

УДК 622.279

Д.М. Орлов, Н.В. Савченко, А.Е. Рыжов, Т.А. Перунова

Экспериментальное определение прочностных характеристик слабосцементированных песчаников и алевролитов в пластовых условиях

Ключевые слова:

разрушение горных пород, когезия, круги Мора, фильтрация.

Keywords:

rock destruction, cohesion, Mohr's circles, filtration.

Исследования прочностных характеристик слабосцементированных песчаников газоконденсатных месторождений Северо-Каменномысское и Каменномысское-море в пластовых условиях были выполнены на экспериментальной установке исследования фильтрационных и прочностных характеристик горных пород (ЗК-8). Конструктивно установка выполнена в виде гидравлической системы, состоящей из двух масляных прессов, системы труб, манометров давления и кернодержателя специальной конструкции. Установка позволяла проводить эксперименты по одноосному и трехосному нагружению стандартных образцов керна (диаметром и длиной 30 мм). Разрушенные после проведения указанных типов нагружения образцы представлены на рис. 1.

При одноосном сжатии цилиндрический образец породы нагружался только осевым усилием при помощи гидравлического пресса до тех пор, пока не происходило разрушение. В этом случае образец разрушался вне кернодержателя, и момент разрушения регистрировался визуально. При трехосном сжатии образец помещался в кернодержатель, где к его боковой поверхности через резиновую манжету прикладывалось всестороннее радиальное давление. Затем выполнялось ступенчатое осевое нагружение до разрушения образца. На установке можно было независимо задавать радиальную (σ_{rad}) и осевую (σ_{oc}) нагрузки, варьируя таким образом значения девиатора напряжений (разницы между радиальной и осевой нагрузками: $\Delta\sigma = \sigma_{oc} - \sigma_{rad}$). Система прессов позволяла получать стабильные значения напряжений на образцах в диапазоне $\sigma_{oc} = \sigma_{rad} = 1 \div 80$ МПа и моделировать разрушение в пластовых условиях. В качестве критерия разрушения использовалось условие прочности Кулона–Мора.

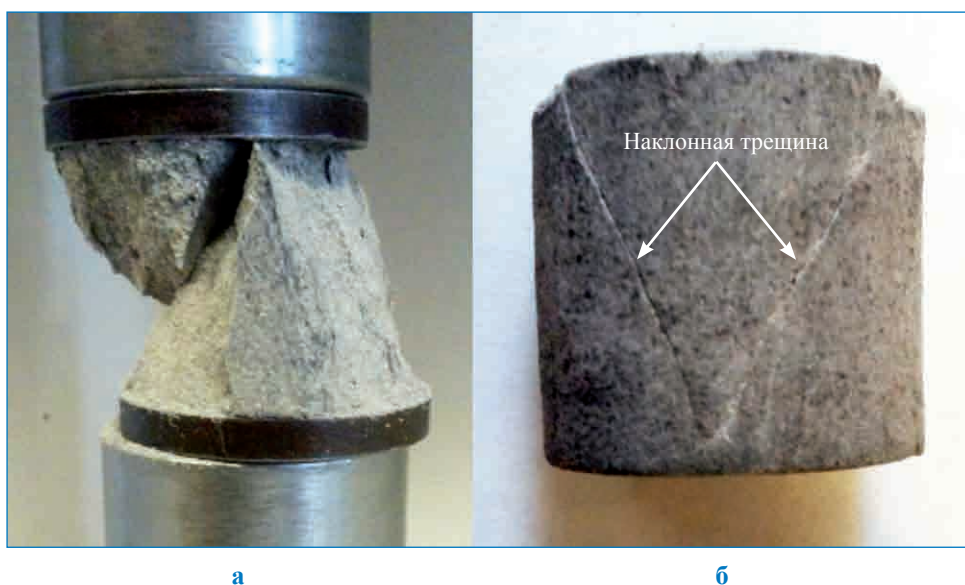


Рис. 1. Разрушенные образцы керна: а – после одноосного нагружения; б – после трехосного нагружения

Целью работы являлось определение условий разрушения образцов горной породы при различных осевых и радиальных напряжениях. Для этого на экспериментальной установке создавалось осесимметричное трехосное нагружение ($\sigma_1 = \sigma_{oc}$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{рад}$, где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения). Для определения параметров прочности (угла внутреннего трения и когезии) необходимо в координатах нормального и тангенциального напряжений построить как минимум два круга Мора, соответствующих различным соотношениям главных напряжений в момент разрушения образца (одно главное напряжение соответствовало радиальному, другое – осевому). Таким образом, для формирования прямой разрушения Кулона–Мора необходимо провести испытания двух образцов одной породы (со схожей литологией и структурой порового пространства).

