

УДК 622.279

**Д.М. Орлов, А.В. Богданов, А.П. Федосеев**

## Экспериментальное исследование влияния скорости фильтрации флюида на риск разрушения горных пород

**Ключевые слова:** разрушение пород, геомеханические напряжения, влияние скорости фильтрации на разрушение породы, фильтрационно-емкостные свойства.

**Keywords:** rock fracturing, geomechanical stress, flow velocity influence on rock fracturing, reservoir properties.

Действующие в окрестности скважин напряжения оказывают значительное влияние на фильтрационные свойства пласта и, как следствие, на дебит нефтяных скважин. Величина таких напряжений зависит от деформационных свойств породы и от давления нефти на забое скважины [1]. При понижении давления в скважине касательные напряжения в ее окрестности увеличиваются, что при определенных условиях может привести к разрушению породы вблизи скважины. Проницаемость при этом в разрушенной области резко возрастает, вследствие чего увеличивается приток нефти из пласта в скважину. На сегодняшний день одной из проблем разработки и эксплуатации месторождений природных углеводородов является достоверный учет в проекте разработки геомеханических процессов. Использование геолого-фильтрационно-прочностных моделей позволяет оценить вероятность просадок земной поверхности над разрабатываемыми залежами, определить напряженно-деформированное состояние в разрезе предполагаемого бурения скважин, предсказать ухудшение фильтрационно-емкостных свойств коллектора из-за его разрушения и кольматации [2]. При выполнении геомеханических расчетов помимо упругих свойств (коэффициент Пуассона, модуль Юнга) в модель закладывается критерий прочности. Для его формулирования необходимо провести специальные испытания на прочность в условиях трехосного нагружения [1, 3]. Тем не менее не всегда имеется необходимое количество экспериментальных данных для создания достоверной геомеханической модели. В этом случае приходится довольствоваться экспериментальной оценкой предельно допустимых нагрузок. Современные геолого-фильтрационные модели позволяют выполнять совместный расчет фильтрационных и геомеханических полей при учете их взаимного влияния [4]. Таким образом, отдельным вопросом стоит изучение влияния фильтрационных полей (скорости потока, дебитов скважин) на горные породы в прискважинных зонах.

С этой целью экспериментально исследовалась корреляция таких показателей, как скорость фильтрации флюида и риск разрушения пород продуктивных отложений дагинской свиты одного из месторождений газа шельфа о. Сахалин. Эксперименты проводились в условиях равноосного и неравноосного нагружения скелета сухой или частично водонасыщенной породы-коллектора в широком диапазоне фильтрационно-емкостных свойств (табл. 1). Для оценки возможности разрушения коллектора в прискважинной зоне, где депрессия на пласт достигает максимальных значений благодаря возникающему при фильтрации флюидов градиенту порового давления, с использованием специального стенда (рис. 1) проводились эксперименты, моделирующие проектные дебиты скважин.

Стенд (см. рис. 1) предназначен для измерения проницаемости по газу в пластовых условиях и определения условий разрушения образцов керна при различных соотношениях радиального (бокового) и осевого напряжений, а также при различных градиентах порового давления. Экспериментальная установка состоит из кернодержателя специального типа ЗК-8 (К), системы обжимного давления на основе автоматизированного высокоточного одноплунжерного поршневого насоса с электроприводом ЛН1-700-100 (П) производства ООО «Геологика», системы определения расходов, системы соединительных труб, вентилей, манометров высокого давления и прецизионного датчика избыточного давления МИДА-13П (ДД).

