		
32	C2.5	трехосный-45	45°	1	1	23	2.3		
				2	5	33	3.8		
				3	10	44	4.3		
33	C2.1	скважина-0	0°	$s_2 = 29.5$ МПа					
34	C2.6	скважина-30	30°	$s_2 = 34.2$ МПа					
35	C2.5	скважина-45	45°	$s_2 = 34.7$ МПа					
36	C2.2	скважина-90	90°	$s_2 = 40.1$ МПа					
37	C5.1	скважина-0	0°	$s_2 = 29.5$ МПа					
38	C5.2	скважина-90	90°	$s_2 = 39.5$ МПа					
39	C5.3	скважина-90	90°	$s_2 = 37.0$ МПа					
40	C5.4	скважина-0	0°	$s_2 = 30.6$ МПа					
41	C6.3	трехосный-0	0°	цикл	$s_1 = s_2$ МПа	s_3 МПа	$E \times 10^{-3}$ МПа		
				1	1	18.2	1.9		
				2	5	29	3.3		
				3	10	38.2	4.1		
42	C6.1			трехосный-90	90°	1	1	20	2.1
						2	5	30	4.1
		3	10			42	5.4		
43	C6.4	трехосный-45	45°	1	1	24	2.4		
				2	5	38	4.1		
				3	10	49	5.3		
44	C6.5	полый цилиндр-0		Однолопастные вывалы (видео)					
45	C6.6	полый цилиндр-0		Однолопастные вывалы (видео)					
46	C7.1	скважина- v	0°	$s_2 = 33.4$ МПа					
47	C7.4	скважина-0	0°	$s_2 = 29.5$ МПа					
48	C7.3	скважина-90	90°	$s_2 = 34.3$ МПа					

Во всех трех случаях наблюдалось образование цилиндрических вывалов осесимметрично по всему контуру отверстия. Фотография образца В5 после проведения испытания представлена на рис. 1.

Вторая серия испытаний проводилась на образцах с отверстиями, направленными перпендикулярно оси керна (вдоль залегания). Четыре образца были вырезаны соосно оси керна. Чтобы гарантировать, что образование и ориентация вывалов вызваны структурой образца, а не артефактами, возможно, связанными с нагружающим устройством или формами образцов, пятый образец был вырезан под углом 30° к оси керна, при этом отверстие было сделано также вдоль залегания. Фотографии отверстий с вывалами представлены на рис. 2, а-е. На фотографиях видно, что во всех образцах вывалы ориентированы вдоль оси керна (перпендикулярно залеганию), включая случай, когда грани образца наклонены к плоскости залегания, рис. 2, е. Подобные виды вывалов обычно предполагаются вызванными неравнокомпонентным напряженным состоянием: случаи (а, с, d) выглядят как отколы чешуек, хотя нижнюю часть вывала в случае (е) можно рассматривать и как двухлопастную; случаи (b, d) близки к “собачьему уху” или даже к вывалам типа “червоточин” [5]. Однако в нашем случае нагрузка была гидростатической. Максимальное отклонение от вертикальной оси (около 15°) наблюдается для образца на рис. 1, b; причина этого отклонения может быть связана с тем, что залегание не обязательно всегда перпендикулярно оси керна, или из-за статистического разброса прочностных свойств.

Эксперименты не выявили отличия в форме вывалов в случае всестороннего трехосного сжатия и двухосного нагружения в условиях плоской деформации.

Результаты экспериментов в условиях плоского напряженного состояния с одной из граней, свободной от нагрузки, продемонстрировали, как и следовало ожидать, образование вывалов при более низких значениях напряжений, а также некоторое изменение характера разрушения, а именно: наряду с однолопастными вывалами, наблюдаемыми в других испытаниях, появление сквозных трещин, параллельных свободной грани. Результаты видеосъемки доступны в [16]. Кроме того, отсутствие подачи воздуха через образец в данных экспериментах исключило воздушный поток из числа гипотетических причин формирования наблюдаемых форм вывалов.