Для серии из 12 образцов (соотношение диаметра к высоте $D/H = 1$) реализовывались два значения радиального напряжения: $\sigma_{рад} = 0,1$ МПа (одноосное сжатие) и $\sigma_{рад} = 10$ МПа (пластовые условия). В этом случае первый круг Мора характеризовал разрушение образца при одноосном нагружении с атмосферным радиальным давлением: $\sigma_1 = \sigma_{oc} = \sigma_0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{рад} = 0,1$ МПа. Второй круг Мора характеризовал разрушение при трехосном нагружении при фиксированном

значении радиального напряжения, соответствовавшего пластовому горному давлению $\sigma_{рад} = 10$ МПа: $\sigma_1 = \sigma_{oc}$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{рад} = 10$ МПа. Касательная к этим кругам, построенным в одних координатах, является прямой разрушения Кулона–Мора и имеет вид:

$$\tau_f = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \tag{1}$$

где τ_f – тангенциальная компонента напряжения в плоскости скола, расположенной под углом ω к горизонтали (рис. 2); σ_n – нормальная компонента напряжения к плоскости скола, расположенной под углом ω к горизонтали; φ – угол внутреннего трения; c – внутренняя прочность на сдвиг (когезия).

Угол внутреннего трения и угол плоскости скола связаны друг с другом, как $\omega = \pi/4 + \varphi/2$. По анализу кругов Мора оценивались значения угла внутреннего трения (φ) и коэффициента когезии (c).

Основная трудность исследований заключалась в определении момента разрушения образца относительно величины осевого напряжения в случае ненулевого радиального напряжения: образец находился в закрытой камере, а об изменении структуры породы можно было судить лишь косвенно, по анализу зависимостей проницаемости от осевого напряжения и поведения давления в системе. Прежде

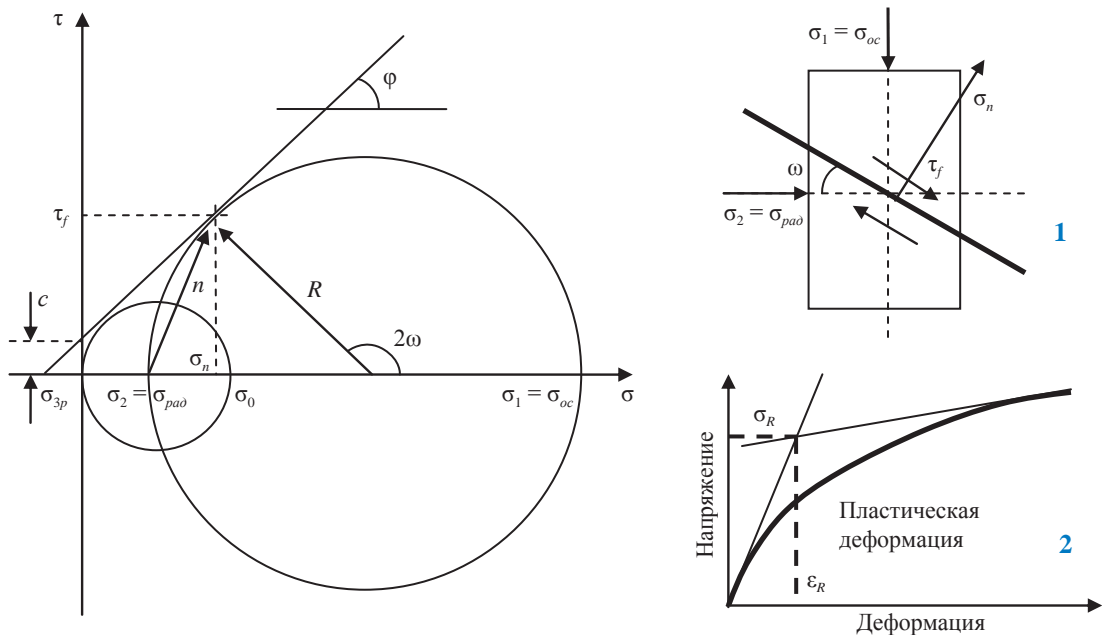


Рис. 2. Круги Мора. Критерий разрушения Кулона–Мора:

1 – схема разрушения образца в соответствии с кругами Мора;

2 – графический метод определения предела прочности при пластической деформации

всего при трехосных испытаниях на прочность исследовалась зависимость проницаемости (K) образцов по азоту от девиатора напряжений ($\Delta\sigma = \sigma_{oc} - \sigma_{rad}$). Ожидалось, что формирование системы трещин в момент разрушения образца приведет к резкому росту проницаемости. Но в большинстве случаев такого увеличения проницаемости не было обнаружено (рис. 3): она либо продолжала монотонно снижаться за счет роста эффективного давления (кривая 1), либо возникало более резкое снижение проницаемости (кривая 4), либо имело место несколько экстремумов (кривые 3, 4). Таким образом, использовать зависимость проницаемости от осевого напряжения в качестве однозначного критерия разрушения не представлялось возможным.

