

УДК 622.276.1

ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ

**А. А. ТИШКОВ, И. В. ЛЫМАРЬ, Е. Н. ХОДЬКОВ,
А. А. ЦАГЕЛЬНИК, М. В. ТРУС**

Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти, г. Гомель

Ключевые слова: деформация, давление, горная порода, порода-коллектор, керновый материал, открытая емкость, проницаемость.

Введение

Пластовое давление в залежи является важным параметром, характеризующим энергетику пласта. Выработка запасов углеводородов сопровождается падением пластового давления, при этом при неизменной нагрузке вышележащих пород (литостатическое давление) растет эффективное давление в залежи (разница между литостатическим и пластовым давлениями). Рост эффективного давления в залежах вследствие снижения пластовой энергии приводит к изменению напряженно-деформированного состояния в горных породах.

С целью определения влияния снижения пластового давления на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов нефти в институте БелНИПИнефть в рамках научно-исследовательской работы № 46.2017 «Количественная оценка изменения фильтрационно-емкостных свойств карбонатных пород-коллекторов в процессе разработки залежей нефти» проводились динамические испытания в условиях, близких к пластовым. Исследования выполнялись на установке Autoflood–700 компании «Vinci Technologies SA» (Франция) при сменяющихся друг друга циклах нагрузки и разгрузки, которые реализовывались посредством снижения и повышения пластового (порового) давления. Таким образом, при постоянном литостатическом (давлении обжима) и переменном поровом давлении изменялось эффективное напряжение в породе.

Основная часть

В качестве объектов исследований выступали образцы кернового материала с различных месторождений Припятского прогиба, из которых формировались керновые модели пласта (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика керновых моделей пласта

Месторождение	Пласт	Литоология	Структура емкостного пространства	Длина модели, см	Площадь поперечного сечения, см ²	Коэффициент проницаемости по газу, $1 \cdot 10^{-3}$ мкм ²	Открытая емкость в атмосферных условиях, %
<i>Модель № 1</i>							
Южно-Сосновское	D ₃ zd-ptr	Доломит	Порово-кавернозная	7,532	6,799	9,417	10,07
<i>Модель № 2</i>							
Мармовичское	D ₃ zd-el	Доломит известковый	Порово-трещинная	11,739	6,689	7,138	12,24
<i>Модель № 3</i>							
Осташковичское	D ₃ zd-ptr	Известняк доломитистый	Порово-трещинно-кавернозная	9,526	6,979	9,563	8,06
<i>Модель № 4</i>							
Славянское	D ₃ zd-el	Доломит	Порово-трещинная	11,277	6,813	5,683	8,58

С целью максимально достоверной оценки влияния знакопеременных нагрузок на скелет породы динамические исследования проводились на полностью водонасыщенных моделях пласта, что ввиду специфики проводимых экспериментов (изменение пластового давления, а не горного), с одной стороны, исключало возникновение фазовых эффектов в породе в случае двухфазного насыщения, с другой – позволяло нивелировать изменение вязкости при изменении пластового давления (в случае нефтенасыщенных моделей пласта). Термобарические условия проведения экспериментов были идентичными для всех керновых моделей (табл. 2).

Таблица 2

Условия проведения динамических исследований

Параметр	Значение параметра
Температура, °С	60
Горное давление, МПа	50
Начальное пластовое давление, МПа	25
Начальное эффективное давление, МПа	25
Конечное пластовое давление, МПа	2,7
Интервал изменения пластового давления, МПа	5,6
Объемная скорость закачки, см ³ /мин	0,1–0,4

Подготовка образцов и пластовых флюидов к экспериментальным исследованиям проводилась в соответствии с СТП 09100.17015.136–2016 «Определение коэффициента вытеснения нефти в пластовых условиях» [3].

В качестве опорного флюида, которым насыщались керновые модели, а также по которому определялась фазовая проницаемость, использовалась модель пластовой воды с динамической вязкостью при 60 °С, $\mu_v = 0,84$ мПа · с; плотностью при 20 °С, $\rho = 1,15$ г/см³.