Третья серия испытаний была проведена на образцах с отверстиями, наклоненными к оси керна под углами 30° и 60° . В первом случае вывал был осесимметричным, аналогично случаю отверстия, совпадающего с осью керна, во втором случае вывал распространяется нормально к проекции плоскости залегания, как в случае отверстия, лежащего в плоскости залегания.

Основные результаты испытаний, моделирующих напряженное состояние, возникающее в различных точках вдоль контура скважины при понижении давления на ее забое, а также трехосных испытаний обобщены в таблице 1.

Для каждой пары образцов А2.3, А2.2; В1.1, В1.2; В10.2, В10.1; С1.6, С1.5; С4.5, С4.4, моделирующих напряженное состояние в верхней (нижней) и левой (правой) точках контура горизонтальной скважины соответственно, предельные напряжения всегда были выше в последнем случае. То же самое наблюдалось для четырех образцов С5.1, С5.4, С5.2, С5.3. Для образцов С2.1, С2.6, С2.5, С2.2, соответствующих точкам вдоль контура горизонтальной скважины, расположенным на расстоянии 0° , 30° , 45° и 90° от вертикали соответственно, предельное напряжение монотонно возрастало с увеличением угла. Серия испытаний на образцах С7.1, С7.4, С7.3 демонстрирует, что предельное напряжение для образца, моделирующего состояние на контуре вертикальной скважины, находится между предельными напряжениями, соответствующими верхней (нижней) и левой (правой) точкам на контуре горизонтальных скважин.

Полученный результат, состоящий в изменении прочности породы вдоль контура горизонтальной скважины (минимум прочности в верхней точке, максимум в боковой точке), достаточно удивителен, поскольку, согласно общепринятой точке зрения [4,

8], наименьшая прочность должна соответствовать точкам, где преобладают напряжения сдвига вдоль горизонтальных плоскостей ослабления, соответствующим, в зависимости от коэффициента внутреннего трения, углам около 30° .

Результаты трехосных испытаний, проведенных для пар и троек образцов А3.1, А4; В9.2, В9.1; С1.3, С.4; С2.4, С2.5, С2.3, выявили более низкую прочность исследуемых пород при приложении максимального напряжения сжатия в направлении залегания по сравнению со случаем, когда максимальное сжимающее напряжение прикладывалось в направлении, перпендикулярном залеганию. В случае нагружения, когда основное сжимающее напряжение прикладывалось наклонно к залеганию, прочность имела промежуточное значение.

Рассмотрим возможные причины развития наблюдаемых форм вывалов и проверим гипотезы, предложенные в [11]. Так, на основе анализа [17] решения для распределения напряжений на контуре кругового отверстия в анизотропном теле [18], было продемонстрировано, что сочетание определенных типов упругой и прочностной анизотропии может приводить к появлению однолопастных вывалов на контуре отверстия в телах, подвергаемых действию равнокомпонентной нагрузки. Необходимым условием для формирования подобного типа вывалов согласно указанному механизму является:

$$2E_{(45)}^{-1} > E_{11}^{-1} + E_{33}^{-1} \quad (3.1)$$

где E_{11} , E_{33} , $E_{(45)}$ – модули Юнга, измеренные в направлении двух главных осей и под углом 45° к ним; для рассматриваемого случая они соответствуют модулям в плоскости залегания, нормально и под углом 45° к ней. Выполнение условия (3.1) приводит к появлению концентраций напряжений на контуре скважины при вышеуказанных условиях в точках, расположенных вдоль главных осей тензора упругости, соответствующих левым/правым и верхним/нижним точкам на контуре горизонтальной скважины, пробуренной вдоль горизонтального залегания. Изменение знака неравенства в (3.1) на противоположный приводит к уменьшению напряжений в этих точках и концентрации напряжений в точках под некоторыми углами (близкими к 45°) к главной оси, знак равенства в (3.1) соответствует равномерному кольцевому напряжению вдоль контура. Развитие однолопастных вывалов из-за концентрации напряжений требует, кроме выполнения условия (3.1), наличия анизотропии прочности для подавления появления вывалов в левой/правой точках горизонтальных скважин. Однако, как видно из результатов, представленных в таблице 1, неравенство (3.1) для исследуемых пород не выполняется. Поэтому приведенный выше сценарий не может объяснить появление наблюдаемых форм вывалов в исследованных породах.