Следующим этапом являлась разработка методики определения поперечной деформации по мере увеличения радиального давления при усилении осевой нагрузки. На каждом шаге осевого нагружения регистрировался рост радиального напряжения с последующим его снижением до фиксированного значения $\sigma_{rad} = 10$ МПа. В изотермическом приближении ($PV = const$) по скачку радиального напряжения можно было определить уменьшение объема гидравлического агента (сжатие масла в замкнутой системе), вызванного деформацией образца, и оценить величину поперечной деформации (рис. 4).

Наиболее доступным способом определения прочностных характеристик горных пород, находящихся в тяжелых пластовых термобари-

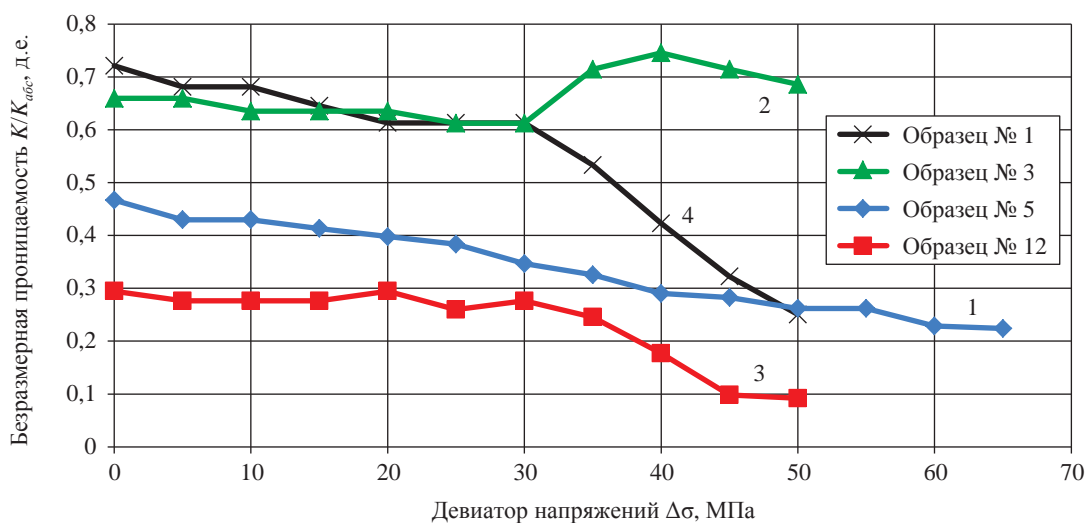


Рис. 3. Зависимость проницаемости по газу от осевого напряжения σ_{oc} . Нормировка на абсолютную проницаемость $K_{абс}$

