

УДК 532.685

**ЗАВИСИМОСТЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ОТ НАПРЯЖЕНИЙ
ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОТВЕРСТИЕМ**

Л. А. Назарова¹, Л. А. Назаров¹, Н. А. Голиков^{2,3}, А. А. Скулкин¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: lanazarova@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия

Сконструирована и изготовлена лабораторная установка, позволяющая проводить фильтрационные испытания цилиндрических образцов с центральным отверстием, имитирующих условия функционирования реальных добычных скважин, при неоднородном напряженном состоянии. Выполнена серия экспериментов на искусственных образцах, изготовленных из среднезернистого песка, кондиционированного криогелем. Установлена эмпирическая зависимость проницаемости от эффективного напряжения, которая аппроксимируется экспоненциальной функцией с коэффициентом $\alpha = 0.0021 \text{ МПа}^{-1}$, что на порядок превышает общепринятые оценки α , использующие сжимаемость геоматериалов и горных пород.

Пороупругая среда, фильтрация, лабораторный эксперимент, криогель, дисковый образец, проницаемость, эффективное напряжение

DOI: 10.15372/FTPRPI20190503

Решение таких проблем механики добычи углеводородов, как обоснование схем разработки месторождений углеводородов и планирование режимов функционирования скважин, инверсия данных геофизического изучения скважин для выявления и изучения продуктивных интервалов и др., невозможно без достоверной информации о фильтрационно-емкостных свойствах пород [1, 2]. Значения последних зависят от литолого-петрофизических характеристик, структуры и действующих в массиве физических полей [3, 4]. Лабораторные испытания пород-коллекторов, углей и гранулированных сред, а также натурные исследования показывают, что с ростом среднего напряжения σ и уменьшением порового давления p проницаемость k падает, поэтому для аппроксимации экспериментальных данных используют функциональное соотношение $k = k(s)$, где $s = \sigma - p$ — эффективное напряжение [5–13]. В [14, 15] приведены обзоры публикаций по этой тематике. С увеличением глубины эффект уменьшения проницаемости начинает влиять на результаты интерпретации данных геофизического изучения скважин [16, 17].

Большинство лабораторных исследований для установления зависимости $k(\sigma, p)$ проводятся на стандартных цилиндрических образцах [18, 19]. Здесь с использованием результатов теоретического анализа [20] и созданной оригинальной установки, позволяющей осуществлять фильтрационные испытания на дисковых образцах с центральным отверстием в условиях неоднородного напряженного состояния, разработан и реализован метод определения зависимости $k(s)$ для геоматериалов по данным лабораторных экспериментов, воспроизводящих реальные условия функционирования скважины.

МОДЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Образцы для лабораторных испытаний создавались по оригинальной технологии из среднезернистого песка с модулем крупности 2.0–2.5, кондиционированного криогелем на основе поливинилового спирта [21, 22]. Песок и криогель смешивали в соотношении 7 : 3 и помещали в формы, которые подвергали четырем циклам заморозки/оттаивания продолжительностью 96 ч каждый. Затем экземпляры высушивали при комнатной температуре 14–21 сут для стабилизации деформационно-прочностных свойств. Изготовлены два типа образцов: три в форме толстого диска (радиус $r_1 = 75$ мм, толщина $h = 190$ мм, в центре высверливался канал радиусом $r_0 = 4$ мм) и шесть цилиндрических (диаметр 30 мм, высота 62 мм), представленные на рис. 1а. С последними проведены стандартные фильтрационные эксперименты, позволившие определить среднюю референтную проницаемость $k_r = 106$ мД модельного геоматериала [23].

Для определения упругих свойств (модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν) и предела прочности σ_c цилиндрические образцы по стандартной методике испытывались на одноосное сжатие [24, 25]. На рис. 1б приведена одна из кривых “напряжение σ_1 – деформация ε_1 ” (кружками отмечен линейный участок), по которым найдены $E = 0.73$ ГПа, $\nu = 0.23$ и $\sigma_c = 9.0$ МПа (средние значения) искусственного геоматериала.