Методика проведения динамических испытаний:

- компоновка керновой модели пласта, насыщенной пластовой водой в манжете кернодержателя;
- прокачка пластовой воды через модель пласта с повышением давления до пластового и опережающим увеличением давления обжима (горного) до значений, превышающих давление в составном образце не менее чем на 3 МПа;
- моделирование температуры исследуемого объекта с использованием суховоздушного термощафа;
- моделирование горного давления при закрытой входной линии в модель пласта с последующей технологической выдержкой не менее 24 ч;
- замер объема вышедшей в результате действия деформационных процессов воды;
- определение проницаемости по пластовой воде путем прокачки ее через керновую модель до стабилизации фильтрационных процессов;
- поэтапное снижение и повышение порового давления (с шагом 5–7 МПа) с выдержками не менее 12 ч между этапами и последующим определением проницаемости по воде на каждом из этапов.

Результаты динамических исследований

На рис. 1–4 показана динамика изменения коэффициента проницаемости по воде от эффективного давления для четырех керновых моделей.

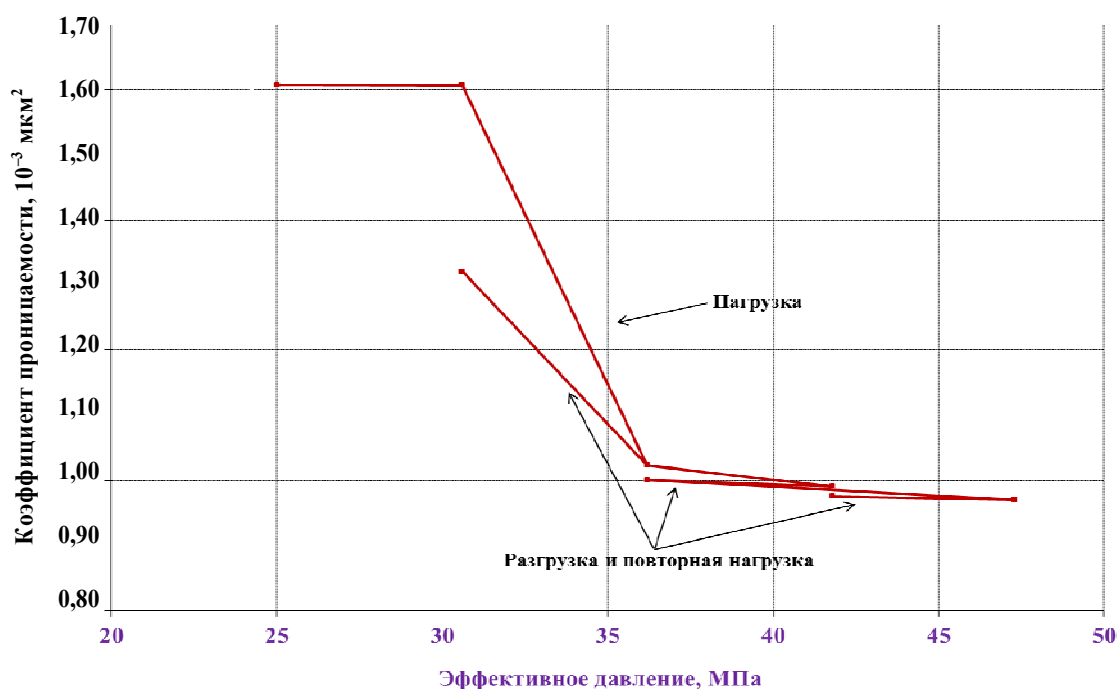


Рис. 1. Динамика изменения коэффициента проницаемости от эффективного давления по керновой модели № 1