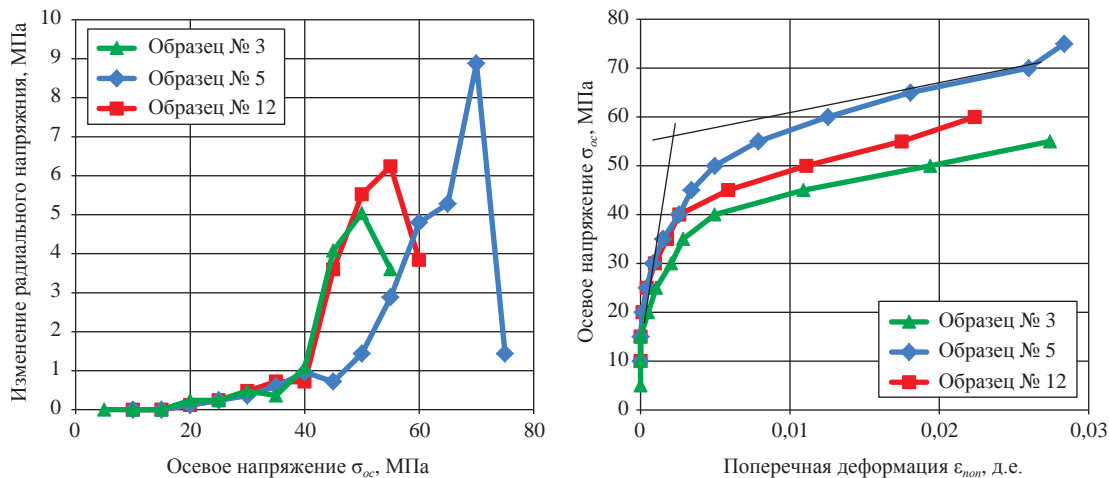


Рис. 4. Оценка поперечной деформации по скачку радиального напряжения

ческих условиях, является анализ зависимостей напряжения от деформации. По сути, если испытание проводится на образце керна в специальной установке при пластовых условиях, анализ графиков «напряжение – деформация» является единственным (за исключением томографического исследования структуры) возможным способом определения условий разрушения породы, так как перманентное визуальное обследование образца исключено. При хрупкой или хрупко-пластической деформации на графике зависимости напряжения от деформации можно видеть максимум напряжений, характеризующий состояние разрушения. При пластической деформации такого максимума не наблюдается, и необходимо руководствоваться другими признаками. Как видно из графиков на рис. 4, вид зависимостей «напряжение – деформация» при вышеописанном способе оценки поперечной деформации соответствует пластическому типу деформирования (см. рис. 2). Между тем, это вовсе не свидетельствует о том, что образец деформируется как пластическое тело. Такой вид кривой является результатом неточности оценки поперечной деформации в моменты после разрушения образца.

Разрушение породы при достижении осевым напряжением определенного значения сопровождается ростом радиального напряжения

по отношению к заданному (в большинстве опытов $\sigma_{рад} = 10$ МПа). Для более точной оценки значения осевого напряжения, при котором происходило разрушение породы, использовался графический метод [1]. В работе [1] рассмотрены три вида деформации: хрупкая, хрупко-пластическая и пластическая. Для пластической деформации предел прочности σ_R соответствует точке пересечения касательных, проведенных к начальному и конечному участкам зависимости осевого напряжения от поперечной деформации (см. рис. 2). Таким образом, определялись координаты точки пересечения касательных. Ордината точки пересечения касательных являлась искомой величиной предела прочности породы на сжатие. К тому же в большинстве случаев на зависимости проницаемости от осевого напряжения наблюдался некоторый экстремум в точке осевого напряжения разрушения. В связи со всем вышесказанным, не имея возможности визуальной регистрации момента разрушения керна, использовался комплексный анализ косвенных данных – зависимостей поперечной деформации (относительного роста радиального напряжения) и проницаемости от осевого напряжения.

В таблице представлены параметры разрушения, рассчитанные по описанной выше методике анализа зависимостей поперечной

Сводная таблица данных исследованных образцов

№ пары	№ образца	Проницаемость $K, 10^{-15} \text{ м}^2$	Пористость $m, \%$	Литология	Радиальное напряжение $\sigma_{рад}$ МПа	Осевое напряжение $\sigma_{ос}$, МПа	Девiator напряжений $\Delta\sigma$, МПа	Среднее нормальное напряжение σ_e , МПа	$\sigma_{зр}^*$, МПа	Когезия c , МПа	Угол внутреннего трения φ , °
1	2	855	33,7	песч.	0,1	4	3,9	1,4	1,57	1,1	35
	1	611	32,8	алевр.	10	40	30	20	1,57	1,1	35
2	11	1420	31,1	песч.	0,1	8	7,9	2,7	3,54	2,3	33
	12	1695	31	песч.	10	41	31	20,3	3,54	2,3	33
3	11	1420	31,1	песч.	0,1	8	7,9	2,7	4	2,5	32
	7	915	29,8	песч.	10	40	30	20	4	2,5	32
4	2	855	33,7	песч.	0,1	4	3,9	1,4	1,79	1,3	36
	9	665	31,1	песч.	10	42	32	20,7	1,79	1,3	36
5	8	2173	33,9	песч.	0,1	4	3,9	1,4	2	1,3	33
	10	2246	33,3	песч.	10	37	27	19	2	1,3	33
6	4	105	27,4	алевр.	0,1	8	7,9	2,7	2,19	1,9	41
	5	62	26	алевр.	10	54	44	24,7	2,19	1,9	41
7	6	31,6	25	алевр.	0,1	12	11,9	4,1	2,8	2,7	44
	3	35,7	26,6	алевр.	5	40	35	16,7	2,8	2,7	44

* $\sigma_{зр}$ – предел прочности при равномерном трехосном растяжении.