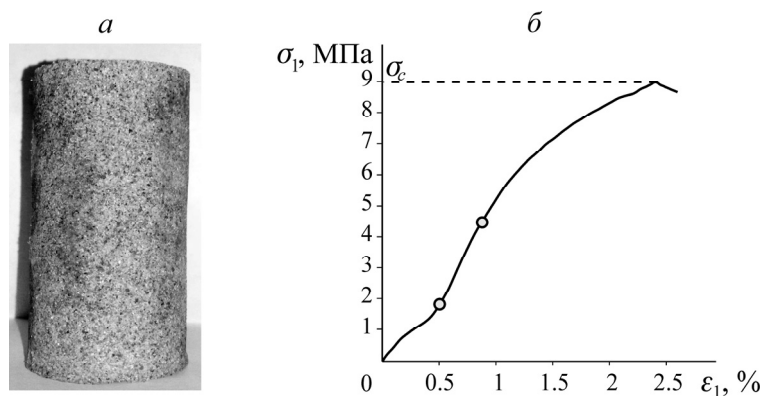


Рис. 1. Образец из искусственного геоматериала (а) и диаграмма $\sigma_1 - \varepsilon_1$ испытаний на одноосное сжатие (б)

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 2а показана схема лабораторного стенда для проведения фильтрационных испытаний дисковых образцов в условиях однородного и неоднородного напряженного состояния. Диск 1 в изолирующей резиновой манжете 2 помещается в металлическую камеру 3 (рис. 2б).

Торцы диска между дном камеры и крышкой 4 герметизируются с помощью эластичных прокладок 5. Осесимметричное радиальное сжатие производится двумя ортогональными парами пуансонов 6, нагрузка на которые передается герметизированными штоками 7. Пространство между манжетой с образцом и камерой заполнено крупнозернистым песком 8 (модуль крупности 2.5–3.0 [21]), который обеспечивает неподвижность образца в ходе испытаний и имеет проницаемость $> 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, поэтому его влиянием на фильтрационные характеристики системы можно пренебречь.

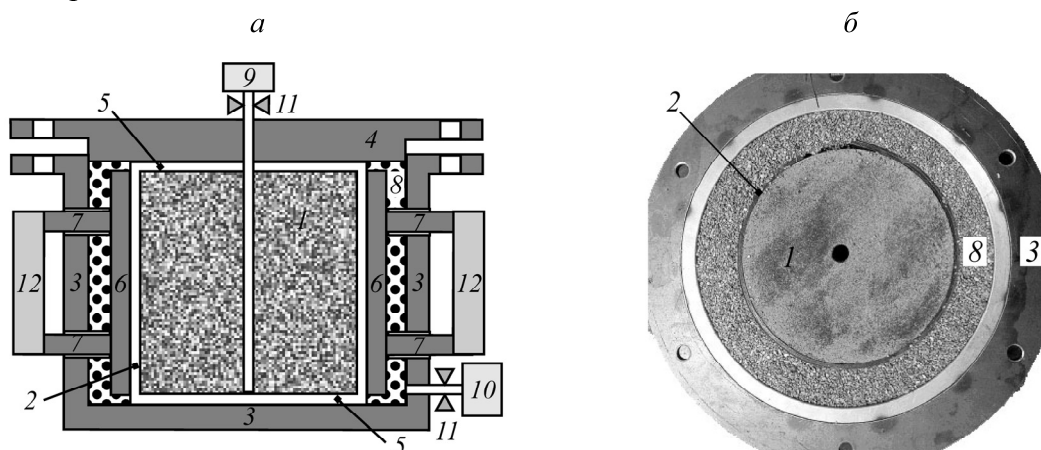


Рис. 2. Схема лабораторной установки (а) и образец в форме толстого диска, помещенный в испытательную камеру (б): 1 — диск; 2 — резиновая манжета; 3 — металлическая камера; 4 — крышка; 5 — прокладка; 6 — пуансон; 7 — шток; 8 — крупнозернистый песок; 9 — компрессор; 10 — расходомер; 11 — вентиль; 12 — гидравлический пресс

Нагнетание газа (воздуха) с постоянным давлением осуществлялось компрессором 9 через центральный канал, расход регистрировался расходомером 10 с точностью 2 %. Герметичность системы контролировалось по постоянству избыточного давления 0.15 МПа в камере после закрытия вентилей 11 компрессора и расходомера. Собранная камера помещалась в гидравлический пресс 12 между пуансонами (рис. 3).