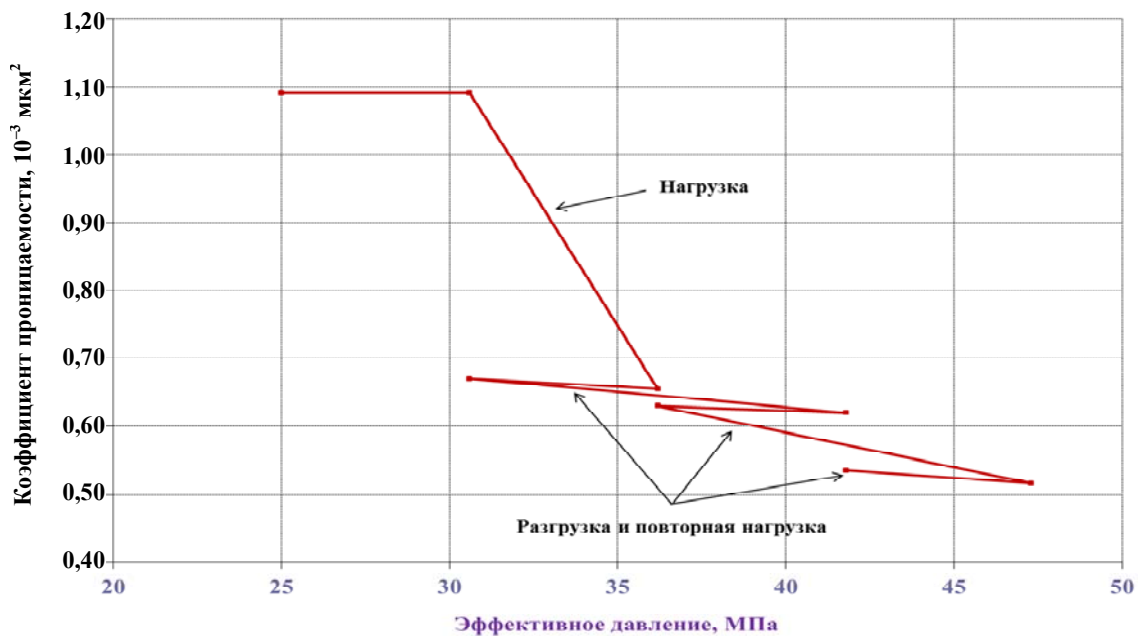


Рис. 2. Динамика изменения коэффициента проницаемости от эффективного давления по керновой модели № 2

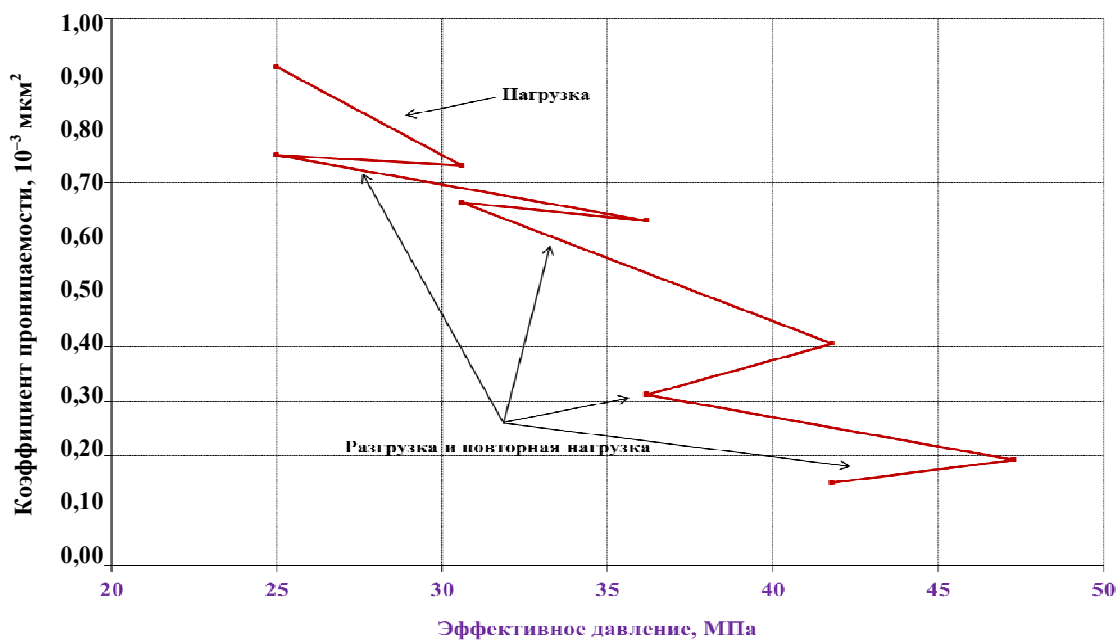


Рис. 3. Динамика изменения коэффициента проницаемости от эффективного давления по керновой модели № 3