деформации и проницаемости от осевого напряжения, а также в результате построения кругов Мора и формирования прямой Кулона–Мора. Для семи пар образцов получены зависимости вида (1), значения когезии (c) и угла внутреннего трения (φ). На рис. 5а представлены все семь прямых разрушения Кулона–Мора в координатах σ_{oc} и $\sigma_{рад}$, пересчитанные из условия:

$$\begin{cases} R = \frac{\sigma_{oc} - \sigma_{рад}}{2}; \\ \sin \varphi = \frac{R}{c \cdot \cot \varphi + \sigma_{рад} + R}. \end{cases} \quad (2)$$

Согласно (2), прямые разрушения имеют вид:

$$\sigma_{oc} = \frac{(1 + \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)} \sigma_{рад} + \frac{2c \cdot \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi)}. \quad (3)$$

График, отображенный на рис. 5а, удобно представить в координатах, независимых от ориентировки площадки, вдоль которой происходит сдвиговое разрушение:

- девиатор напряжений:

$$\Delta\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} = \sigma_{oc} - \sigma_{рад}; \quad (4)$$

- среднее нормальное напряжение:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_{oc} + 2\sigma_{рад}}{3}. \quad (5)$$

Для обобщения данных, полученных в ходе испытаний на разрушение кернов с разными параметрами (проницаемостью, пористостью и т.д.), произведем нормировку новых координат соответствующими для каждой пары образцов значениями предела прочности при равномерном трехосном растяжении (σ_{3p}), полученными из анализа прямых Кулона–Мора (в точке их касания с осью ординат). На рис. 5б представлены как экспериментальные точки, так и прямые разрушения Кулона–Мора в новых координатах. На графиках видно, что практически все данные лежат вдоль одной прямой. Выделяются из общей линейки лишь несколько точек, которые сильнее всего от-

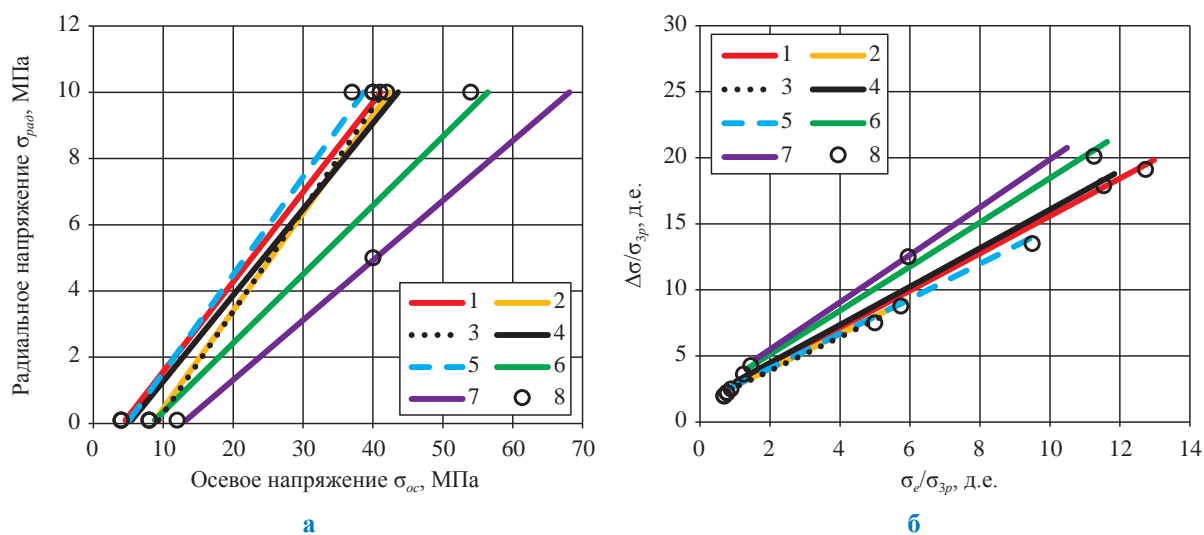


Рис. 5. Прямые разрушения Кулона–Мора для семи пар образцов:

1 – $\tau_f = \sigma_n \tan 35^\circ + 1,1$; 2 – $\tau_f = \sigma_n \tan 33^\circ + 2,3$; 3 – $\tau_f = \sigma_n \tan 32^\circ + 2,5$; 4 – $\tau_f = \sigma_n \tan 36^\circ + 1,3$;
5 – $\tau_f = \sigma_n \tan 33^\circ + 1,3$; 6 – $\tau_f = \sigma_n \tan 41^\circ + 1,9$; 7 – $\tau_f = \sigma_n \tan 44^\circ + 2,7$; 8 – экспериментальные точки;
а – в координатах главных напряжений; б – в нормированных координатах

личаются от других образцов, так как обладают существенно более низкой абсолютной проницаемостью (на порядок ниже).