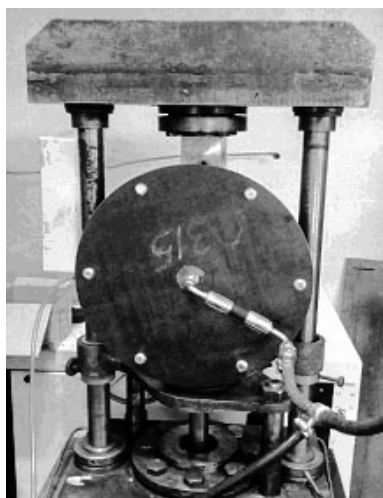


Рис. 3. Общий вид лабораторной установки для фильтрационных испытаний дисковых образцов в условиях однородного и неоднородного напряженного состояния

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ, ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На внешнем контуре дискового образца прикладывалось радиальное напряжение, амплитуда которого S_m контролировалась давлением в гидроцилиндрах пресса (рис. 3). При каждом S_m в центральном канале создавалось постоянное давление p_n , в стационарном режиме фильтрации измерялся расход Q_{mn} . Результаты экспериментов для $S_m = 0, 0.85, 1.70, 2.50, 3.40$ МПа и $p_n = 0.105, 0.110, \dots, 0.130$ МПа представлены в таблице.

Данные измерения расхода Q_{mn} и результаты интерпретации

p_n , МПа	S_m , МПа					k_0 , мД	δ , %	α , МПа ⁻¹
	0	0.85	1.7	2.5	3.4			
	Q_{mn} , мл/мин							
0.105	50.0	47.0	45.0	42.5	38.5	106.2	0.2	0.0336
0.110	52.5	49.0	46.5	43.5	41.0	105.8	0.2	0.0334
0.115	54.0	51.5	50.0	47.0	44.0	104.9	1.0	0.0276
0.120	58.0	53.5	50.5	48.0	46.0	105.6	0.4	0.0318
0.125	59.5	55.5	52.5	49.5	47.5	104.7	1.3	0.0308
0.130	61.5	59.0	54.5	51.5	49.0	105.6	0.4	0.0324
Среднее значение						105.5	0.5	0.0316

Пороупругая модель. Напряженно-деформированное состояние и поле давлений в образце описывается пороупругой моделью [26], включающей:
уравнение равновесия

$$\sigma_{rr,r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0; \quad (1)$$

закон Гука

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{rr} + \lambda\varepsilon_{\theta\theta} - p, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda\varepsilon_{rr} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{\theta\theta} - p; \end{aligned} \quad (2)$$

соотношения Коши

$$\varepsilon_{rr} = u_{,r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r}; \quad (3)$$

уравнение неразрывности

$$(rW)_{,r} = 0 \quad (4)$$

и закон Дарси

$$W = -\frac{k(\sigma, p)}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (5)$$

где (r, θ, z) — цилиндрическая система координат с началом в центре образца, ось аппликат направлена по оси канала; σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, ε_{rr} , $\varepsilon_{\theta\theta}$ — компоненты тензоров напряжений и деформаций; λ и μ — параметры Ламе; u — радиальное смещение; p , W , η — давление, радиальная скорость и вязкость флюида.

Примем, что проницаемость зависит от эффективного напряжения по экспоненциальному закону:

$$k(\sigma, p) = k_0 e^{-\alpha(\sigma-p)}, \quad (6)$$

k_0 и α — эмпирические константы, подлежащие определению [14, 20].

Для уравнений (1)–(5) в соответствии с условиями эксперимента сформулированы следующие граничные условия:

$$\sigma_{rr}(r_0) = p_n, \quad \sigma_{rr}(r_1) = S_m, \quad (7)$$

$$p(r_0) = p_n, \quad p(r_1) = p_0. \quad (8)$$

Здесь p_0 — атмосферное давление; сжимающие напряжения положительные.

Поскольку в процессе испытаний $p_n \ll S_m$, то пренебрегаем давлением в (2), система (1), (2), (3), (7) имеет решение

$$\sigma_{rr}(r) = S_m \frac{1-r_0^2/r^2}{1-r_0^2/r_1^2}, \quad \sigma_{\theta\theta}(r) = S_m \frac{1+r_0^2/r^2}{1-r_0^2/r_1^2} \quad (9)$$

(задача Ламе [19]). Радиальное напряжение σ_{rr} меньше окружного $\sigma_{\theta\theta}$, которое достигает максимума на контуре канала. Чтобы в процессе испытаний деформирование образца было упругим, необходимо выполнить условия $\sigma_{\theta\theta}(r_0) < \sigma_c$, откуда найдем верхнюю оценку для внешней нагрузки:

$$S_m < S_*,$$

где $S_* = 0.5(1-r_0^2/r_1^2)\sigma_c$. Величина S_* для исследуемого образца составила 4.95 МПа, это и обусловило диапазон изменения S_m .