Отметим, что измеренные значения модулей приводят к относительно небольшому нарушению условия (3.1), что предполагает незначительное изменение концентрации кольцевых напряжений вдоль контура и, следовательно, оправдывает использование программ нагружения, соответствующих равномерной концентрации окружных напряжений, для моделирования напряженного состояния на контуре скважины (тесты “скважина”).

Две независимые серии экспериментов, а именно моделирование напряженного состояния в различных точках контура скважины и трехосные испытания, продемонстрировали наличие анизотропии прочности исследуемых пород. Наблюдаемая анизотропия прочности проявлялась в монотонном изменении предельных напряжений при изменении угла приложения сжатия с боковым поджатием (трехосные испытания или испытания типа фон Кармана) с максимальным предельным напряжением, соответствующим максимальному напряжению сжатия, приложенному по нормали к залеганию, и минимальному напряжению сжатия, приложенному вдоль залегания (без “провала” между данными направлениями, соответствующего сдвиговому разрушению

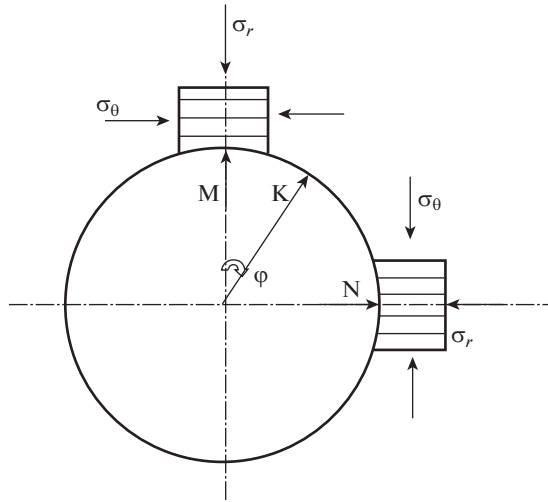


Рис. 4. Окружное и радиальное напряжения σ_θ, σ_r , действующие в окрестности горизонтальной скважины в верхней и боковой точках M и N .

вдоль плоскостей залегания). Это именно тот вид анизотропии прочности, который объясняет появление однолопастных вывалов вокруг круглых отверстий, направленных по нормали к залеганию, наблюдаемых при прямом моделировании без привлечения дополнительных допущений и моделей, таких как подавление инициирования вторичных вывалов [11].

Другие гипотезы, предложенные в [11], хотя и не получили подтверждения для исследуемых пород, тем не менее могут объяснять формирование необычных форм вывалов в других случаях.

4. Программа нагружения для моделирования состояния породы на контуре скважины. На рис. 4 схематично показано вертикальное сечение горизонтальной скважины и действующие в ее окрестности радиальное σ_r и кольцевое σ_θ напряжения в двух точках M и N . Сжимающие напряжения считаются отрицательными.

Будем считать, что под действием природного горного давления пласт находится в состоянии равнокомпонентного всестороннего сжатия напряжением $q = -\gamma H$, где H – глубина залегания пласта, γ – средний удельный вес вышележащих пород, обычно принимают $\gamma = 2.3 \text{ г/см}^3$. Тогда для изотропной по упругим свойствам среды распределение полных напряжений, обусловленных действием горного давления, в окрестности необсаженной скважины определяется известным решением задачи Ламе [7]:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -(q + p_c)(R_c/r)^2 + q \\ \sigma_\theta &= (q + p_c)(R_c/r)^2 + q \\ \sigma_z &= q \end{aligned} \tag{4.1}$$

где R_c – радиус скважины; r – расстояние от оси скважины, p_c – давление на забое скважины, σ_z – напряжение, действующие в окрестности скважины в направлении ее оси.