В работе [2] проводились трехосные исследования прочности образцов керна в широком диапазоне напряжений, вплоть до величин, соответствующих разрушению при равномерном трехосном сжатии. Значения напряжений в последнем случае назывались критическими. Авторами в независимых координатах $\Delta\sigma - \sigma_e$, аналогичных используемым в данном исследовании, были получены кривые прочности для группы образцов одной породы. Кривые имеют форму полуэллипсов, что объясняется сменой режима разрушения образца. Рост кривой соответствует режиму хрупкого разрушения при сдвиге, а падение – эластичному разрушению по всему объему. Пример кривой для пород, наиболее близких по свойствам к исследуемым в данной работе, представлен на рис. 6. Вид кривой соответствует прямой разрушения Кулона–Мора только при небольших значениях независимых координат $\Delta\sigma$, σ_e и, следовательно, при небольших значениях осевых и радиальных напряжений. На график рис. 6 также нанесены результаты данного экспериментального исследования, в котором, строго говоря, испытанные образцы не обладали одинаковыми свойствами и структурой: имели место отличия в литологии, пористости и проницаемости. Можно видеть, что результаты, полученные авторами этой работы, лежат в линей-

ной части кривой разрушения и охватывают небольшой (по сравнению с работой [2]) диапазон напряжений. Таким образом, подтвердить возникновение двух режимов разрушения одной породы в зависимости от условий нагружения не представляется возможным.

В работе [2] для обобщения данных о разрушении образцов различной структуры и свойств, представляющих в координатах $\Delta\sigma - \sigma_e$ довольно расплывчатое «облако», предложено произвести нормировку данных независимых координат на величины критического напряжения для каждого типа образцов. Данное преобразование аналогично выполненному в текущем исследовании для пучка прямых Кулона–Мора (рис. 7). Единственным отличием является то, что параметром нормировки в работе [2] вместо напряжения разрушения при равномерном трехосном растяжении (σ_{3p}) выступало критическое напряжение.

С целью выявления закономерностей разрушения образцов различных свойств и структуры проводились исследования параметров разрушения (когезии и угла внутреннего трения) от пористости и проницаемости (см. рис. 7). Видно, что угол внутреннего трения существенно убывает с увеличением как пористости, так и проницаемости. В пределах погрешности можно считать, что когезия во всех экспериментах оставалась величиной постоянной и не зависела от структуры порового пространства.