Таблица 1

**Фильтрационно-емкостные и литологические характеристики исследованных образцов:**

$K_{абс}$  – абсолютная проницаемость,  $m$  – пористость

№ обр.	Скв.	Пласт	$K_{абс}$ , мД	$m$ , %	Литология
1	3	I–II	10,1	22,8	Песчаник мелкозернистый, алевритистый
2	3	I–II	15,0	24,7	Алевролит
3	3	I–II	16	24,9	Алевролит
4	3	I	22	24,4	Алевролит песчанистый
5	3	II	24	24,7	Песчаник мелкозернистый, алевритистый
6	1	II	26,6	20,4	Песчаник мелкозернистый
7	1	II	47,4	21,5	Песчаник мелкозернистый
8	3	II	196	24,8	Песчаник мелкозернистый
9	3	II	248	24,1	Песчаник мелкозернистый
10	3	II	293	24,3	Песчаник мелкозернистый
11	3	II	308	24,9	Песчаник мелкозернистый
12	3	II	346	25,1	Песчаник мелкозернистый
13	3	III	377	23,8	Песчаник средне-мелкозернистый
14	3	III	506	24,3	Песчаник средне-мелкозернистый
15	5	II	931	25,9	Песчаник мелко-среднезернистый, коричневатого-серый
16	5	II	1135	26,7	Песчаник мелко-среднезернистый, серый
17	5	II	3144	28,7	Песчаник крупно-среднезернистый, коричневатого-серый

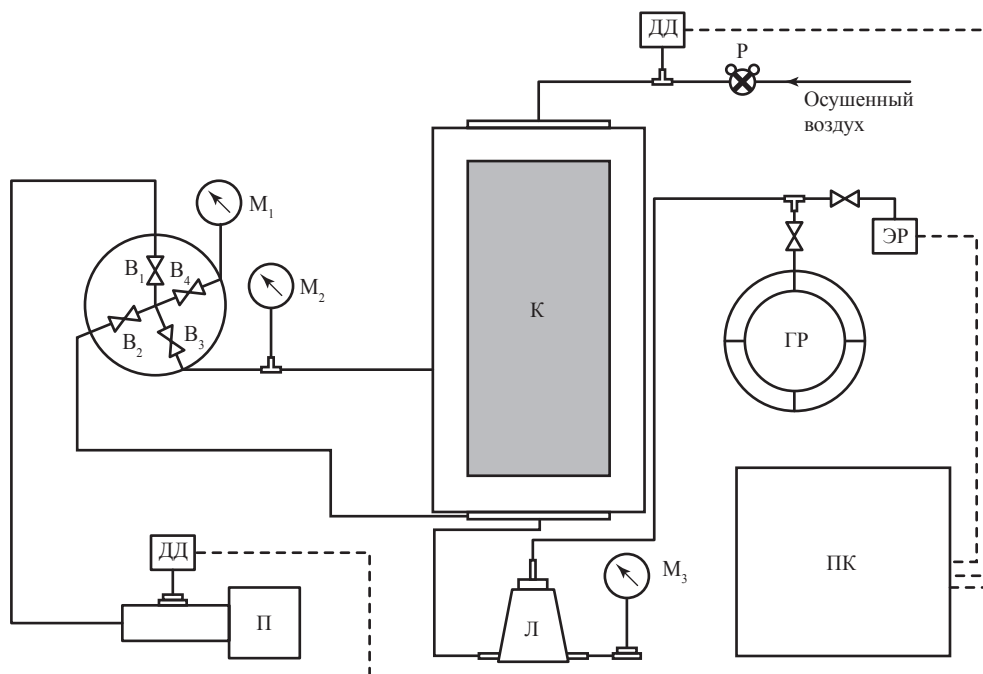
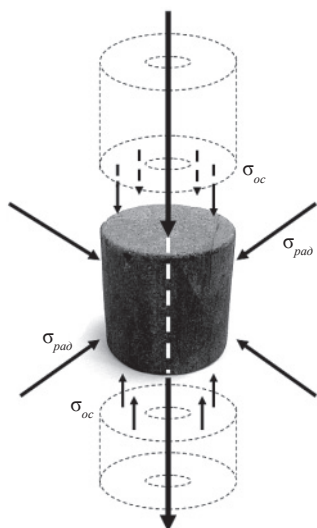


Рис. 1. Схема установки: Р – редуктор;  $B_1$ – $B_4$  – вентили;  $M_1$ – $M_3$  – манометры; ПК – персональный компьютер; Л – стеклянная ловушка

Кернодержатель ЗК-8 позволяет независимо создавать осевую и радиальную нагрузку до 60 МПа на стандартный образец керна и фильтровать флюид в осевом направлении (рис. 2). Насос ЛН1-700-100 снабжен собственным датчиком давления и функционирует в режиме поддержания заданного расхода (в диапазоне 0,001–25 мл/мин) и давления (до 70 МПа). Объем цилиндра – 100 мл. При значе-

ниях расхода менее 1000 мл/мин расход газа определялся при помощи высокоточных электронных датчиков MKS 179A-21951 (ЭР), а при больших расходах использовался счетчик газа ГСБ-400 (ГР).