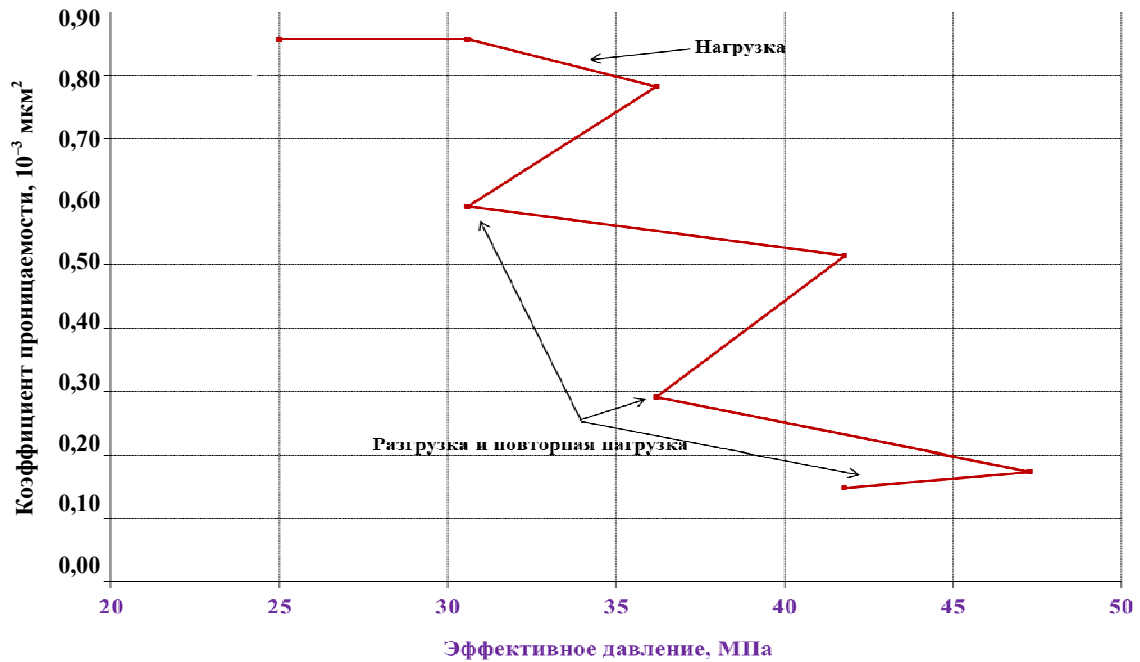


Рис. 4. Динамика изменения коэффициента проницаемости от эффективного давления по керновой модели № 4

Для анализа коллекторских свойств в условиях изменения напряженно-деформированного состояния среды результаты проведенных экспериментов были сведены в общую таблицу (табл. 3).

Таблица 3

Обобщенные результаты по определению фильтрационно-емкостных свойств пород при изменении пластового давления

Месторождение, залежь	Структура емкостного пространства	Эффективное давление начала деформационных процессов, МПа	Изменение емкости при начальном эффективном давлении, %	Максимальное изменение проницаемости, %
Южно-Сосновское, D ₃ zd-ptr	Порово-кавернозная	36,2	-11,63	-39,65
Мармовичское, D ₃ zd-el	Порово-трещинная	36,2	-8,63	-52,63
Осташковичское, D ₃ zd-ptr	Порово-трещинно-кавернозная	30,6	-12,13	-83,43
Славянское, D ₃ zd-el	Порово-трещинная	36,2	-6,37	-82,73

Анализ результатов динамических исследований

Анализ результатов, отображенных в табл. 3, а также на рисунках выше, показывает необратимое снижение фильтрационно-емкостных свойств при изменении пла-

стового давления. Циклы разгрузки, следующие за циклами нагрузки, при которых отмечалось снижение проницаемости, не обеспечивали полного ее восстановления. Более того, по моделям № 3 и 4, отмечается, что проницаемость при разгрузке снижается в большей степени, чем при предшествующей нагрузке (рис. 3, 4). Это может быть обусловлено ограничениями по времени проведения лабораторных испытаний в сравнении с длительностью проявления процессов деформации скелета породы и его структурных элементов, когда в силу более высокой сжимаемости первыми реагируют на изменение пластового давления трещины, а лишь затем каверны и поры [2].