Напряжения, действующие в грунтовом скелете, равны:

$$s_i = \sigma_i + p(1 - \delta) \tag{4.2}$$

где σ_i – полные напряжения, обусловленные действием горного давления ($\sigma_i, s_i \leq 0$), p – давление флюида ($p \geq 0$), δ – доля площадок контактов относительно всей поверхности зерна грунтового скелета.

Значения напряжений, действующих в грунтовом скелете в окрестности скважины, тогда определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} s_r &= -(q + p_c) \left(\frac{R_c}{r} \right)^2 + q + p(r)(1 - \delta) \\ s_\theta &= (q + p_c) \left(\frac{R_c}{r} \right)^2 + q + p(r)(1 - \delta) \\ s_z &= q + p(r)(1 - \delta) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Из (4.3) и (4.2) следует, что на стенке скважины, т.е. при $r = R_c$, напряжения равны:

$$\begin{aligned} s_r &= -\delta p_c \\ s_\theta &= 2(q + p_c) - \delta p_c \\ s_z &= q + (1 - \delta) p_c \\ \tau &= q + p_c \end{aligned} \quad (4.4)$$

Тогда для величины депрессии на забое скважины $\Delta p = p_0 - p_c$, где p_0 – начальное пластовое давление, из (4.4) имеем:

$$\Delta p_c = p_0 - (s_\theta - 2q) / (2 - \delta) \quad (4.5)$$

Если площади соприкосновения между зернами грунта малы ($\delta \approx 0$), что характерно для прочных пород-коллекторов, давление, сжимающее грунтовой скелет, равно полному горному давлению на данной глубине минус пластовое давление. Для пород с малопрочными пластичными зернами площадь контакта между зернами может быть велика, и часть горного давления будет непосредственно передаваться через грунтовой скелет. Наиболее характерные значения δ для горных пород-коллекторов находятся в интервале от 0–0.2. Прочностные характеристики исследуемых пород, как показали результаты трехосных испытаний, оказались достаточно низкими. Поэтому при составлении программ физического моделирования принималось значение $\delta = 0.2$.

На рис. 5 показана программа нагружения образца породы из исследуемого месторождения, отвечающая моделированию деформационных процессов на контуре горизонтальной скважины при понижении давления на ее забое. Представлены зависимости от времени напряжений s_1, s_2, s_3 , прикладываемых в ходе опыта к граням образца по осям 1, 2, 3 в нагружающем узле установки ИСТНН, соответствующих напряжениям $|s_z|, |s_\theta|, |s_r|$, действующим на контуре горизонтальной скважины. Точки на программе нагружения отвечают напряжениям, действующим на контуре скважины в следующие моменты: точка А – напряжениям, действовавшим в грунтовом скелете до пробуривания скважины, т.е. в точке А: $s_1 = s_2 = s_3 = |q - p_0|$; точка В – скважина пробурена; отрезки ВС – понижение давления на забое скважины; точка С – “осушение” скважины.

Отличие при испытании образцов, соответствующих разным точкам контура скважины, состояло в направлении прикладывания максимального s_2 и минимального s_3 сжимающих напряжений к граням образца. Так, при моделировании точки М, рис. 4, образец в нагружающем узле установки ИСТНН располагался таким образом, что напряжение s_2 , отвечающее кольцевому напряжению σ_θ , действовало вдоль залегания, а напряжение s_3 , отвечающее радиальному напряжению σ_r – по нормали к нему. При

