

УДК 622.279

Б.А. Григорьев, Д.М. Орлов, Н.В. Савченко, А.Е. Рыжов

Исследование начальных градиентов давления при фильтрации через низкопроницаемые породы-коллекторы

В связи с выработкой легкодоступных и высокопродуктивных месторождений в мире наблюдается тенденция ухудшения структуры запасов. Так, например, условия эксплуатации месторождений усложняются с переходом на освоение запасов залежей, находящихся на больших глубинах при аномально высоких пластовых давлениях и температурах. Породы-коллекторы глубокозалегающих продуктивных отложений характеризуются пониженными фильтрационно-емкостными свойствами. Увеличение коэффициентов извлечения газа, конденсата и нефти из плотных коллекторов низкой проницаемости с применением комплексных методов воздействия на пласт остается важной задачей, требующей детального изучения особенностей фильтрации в таких породах.

В работе рассмотрен вопрос фильтрации газа через низкопроницаемые породы-коллекторы на примере ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). Исследования проводились на образцах керна, в которых создавалась остаточная водо- и конденсатонасыщенность, адекватная реальному распределению насыщенностей в пластовых условиях. Выполнялось физическое моделирование влияния разработки месторождения на газоотдачу пласта.

В тонкопоровых низкопроницаемых коллекторах при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород в процессе эксплуатации месторождений происходит существенное перераспределение насыщенности жидкой фазы, что может привести к прекращению фильтрации (возникновение эффекта НГД – начального градиента давления). Суть эффекта НГД заключается в том, что фильтрация флюида начинается только при превышении градиентом давления некоторого порогового значения $|gradP|_0$ [1–7]. В литературе в основном рассматриваются три варианта проявления эффекта НГД: при фильтрации воды через глинистые породы [2], фильтрации неньютоновских жидкостей [3] и фильтрации газа через низкопроницаемые породы с начальной насыщенностью жидкой фазой [4–7]. В данной работе будет выполнено подробное исследование условий возникновения эффекта НГД и влияния напряженно-деформированного состояния пород на его величину. Наиболее распространенные причины возмущения начального напряженно-деформированного состояния пород – это мероприятия по вводу скважин в эксплуатацию, интенсификации притока флюидов (ГРП, кислотная обработка и т.д.), а также рост эффективного давления в пласте с падением пластового давления при разработке залежи на истощение.

Экспериментальная установка

Исследования проводились на компьютеризированной установке двухфазной фильтрации Autoflood AFS-300 (CoreLab, USA). Основным достоинством этой установки является оснащение ее высокоточными приборами и аппаратурой: электронными дифференциальными датчиками давления, поршневыми насосами и акустическим сепаратором. Ультразвуковой сепаратор высокого давления позволяет автоматически определять насыщенность моделей пласта методом материального баланса при различных режимах фильтрации в заданных термобарических условиях. Система двухфазной фильтрации выполнена по принципу разомкнутого потока фильтрации флюидов и позволяет изучать однофазные и двухфазные течения, а также исследовать раз-

Ключевые слова:
низкопроницаемый коллектор, начальный градиент давления, пластовое давление, напряженно-деформированное состояние.

Keywords:
low-permeability reservoir rocks, threshold pressure gradient, reservoir pressure, stress-strain state.

личные методы воздействия на пласт и, следовательно, флюидоотдачу (рис. 1).

Основными узлами установки, сконфигурированной для исследования особенностей однофазной фильтрации в низкопроницаемых коллекторах, являются: блок насосов фильтрации 1 для поддержания заданного постоянного расхода или давления, аккумулятор с газом (метаном) 2, кернодержатель 3 с системой поддержания горного давления 4, ультразвуковой двухфазный сепаратор высокого давления 5, регулятор давления 6 с насосом поддержания пластового давления 7, система теплотрических расходомеров 8 и система измерения дифференциального давления на модели пласта 9.

В данной конфигурации используются две пары поршневых насосов фирмы Isco модели FDS-100DX и один насос модели FDS-100DM, благодаря высокой точности которых в системе обеспечивается поддержание давлений (горного, пластового и давления на входе в модель пласта) в диапазоне 0,7–69 МПа с точностью $\pm 0,345$ МПа. Горное давление обеспечивается парой насосов, управляемых контроллером для работы в непрерывном режиме, за счет сдвигания рабочим агентом (этиленгликолем) резиновой манжеты, где расположена керновая модель пласта. Пластовое давление создается регулятором давления 6, который находится в нагруженном состоянии при пластовом давлении, создаваемом насосом 7, и пропускает флюид только в том случае, если давление флюида превышает давление нагружения регулятора

давления. Повышение давления флюида происходит в аккумуляторе с плавающим поршнем 2 путем подачи в нижнюю его часть рабочего агента насосами, работающими в непрерывном парном режиме. Это позволяет перемещать плавающий поршень аккумулятора и подавать флюид на вход кернодержателя при заданном давлении или расходе без смешивания с рабочим агентом. Из кернодержателя поток поступает в акустический сепаратор, где контролируется возможное дополнительное вытеснение жидкого флюида из модели пласта. Двухфазный ультразвуковой сепаратор высокого давления AMS-900 состоит из двух сообщающихся цилиндрических сосудов и оснащен ультразвуковой системой измерения уровня фаз. В одном сосуде происходит перераспределение флюидов, а в другом – замер положения границы раздела фаз при помощи ультразвукового пьезопреобразователя. После сепаратора поток поступает через регулятор давления BPR в линию теплотрических расходомеров, состоящих из трех последовательно подсоединенных расходомеров с разным диапазоном измеряемого расхода (до 10, 100 и 1000 см³/мин, соответственно). В системе предусмотрена защита от превышения пластового и горного давления: в различных частях гидравлических коммуникаций расположены калиброванные разрывные диски, разрушающиеся при превышении допустимого давления. Насосы автоматически прекращают работу при достижении заданного предела в 70 МПа. Контроль рабо-