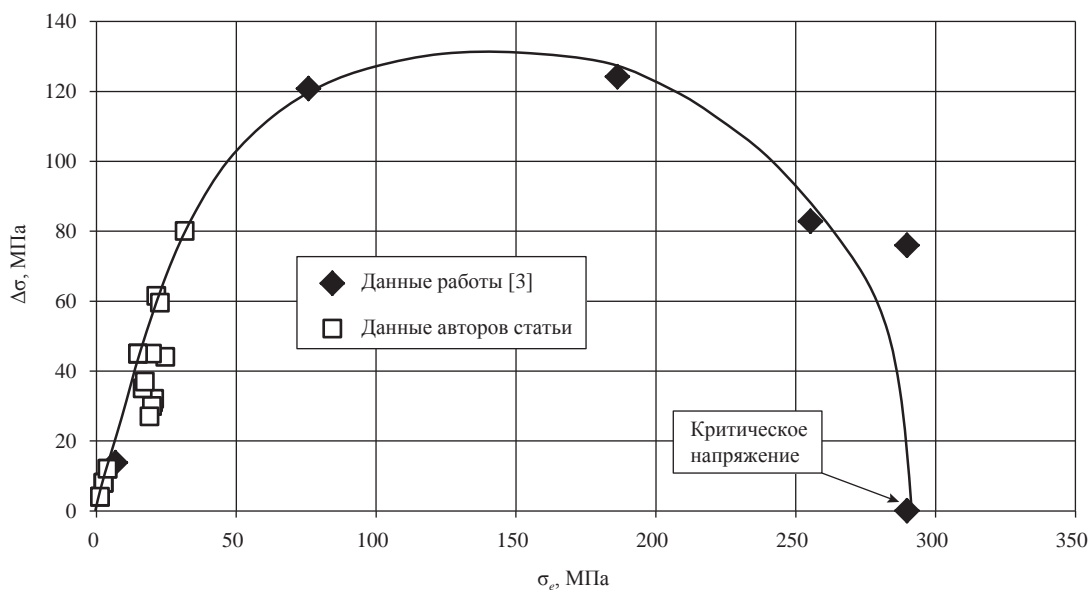


Рис. 6. Кривая разрушения в независимых координатах

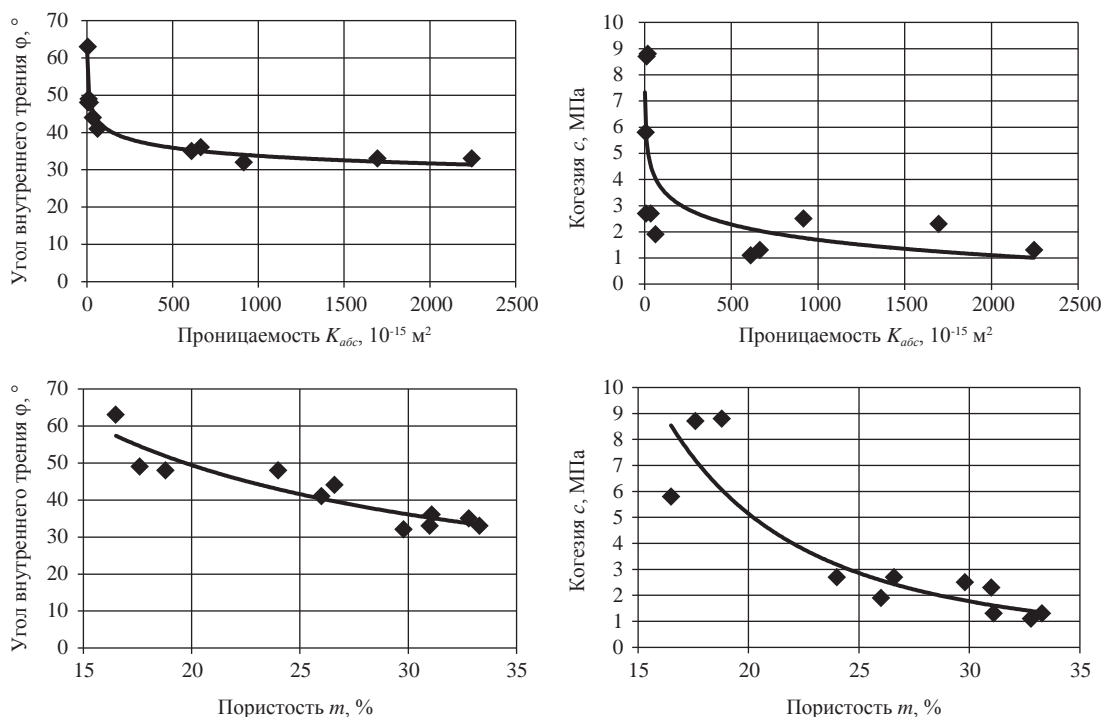


Рис. 7. Влияние структуры порового пространства на прочностные характеристики слабосцементированных песчаников и алевролитов

В работе [3], как и в данном исследовании, объектом исследования являлись образцы слабосцементированных песчаников сеноманского горизонта Северо-Каменомысского газоконденсатного месторождения. Таким образом, справедливо было сопоставить определенные двумя разными способами прочностные характеристики (угол внутреннего трения и когезию) породы. В работе [3] реализовывался «бразильский» метод разрушения образца зерна двумя интендорами, а прямая разрушения Кулона–Мора строилась на основе данных только одного испытания. С точки зрения экономии исследуемого материала данный метод определения прочности образцов уникален. Среди недостатков исследований следует выделить то, что всестороннее давление во всех экспериментах соответствует барометрическому и определяемые параметры прочности (угол внутреннего трения и когезия) с допустимой точностью справедливы только вблизи экспериментальных точек (в области небольших средних нормальных напряжений). Для определения условий разрушения образцов зерна в пластовых условиях необходимы дополнительные экспериментальные данные. К тому же такой метод построения кругов Мора подразумевает субъективный анализ

сложной геометрии разрушений: велики погрешности определения размеров областей воздействия интендоров на поверхность образца и площади плоскости разрушения образца при сдвиге. Таким образом, предложенный в работе [3] способ построения прямой разрушения Кулона–Мора хоть и является более экономичным и быстрым, но менее надежен, чем метод, реализованный на данной установке.

В работе [3] представлены зависимости угла внутреннего трения и когезии от предела прочности на одноосное растяжение σ_p , который сам по себе был связан с пределом прочности на одноосное сжатие σ_0 как $\sigma_0 = 17,7 \sigma_p$. Соответствующее соотношение между пределами прочности на одноосное сжатие и растяжение также согласуется с ГОСТ 24941-81 [4] для глинистых песчаников, где $\sigma_0 = 18 \sigma_p$. Авторами настоящей статьи при помощи данного соотношения были вычислены пределы прочности на одноосное растяжение σ_p и на их основе построены аналогичные [3] зависимости параметров разрушения (рис. 8). Как видно из рисунка, получено хорошее совпадение результатов, что подтверждает адекватность используемых методов изучения прочностных характеристик пород.