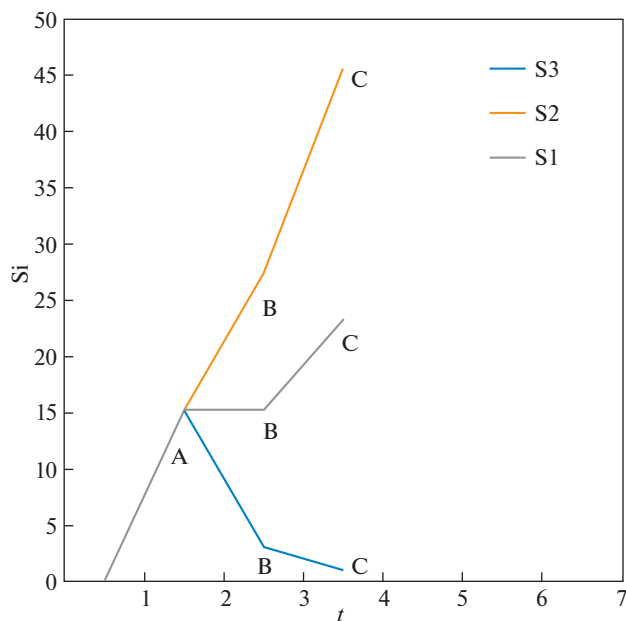


Рис. 5. Программа нагружения образца породы, моделирующая понижение давления на забое горизонтальной скважины: зависимость напряжений S_i , МПа от времени t , сек.

моделировании же точки N образец располагался таким образом, что напряжение s_2 было перпендикулярно залеганию, а напряжение s_3 действовало вдоль него.

5. Заключение. Исследовано влияние анизотропии упругих и, главным образом, прочностных свойств на конфигурацию вывалов, образующихся при равнокомпонентных напряжениях. На образцах песчаника, отобранных из сеноманских отложений, выполнено прямое физическое моделирование процесса образования вывалов при равномерном всестороннем сжатии образцов с отверстиями, моделирующими скважины, пробуренные в плоскости залегания и по нормали к ней. Эксперименты продемонстрировали образование кольцевых вывалов во втором случае и однолопастных вывалов, направленных перпендикулярно залеганию, в первом случае, для которого обычно ожидается образование двухлопастных вывалов, связанных со сдвиговым разрушением вдоль ослабленных плоскостей залегания [8, 4]. Подобные формы вывалов наблюдались и ранее в аналогичных условиях в образцах угля [10] и в песчанике [11].

В [11] было предложено несколько гипотез для объяснения такого необычного поведения, в частности: совместное влияние упругой анизотропии специального вида и прочностной анизотропии; наличие прочностной анизотропии специального вида, непосредственно не связанной с сдвиговым разрушением вдоль плоскостей залегания; разброс прочностных свойств, вызывающих возможную неустойчивость круговой формы вывалов.

Был проведен ряд экспериментов для определения упругих и прочностных свойств, ответственных за механизмы, лежащие в основе первых двух гипотез. Проведенные эксперименты продемонстрировали, что для исследуемых горных пород сочетание упругих характеристик не соответствует типу, обеспечивающему активацию разрушения в соответствии с первой гипотезой, в то время как анизотропия прочности отно-

сится именно к типу, приводящему к образованию наблюдаемых однолопастных вывалов.

Также проведена дополнительная серия экспериментов, в ходе которых моделировалось напряженное состояние в различных точках контура скважины. Испытания показали, что образцы, соответствующие точкам скважины, в которых максимальные напряжения действовали вдоль залегания (верхняя и нижняя точки горизонтальных скважин) и в которых возникли наблюдаемые вывалы, разрушались при меньших напряжениях по сравнению с образцами, отвечающими точкам на контуре скважины, в которых максимальные напряжения действовали под некоторыми углами к залеганию. Последние, в свою очередь, разрушались при меньших напряжениях по сравнению с образцами, отвечающими точкам на контуре скважины, в которых максимальные напряжения действовали по нормали к залеганию.