Анализируя величины максимального снижения проницаемости по керновым моделям относительно их структуры емкостного пространства и начальных коллекторских свойств, удалось установить определенную зависимость (рис. 5).

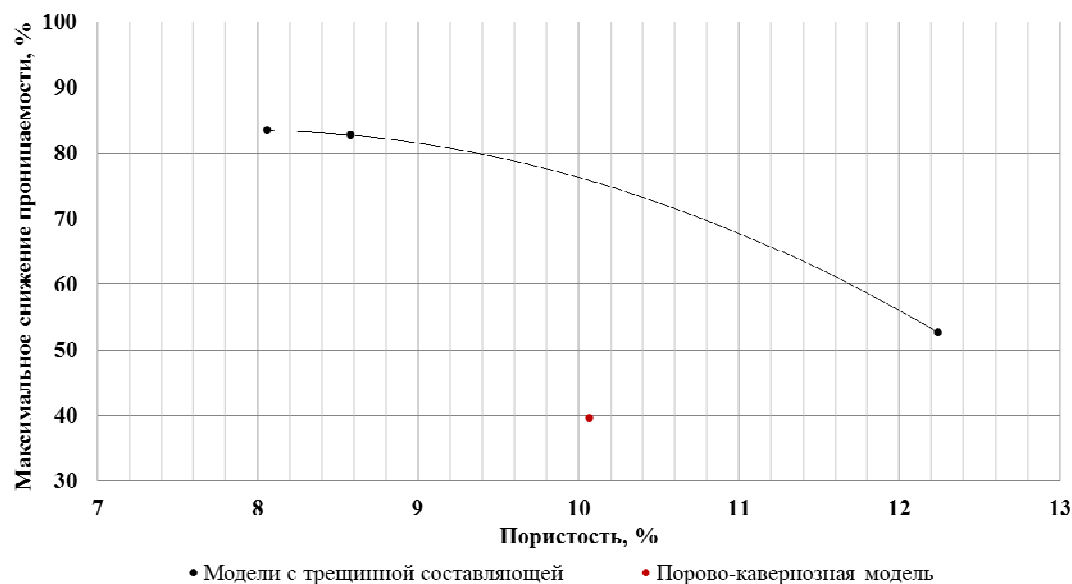


Рис. 5. Зависимость максимального снижения проницаемости от пористости керновых моделей пласта

Из графика, представленного на рис. 5, следует, что керновые модели пласта со схожей структурой емкостного пространства, в частности с развитой трещинной составляющей, подвержены деформациям тем сильнее, чем меньше их пористость.

Оценивая величины эффективных давлений, при которых стали отмечаться деформации, можно отметить, что по сложнопостроенной порово-трещинно-кавернозной модели Осташковичского месторождения, межсолевой залежи, деформации отмечаются сразу после снижения пластового давления (эффективное давление 30,6 МПа), по данному керновому материалу, в сравнении с другими образцами, было отмечено максимальное снижение проницаемости (83,43 %). В то же время по остальным трем моделям изменение проницаемости стало отмечаться не сразу после снижения порового давления. Эффективное давление начала деформационных процессов для моделей № 1, 2 и 4 составило 36,2 МПа.

Открытая емкость исследуемых пород в сравнении с атмосферными условиями снижалась при создании начальных пластовых условий на 6,37–12,13 %.