В эксперименте через образец керна, находящийся при эффективном напряжении, фильтровался осушенный воздух с высокими линейными скоростями при больших градиентах



**Рис. 2. Схема нагружения образца породы:**  
 $\sigma_{ос}$  – осевое напряжение;  $\sigma_{рад}$  – радиальное напряжение

давления (до 30 МПа/м). Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром и длиной 30 мм. Перепад давлений на входе и выходе ( $\Delta P$ ) кернодержателя достигал 1 МПа. Момент разрушения породы-коллектора относительно заданной линейной скорости фильтрации предполагалось регистрировать по резкому падению давления в гидравлической системе, а также по экстремуму на зависимости проницаемости образца от градиента давления. Параллельно с замерами проницаемости осуществлялся контроль выноса песка из образца на различных режимах фильтрации в специальную стеклянную ловушку (Л), расположенную на выходе из кернодержателя, которая обеспечивала сепарацию газового потока от взвешенных частиц, образующихся при разрушении породы. По наличию частиц породы («песка») в ловушке можно судить о начале разрушения образца керна.

Выполнено две серии экспериментов. В первой серии высушенные до постоянного веса образцы керна находились в условиях равноосного нагружения (моделировалось эффективное напряжение как разность горного и пластового давлений  $P_{эф} = P_{гор} - P_{пл}$ ):  $\sigma_{ос} = \sigma_{рад} = 22$  МПа. В исследованном диапазоне скоростей фильтрации  $v_z$  (до  $v_z = 53$  м/мин) ни один из образцов керна не был разрушен. Выноса песка также не наблюдалось. Исследовалась коллекция образцов

в диапазоне проницаемостей  $K_{абс} = 10-3150$  мД и пористостей  $m = 20,4-28,7$  % (см. табл. 1).

Так, для проектируемого горизонтального участка скважины длиной  $L = 500$  м и радиусом  $R = 12,25$  см, вскрывающей газоконденсатный пласт и работающей с дебитом  $Q_{скв}$  в диапазоне 2–3 млн м<sup>3</sup>/сут, диапазон значений скорости течения газа в пластовых условиях составит:

$$v_z = \frac{Q_z}{S_{скв}} = \frac{Q_z}{2\pi RL} = 0,022...0,033 \text{ м/мин}, \quad (1)$$

где  $Q_z$  – дебит газа в пластовых условиях ( $P_{пл} = 22$  МПа, пластовая температура  $T_{пл} = 125$  °С);  $S_{скв}$  – площадь участка скважины.

Диапазон значений  $Q_z$  оценивался с помощью уравнения состояния идеального газа:

$$Q_z = Q_{скв} \frac{P_{см} T_{пл}}{P_{пл} T_{см}} = 12,1...18,2 \text{ тыс. м}^3/\text{сут},$$

где давление в стандартных условиях  $P_{см} = 0,1$  МПа, температура в стандартных условиях  $T_{см} = 25$  °С.

В приближении для однофазной фильтрации также можно оценить линейную скорость фильтрации по нефти  $v_n$ , соответствующую экспериментальным градиентам давления, возникающим при фильтрации газа. Для этого, зная соотношение вязкостей флюидов и принимая, что проницаемость одинакова для обеих фаз и соответствует абсолютной, можно получить диапазон:

$$v_n = \frac{\mu_z}{\mu_n} v_z = 0,092...0,14 \text{ см/мин}, \quad (2)$$

где динамическая вязкость нефти  $\mu_n = 0,43$  сП, а динамическая вязкость газа (воздуха)  $\mu_z = 0,018$  сП.

Можно видеть (табл. 2), что экспериментально полученные максимальные скорости фильтрации по исследованной группе образцов превышали проектные (см. формулы (1) и (2)) минимум в 150 раз, максимум в 2400 раз. Таким образом, в первой серии экспериментов не было зафиксировано разрушения горной породы даже при превышении проектных скоростей фильтрации на два-три порядка.