Дисковый образец жестко закрепили в осевом направлении, поэтому выполнено условие плоской деформации, тогда $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})$ и, принимая во внимание (9),

$$\sigma = \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{3} = \omega S_m, \quad (10)$$

$\omega = (1+\nu)/3(1-r_0^2/r_1^2)$, т. е. среднее напряжение не зависит от радиуса. С учетом этого факта система (4), (5) сводится к гармоническому уравнению относительно функции $P = \exp(\alpha p)$ $\Delta P = 0$, решая которое с граничными условиями (8), найдем распределение давления в образце:

$$p(r) = \frac{1}{\alpha} \ln \left[e^{\alpha p_n} - (e^{\alpha p_n} - e^{\alpha p_0}) \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_1/r_0)} \right]. \quad (11)$$

Из (5), (6), (10) и (11) находится расход на внешнем контуре образца $r = r_1$:

$$Q(k_0, \alpha, S_m, p_n) = 2\pi h k_0 \frac{\exp(\alpha p_n) - \exp(\alpha p_0)}{\alpha \eta \ln \frac{r_1}{r_0}} \exp(-\alpha \omega S_m). \quad (12)$$

Интерпретация экспериментальных данных. Расчеты проводились при $p_0 = 0.1$ МПа, $\eta = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с (вязкость воздуха при 20 °С) и $\omega = 0.41$. Для определения эмпирических параметров k_0 и α вводилась целевая функция

$$\Phi(k_0, \alpha, p_n) = \sum_{m=1}^5 [Q(k_0, \alpha, S_m, p_n) - Q_{mn}]^2,$$

минимум которой, доставляющий искомые величины, при каждом p_n находился модифицированным методом сопряженных градиентов [27, 28]. В таблице приведены результаты расчетов, а также относительные отклонения $\delta = |1 - k_0 / k_r|$ найденных значений проницаемости от референтного k_r , показывающие хорошую точность предлагаемого метода определения зависимости фильтрационных свойств пород-коллекторов от напряжений. На рис. 4 кружками обозначены данные измерений расхода, линиями 1–6 показаны зависимости расхода от напряжений, рассчитанные по (12) для средних значений k_0 и α (таблица) при $p_n = 0.105, 0.110, \dots, 0.130$ МПа.

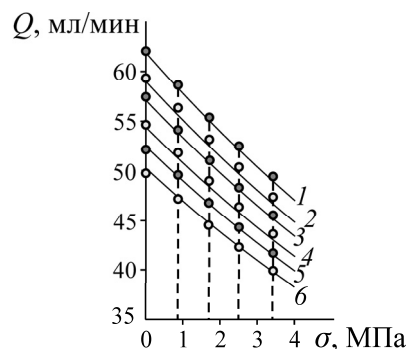


Рис. 4. Данные экспериментов и аппроксимирующие зависимости

Величину α предлагается оценивать сжимаемостью C пород, значение которой при упругом деформировании обратно модулю объемного сжатия $K = E / 3(1 - 2\nu)$ [29]. У исследуемого материала $C = 0.0021$ МПа⁻¹, это более чем на порядок меньше полученного значения α , поэтому для пород с низкими деформационными показателями необходимо определять α из прямых экспериментов.

ВЫВОДЫ

Созданная лабораторная установка, разработанная и апробированная схема эксперимента позволяют проводить физическое моделирование массопереноса в условиях однородного и неоднородного напряженного состояния в дисковых образцах и оценивать параметры, характеризующие связь геомеханических и гидродинамических процессов в прискважинной зоне. Дальнейшие исследования будут акцентированы на определении эмпирических зависимостей фильтрационно-емкостных параметров от напряжений и давления флюида при неравнокомпонентном внешнем нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fjaer E., Holt R. M., Raaen A. M., Risnes R., and Horsrud P. Petroleum related rock mechanics, Elsevier, 2008. — 492 p.
2. Dake L. P. The practice of reservoir engineering (Revised Edition), Elsevier, 2001. — 546 p.
3. Speight J. G. An introduction to petroleum technology, economics, and politics, John Wiley & Sons Limited, 2011. — 336 p.
4. Van Golf-Racht T. Fundamentals of fractured reservoir engineering, Elsevier, 1982. — 732 p.