По данным изменения открытой емкости были рассчитаны коэффициенты сжимаемости пород при начальных эффективных давлениях по следующей формуле [1]:

$$\beta_n = -\frac{m_{\text{атм}} - m_{\text{пласт}}}{m_{\text{атм}} (P_{\text{пласт}} - P_{\text{атм}})},$$

где β_n – коэффициент сжимаемости породы, МПа^{-1} ; $m_{\text{атм}}$ – открытая емкость в атмосферных условиях, %; $m_{\text{пласт}}$ – открытая емкость при начальном эффективном давлении, %; $P_{\text{пласт}}$ – начальное эффективное давление, МПа; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, МПа.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения коэффициента сжимаемости пород

Месторождение, залежь	Структура емкостного пространства	Абсолютная проницаемость по газу в атмосферных условиях, 10^{-3} мкм^2	Открытая емкость в атмосферных условиях, %	Открытая емкость при начальном эффективном давлении, %	Коэффициент сжимаемости породы, 10^{-4} МПа^{-1} для 25 МПа
Южно-Сосновское, D ₃ zd-ptr	Порово-кавернозная	9,417	10,07	8,9	46,53
Мармовичское, D ₃ zd-el	Порово-трещинная	7,138	12,24	11,19	34,53
Осташковичское, D ₃ zd-ptr	Порово-трещинно-кавернозная	9,563	8,06	7,08	48,53
Славянское, D ₃ zd-el	Порово-трещинная	5,683	8,58	8,04	25,48

Из табл. 4 видно, что для пород межсолевых залежей Осташковичского и Южно-Сосновского месторождений характерны наибольшие значения коэффициента сжимаемости. Однако необходимо отметить, что на величину коэффициента сжимаемости по данным моделям могло повлиять наличие каверн на боковых поверхностях образцов (в особенности по модели № 1), в которые вдавливалась манжета кернодержателя при возрастающих нагрузках. Следовательно, возможно некоторое завышение коэффициента сжимаемости по данным керновым моделям.

Таким образом, результаты проведенных динамических испытаний подтвердили изменение как проницаемости, так и емкости исследуемых образцов пород. Выполненные фильтрационные исследования на керновых моделях пласта свидетельствуют о значительном влиянии деформационных процессов на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов, при этом при прочих равных условиях чем хуже начальные коллекторские свойства пород, тем сильнее влияние деформаций. В условиях данных коллекторов при изменении эффективного давления с 25 до 47,3 МПа, отмечалось снижение проницаемости по воде в 1,7–6 раз. Эффективные давления начала деформации скелета породы составили 30,6–36,2 МПа. С некоторой долей условности (проведение экспериментов при ограничении во временном факторе) данные величины можно принять за критические эффективные давления, так как выше них отмечались только необратимые (модели № 2–4), либо частично обратимые (модель № 1) деформации.

Необходимо отметить, что ввиду специфики проведения экспериментов с использованием керна при однофазном его насыщении условно несжимаемым флюидом (водой) можно утверждать об еще более значительном влиянии деформацион-

ных процессов при проецировании условий двухфазной (нефть–вода) либо трехфазной (газ–нефть–вода) насыщенности пород, где помимо сжимаемости собственно скелета породы на проницаемость при изменении пластового давления будут в различной степени влиять фазовые эффекты, а также сжимаемость и изменение физико-химических свойств углеводородных систем.

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения динамических исследований удалось установить:

- действие деформационных процессов при снижении пластового давления в сложно-построенных коллекторах приводит к значительному ухудшению фильтрационно-емкостных свойств;
- при прочих равных условиях, чем хуже начальные коллекторские свойства пород, тем сильнее влияние деформаций;
- полного восстановления коллекторских свойств в процессе разгрузки (увеличения пластового давления) не отмечается;
- во избежание снижения продуктивности скважин с потерей части активных запасов для залежей с карбонатным трещинным типом коллекторов начальную стадию разработки следует проектировать с плавным снижением пластового давления;
- необходим постоянный мониторинг эффективных давлений на объектах с повышенными эффективными напряжениями.

Литература

1. Болдырев, Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах) / Г. Г. Болдырев, М. В. Малышев. – Пенза : ПГУАС, 2009. – 412 с.
2. Извлечение нефти из карбонатных коллекторов / М. Л. Сургучев [и др.]. – М. : Недра, 1987. – 230 с.
3. Определение коэффициента вытеснения нефти в лабораторных условиях : СТП 09100.17015.136–2016. – Введ. 12.12.2016. – Гомель : БелНИПИнефть, 2016. – 25 с.

Получено 16.02.2018 г.