Во второй серии экспериментов исследовалось влияние неравноосного нагружения и остаточной воды на прочность пород-коллекторов. Известно, что прочность пород существенно зависит от вида насыщающего флюида [5, 6]. Так, установлено, что при нали-

Таблица 2

**Линейная скорость фильтрации газа:**

$\Delta P/L$  – градиент давления;  $v_2$  – полученная в эксперименте максимальная линейная скорость фильтрации газа;  $v_n$  – расчетная максимальная линейная скорость фильтрации нефти;  $S_{e.o}$  – доля в образце остаточной воды, созданной методом центрифугирования

№ образца	Сухой образец			Частично водонасыщенный образец			
	$\Delta P/L$ , МПа/м	$v_2$ , м/мин	$v_n$ , м/мин	$S_{e.o}$ , %	$\Delta P/L$ , МПа/м	$v_2$ , м/мин	$v_n$ , м/мин
1	35,4	5,2	0,2	31,6	24,9	4,3	0,2
2	34,5	8,3	0,3	37,0	21,5	5,4	0,2
3	35,4	9,0	0,4	34,4	24,2	6,5	0,3
4	30,9	7,1	0,3	23,3	19,9	6,5	0,3
5	34,4	10,1	0,4	33,7	25,2	9,1	0,4
6	37,0	9,5	0,4	6,1	27,9	9,5	0,4
7	34,3	15,2	0,6	–	–	–	–
8	33,4	29,1	1,2	5,8	5,2	24,2	1,0
9	34,6	40,8	1,7	15,2	24,1	34,1	1,4
10	34,2	41,4	1,7	16,3	25,3	41,4	1,7
11	28,0	36,0	1,5	8,9	19,7	42,7	1,8
12	34,1	31,8	1,3	14,2	18,3	40,3	1,7
13	31,4	32,9	1,4	21,6	20,4	45,3	1,9
14	24,7	40,0	1,7	12,1	25,1	43,7	1,8
15	22,6	49,0	2,1	7,8	24,4	49,6	2,1
16	19,2	51,1	2,1	7,3	22,0	46,4	1,9
17	19,2	53,0	2,2	2,2	21,1	115,7	4,8

чии в породе водного раствора с объемной концентрацией более 5 % происходит существенное изменение прочностных свойств карбонатных породы [5].

Для исследования влияния остаточной воды на прочность породы образцы керна с остаточной водонасыщенностью, созданной методом центрифугирования при 4500 об/мин, помещались в условия неравноосного нагружения:  $\sigma_{oc} = 22$  МПа,  $\sigma_{рад} = 11$  МПа. Во второй серии (см. табл. 2) экспериментов также ни один из образцов не был разрушен в исследованном диапазоне скоростей фильтрации (до  $v_2 = 116$  м/мин). Экспериментально по-

лученные максимальные скорости фильтрации по исследованной группе образцов превышали проектные минимум в 130, максимум в 5250 раз. Результаты второй серии экспериментов показали, что даже в более жестких (остаточная вода и неравноосное нагружение) пластовых условиях при высоких скоростях фильтрации разрушения образцов горной породы не происходит.

Следует заметить, что после центрифугирования часть образцов, а именно: № 1 ( $K = 10,1$  мД;  $m = 22,8$  %;  $S_{e.o} = 31,6$  %), № 8 ( $K = 196$  мД;  $m = 24,8$  %;  $S_{e.o} = 5,8$  %) и № 9 ( $K = 266$  мД,  $m = 24,4$  %;  $S_{e.o} = 15,2$  %), расслоились

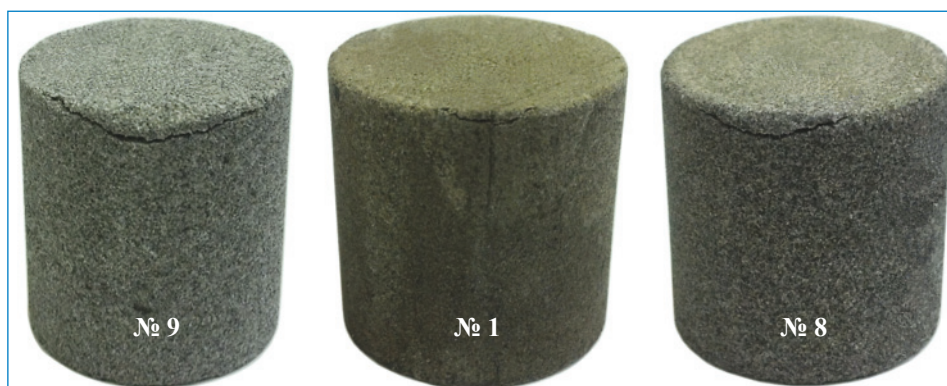
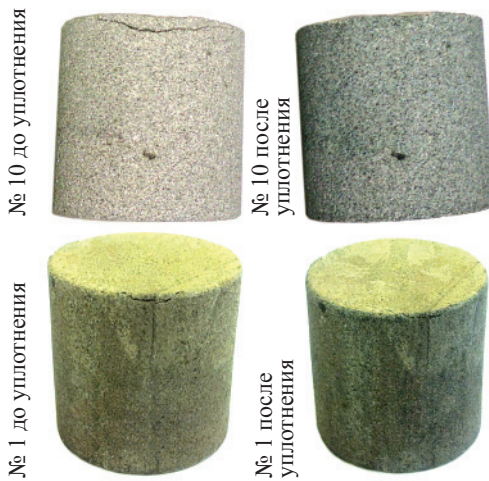