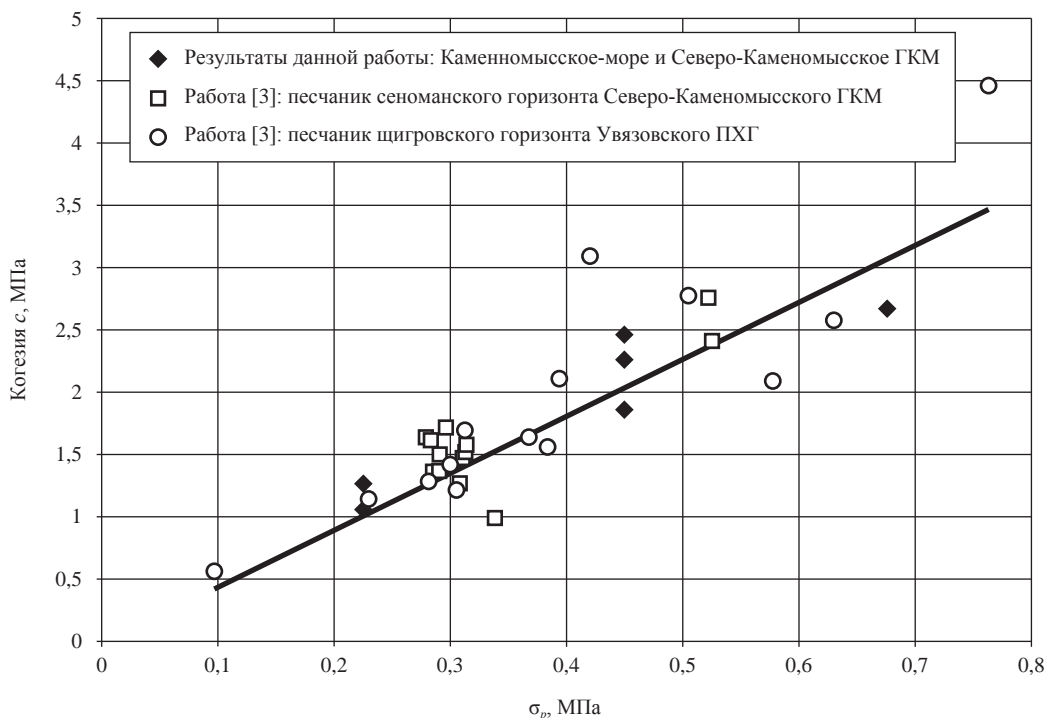


Рис. 8. Зависимость когезии от предела прочности на одноосное растяжение

В результате исследований, во-первых, разработан метод определения предела прочности в условиях горного давления (при повышенном радиальном напряжении) путем совместного анализа косвенных данных – зависимостей осевого напряжения от поперечной деформации и проницаемости от девиатора напряжений. Достоверность предложенного метода подтверждена хорошим соответствием прочностных характеристик, определенных двумя разными способами. Анализировались пределы прочности при классическом (представленном в данной работе) и «бразильском» методах разрушения образцов горной породы. Во-вторых, для группы образцов схожей литологии методом кругов Мора были получены данные о когезии и угле внутреннего трения, построены прямые разрушения Кулона–Мора. Показано, что с ухудшением фильтрационно-емкостных свойств пород схожей литологии происходят

упрочнение породы, рост когезии и угла внутреннего трения. Обнаружено, что разрушение породы может как не повлиять на фильтрацию, так и привести к скачку проницаемости в ту или иную сторону. В-третьих, обобщение результатов определения прочностных характеристик и сопоставление с данными других исследований удобно выполнять в нормированных независимых координатах. В этом случае можно обойти технические ограничения конкретной экспериментальной установки и оценить прочностные характеристики в более широком диапазоне напряжений, когда имеет место смена типа деформирования (т.е. прямая Кулона-Мора не способна адекватно предсказывать условия разрушения).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-00340 а.

Список литературы

- ГОСТ 26447-85. Породы горные. Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии.
- Zhang J.J. Mechanical Strength of Reservoir Materials: Key Information for Sand Prediction / J.J. Zhang, C.S. Rai, C.H. Sondergeld // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2000. – Vol. 3. – No. 2. – P. 127–131.
- Пятахин М.В. Определение сцепления слабосцементированных песчаников / М.В. Пятахин, С.А. Хан, С.О. Оводов // Газовая промышленность. – 2008. – № 3. – С. 82–84.
- ГОСТ 24941-81. Породы горные. Методы определения механических свойств нагружением сферическими инденторами.