5. **Holt R. M.** Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field, *SPE Formation Evaluation*, 1990, No. 12. — P. 44–448.
6. **Ghabezloo S., Sulem J., Guedon S., and Martineau F.** Effective stress law for the permeability of a limestone, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2009, Vol. 46. — P. 297–306.
7. **Espinoza D. N., Vandamme M., Pereira J.-M., Dangla P., and Vidal-Gilbert S.** Measurement and modeling of adsorptive–poromechanical properties of bituminous coal cores exposed to CO₂: Adsorption, swelling strains, swelling stresses and impact on fracture permeability, *J. Coal Geol.*, 2014, Vol. 134–135. — P. 80–95.
8. **Pan Z. and Connell L. D.** Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data, *J. Coal Geol.*, 2012, Vol. 92. — P. 1–44.
9. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Голиков Н. А., Хан Г. Н.** Проницаемости гранулированного геоматериала от напряжений // ГИАБ. — 2018. — № S49. — С. 71–81.
10. **Urumovic K. and Urumovic Sr. K.** The effective porosity and grain size relations in permeability functions, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2014, Vol. 11. — P. 6675–6714.
11. **Schutjens P. M. T. M., Hanssen T. H., Hettema M. H. H., Merour J., de Bree P., Coremans J. W. A., and Helliesen G. J.** Compaction-induced porosity/permeability reduction in sandstone reservoirs: Data and model for elasticity-dominated deformation, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2004, Vol. 7 (3). — P. 202–216.
12. **Rhett D. W. and Teufel L. W.** Effect of reservoir stress path on compressibility and permeability of sandstones, *SPE Paper*, No. 24756, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition Washington DC*, 4–7 October, 1992.
13. **Randall M. S., Conway M., Salter G., and Miller S.** Pressure-dependant permeability in shale reservoirs implications for estimated ultimate recovery, *AAPG Search and Discovery Article*, 2011.
14. **Ma J.** Review of permeability evolution model for fractured porous media, *J. Rock Mech. and Geo. Eng.*, 2015, Vol. 7 (3). — P. 351–357.
15. **Peng S. and Zhang J.** Stress-dependent permeability, *Engineering Geology for Underground Rocks*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. — 319 p.
16. **Ельцов И. Н., Назаров Л. А., Назарова Л. А., Нестерова Г. В., Эпов М. И.** Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // ДАН. — 2012. — Т. 445. — № 6. — С. 677–680.
17. **Назарова Л. А., Назаров Л. А., Эпов М. И., Ельцов И. Н.** Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 37–49.
18. **Torsaeter O. and Abtahi M.** Experimental reservoir engineering, *Laboratory work book*, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics Norwegian University of Science and Technology, 2003. — 107 p.
19. **Jaeger J. C., Cook N. G. W., and Zimmerman R.** Fundamentals of rock mechanics, Wiley, 2007. — 488 p.
20. **Назарова Л. А., Назаров Л. А.** Геомеханические и гидродинамические поля в продуктивном пласте в окрестности скважины с учетом зависимости фильтрационных свойств пород от эффективных напряжений // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 11–20.
21. **ГОСТ 8736-2014.** Песок для строительных работ. — М.: Стандартинформ, 2019. — 11 с.
22. **Манжай В. Н., Фуфаева М. С.** Свойства криогелей и их применение в технологиях добычи и транспорта нефти // Нефть и газ. — 2011. — № 6. — С. 104–109.
23. **ГОСТ 26450.2-85.** Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.

- 24. ГОСТ 28985-91.** Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
- 25. ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
- 26. Coussy O.** Mechanics and physics of porous solids, John Wiley & Son Ltd, 2010. — 281 p.
- 27. Nazarova L. A., Nazarov L. A., Shkuratnik V. L., Protasov M. I., and Nikolenko P. V.** An acoustic approach to the estimation of rock mass state and prediction of induced seismicity parameters: theory, laboratory experiments, and case study, ISRM AfriRock — Rock Mechanics for Africa, 2017. — P. 593–604.
- 28. Nazarov L. A., Nazarova L. A., Karchevsky A. L., and Panov A. V.** Estimation of stresses and deformation properties in rock mass based on inverse problem solution using measurement data of free boundary displacement, Sib. Zhurn. Industr. Matem., 2012. Vol. 15, No. 4. — P. 102–109.
- 29. Щелкачев В. Н.** Избранные труды: в 2 т. — М.: Недра, 1990. — Т. 1. — 232 с.

Поступила в редакцию 9/IX 2019

После доработки 9/IX 2019

Принята к публикации 23/IX 2019