Рис. 3. Расслоившиеся образцы керна после центрифугирования



**Рис. 4. Уплотнение трещин на образцах керна после исследований в пластовых условиях**

вдоль напластования (перпендикулярно направлению фильтрации). На фотографиях (рис. 3) отчетливо видны трещины вблизи одного из торцов образцов. Тем не менее в процессе фильтрационных испытаний расслоившиеся образцы не были разрушены, а, наоборот, наблюдалось уплотнение трещин в месте первоначального расслоения (рис. 4).

\*\*\*

Подводя итог проведенным исследованиям, можно утверждать, что образцы пород продуктивных отложений дагинской свиты

при воздействии градиентов давления, соответствующих проектным дебитам, не разрушаются. Этот вывод опирается на то, что исследованная коллекция кернового материала представляет широкий диапазон фильтрационно-емкостных свойств продуктивных отложений дагинской свиты. Изучено влияние остаточной воды и неравноосного нагружения на прочность коллекции в пластовых условиях при высоких скоростях фильтрации. Показано, что разрушения сухих и частично насыщенных водой пород не происходило даже при наличии сдвигового напряжения, обусловленного неравноосной нагрузкой.

Обнаружено, что фильтрация воды в процессе центрифугирования оказывала более сильное воздействие на структуру скелета породы, чем фильтрация газа при больших градиентах в условиях пластовых напряжений.

Для более глубокой оценки условий начала разрушения породы-коллектора при фильтрации флюида с проектными скоростями фильтрации в будущем целесообразно провести еще одну серию экспериментов в условиях более низкого осевого напряжения. Возможно, основным фактором, препятствующим разрушению образцов в эксперименте, являются высокие сжимающие осевые напряжения. К тому же следует оговориться, что для полной имитации напряженно-деформированного состояния горной породы на стенке скважины в экспериментах не хватает реализации независимой третьей оси нагружения.

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

### Список литературы

1. Коваленко Ю.Ф. Анализ напряженного состояния и разрушения породы в окрестности нефтяной скважины: препринт / Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов, А.А. Галанин. – М.: ИПМех РАН. – 2009. – № 919. – 36 с.
2. Ковалев А.Л. Геомеханическая модель горного массива, содержащего разрабатываемую нефтегазовую залежь или подземное хранилище газа / А.Л. Ковалев, Е.В. Шеберстов // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 1 (12). – С. 204–215.

3. Орлов Д.М. Экспериментальное определение прочностных характеристик слабосцементированных песчаников и алевролитов в пластовых условиях / Д.М. Орлов, Н.В. Савченко, А.Е. Рыжов, Т.А. Перунова // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 1 (12). – С. 184–191.
4. Gutierrez M.S. Coupling of fluid flow and deformation in underground formations / M.S. Gutierrez, R.W. Lewis // Journal of Engineering Mechanics. – July 2002. – V. 128, is. 7. – P. 779–787.
5. Vásárhelyi B. Influence of water content on the strength of rock / B. Vásárhelyi, P. Ván // Engineering Geology. – 2006. – V. 84. – P. 70–74.
6. Carles P. Water-weakening of carbonates under stress: new insights into pore-volume compressibility measurements / P. Carles, P. Lapointe // Petrophysics (SPWLA). – 2005. – V. 46, is. 5. – P. 361–368.