Таким образом, выполненные эксперименты по программам “трехосные” и “скважина” продемонстрировали наличие прочностной анизотропии исследованных пород, отличной от общеизвестной, связываемой с наличием поверхностей ослабления. Если при наличии последней зависимость прочности породы от угла на контуре горизонтальной скважины имеет четыре минимума и четыре максимума, то в нашем случае имеют место два минимума (в верхней и нижней точках контура скважины) и два максимума (в левой и правой точках контура).

Результаты исследований показали, что причиной образования направленных вывалов может быть не только разница в напряжениях, действующих в плоскости, перпендикулярной стволу скважины, но и влияние анизотропии прочности. Результаты представляются полезными для интерпретации данных исследований скважин для определения начального напряженного состояния в Земной коре, а также при проектировании и разработке углеводородных месторождений и подземных хранилищ газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект № 22-11-00273.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкатов А.Д. Предупреждение пескования скважин. М.: Недра, 1981. 176 с.
2. Врачев В.В., Шафаренко В.П., Шустров В.П. Пескопроявление при эксплуатации ПХГ // Газовая промышленность. 1999. № 11. С. 62.
3. Басниев К.С., Будзуляк Б.В., Зиновьев В.В. Повышение надежности и безопасности эксплуатации подземных хранилищ газа. М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”. 2005. 391 с.
4. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. California: Cambridge University Press, 2007. 443 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>.
5. Zang A., Stephansson O. Stress field of the earth's crust. Dordrecht: Springer, 2010. 322 p..
6. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods // Int. J. Rock Mech. Min Sci 2003. № 40. P. 975–989.
7. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of Elasticity. NY: McGraw-Hill Book Company Inc., 1953. 471 p.
8. Germanovich L.N., Galybin A.N., Dyskin A.V., Mokhel A.N., Dunayevsky V. Borehole stability in laminated rock. In G. Barla (Ed.) // Pred. Perform. Rock Mech. Rock Eng., Torino. CRC Press/Balkema, 1996. V. 2, P. 767–776.
9. Vernik L., Zoback M.D. Strength anisotropy of crystalline rock: Implications for assessment of in situ stresses from wellbore breakouts // Rock Mech. Contrib. Challenges. Proceedings of the 31st US Symposium on Rock Mech. Balkema, Rotterdam, 1990. ARMA-90-0841. <https://doi.org/10.1201/9781003078944>
10. 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. P. 141–152. <https://doi.org/10.1201/9781003078944>
11. Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Карев В.И. Геомеханический анализ образования вывалов на стенках скважин // Известия РАН МТТ. 2022. № 6. С. 157–172.

12. *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.
13. *Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B.* Modeling deformation and failure of anisotropic rocks nearby a horizontal well // J. Min. Sci. 2017. V. 53. № 3. P. 425–433.
<https://doi.org/10.1134/S1062739117032319>
14. *Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B.* Mechanical-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media // Mech. Solids. 2013. V. 48. P. 357–363.
<https://doi.org/10.3103/S0025654413040018>
15. *Karev V.I., Kovalenko Y.F., Ustinov K.B.* Geomechanics of Oil and Gas Wells. Advances in Oil and Gas Exploration and Production. Springer International Publishing Cham: Switzerland. 2020. 166 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26608-0>
16. Экспериментальное исследование влияния анизотропии на ориентацию вывалов в скважинах. (Видео) URL: <https://ipmnet.ru/labs/geo/breakouts2022> (дата обращения: 21.09.2022).
17. *Zhuravlev A.B., Ustinov K.B.* On values characterizing the degree of elastic anisotropy of transversely isotropic rocks. Role of Shear Modulus. // Mech. Solids. 2019. Vol. 54. № 6. P. 958–967.
<https://doi.org/10.3103/S0025654419060104>
18. *Lekhnitskii S.G.* Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body. Holden-Day, San Francisco, 1963. 404 p.