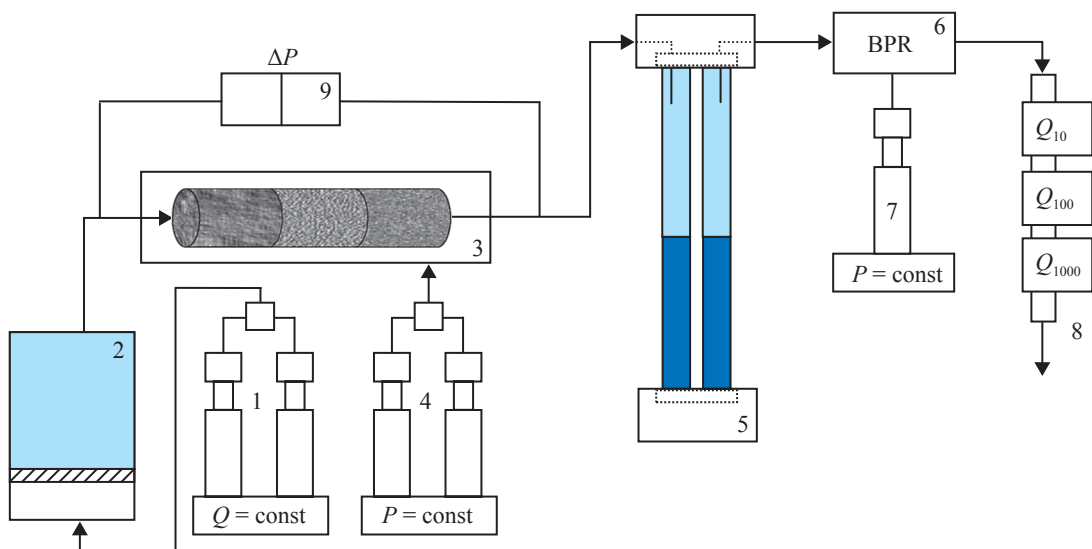


Рис. 1. Функциональная схема системы двухфазной фильтрации Autoflood

ты системы организован на основе персонального компьютера. Программное обеспечение предоставляет возможность регистрировать в режиме реального времени показания насосов, датчиков давления и температуры, акустического сепаратора и расходомеров, дистанционно управлять гидравлической системой при помощи клапанов, управляемых сжатым воздухом. Программа предусматривает периодическую, с заданным интервалом, запись значений всех параметров эксперимента в файл хранения данных (в формате Microsoft Office Excel).

Порядок проведения опытов и результаты исследований

Для исследования условий возникновения эффекта НГД и влияния напряженно-деформированного состояния пород на его величину на экспериментальной установке Autoflood моделировалось изменение эффективного давления в процессе разработки месторождения. Для исследования фильтрации в тонкопоровых низкопроницаемых разностях были выбраны образцы ачимовской толщи Уренгойского НГКМ с проницаемостью менее $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Был определен следующий порядок проведения экспериментальных исследований. Прежде всего производилась подготовка модели пласта: образцы ядра насыщались пластовой водой (минерализация – 8 г/л), далее методом центрифугирования создавалась остаточная вода, затем образ-

цы донасыщались моделью конденсата (деканом). На последующей стадии в установке многофазной фильтрации Autoflood AFS-300 происходило вытеснение модели конденсата моделью пластового газа (метаном) при скоростях фильтрации, характерных для течения в пласте вдали от призабойной зоны ($< 2 \text{ м/сут}$). После достижения стационарной однофазной фильтрации определялась величина остаточной конденсатонасыщенности и проницаемости по метану. На этом подготовительный этап завершался.

В табл. 1 приведены значения насыщенности и проницаемостей в процессе подготовки одной из моделей пласта. Далее выполнялись основные исследования с целью выявления особенностей фильтрации в низкопроницаемых коллекторах при пластовых давлениях и комнатной температуре $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Было реализовано последовательное (в пять этапов) увеличение эффективного давления: на первых трех этапах эффективное давление возрастало за счет повышения горного давления при фиксированном пластовом давлении, а на последних двух – за счет уменьшения пластового давления при поддерживаемом максимальном значении горного давления 65 МПа (технологический предел установки – 70 МПа). Последовательность эксперимента указана в табл. 2. На каждом этапе определялась зависимость расхода от перепада давления на модели пласта, которая в дальнейшем использовалась

Таблица 1

Модель пласта с пористостью $m = 13 \%$

Показатель	Насыщенность газом S_g , %	Насыщенность водой S_w , %	Насыщенность конденсатом S_o , %	Проницаемость по газу K_g , 10^{-15} м^2	Проницаемость по воде K_w , 10^{-15} м^2	Проницаемость по конденсату K_o , 10^{-15} м^2
Сухой образец (проницаемость по азоту)	100	0	0	0,83	0	0
После центрифугирования и насыщения конденсатом	0	37,8	62,2	0	0	0,174
После вытеснения конденсата (проницаемость по метану)	24,8	37,8	37,4	0,072	0	0

Таблица 2

Последовательность опытов

Этап	1	2	3	4	5
Эффективное давление $P_{эф}$, МПа	27,5	32,5	42,5	50,0	58,0
Поровое давление $P_{пор}$, МПа	22,5	22,5	22,5	15,0	7,0
Горное давление $P_{гор}$, МПа	50,0	55,0	65,0	65,0	65,0
Вязкость метана, МПа·с	0,025	0,025	0,025	0,02	0,014

для вычисления по уравнению Дарси проницаемости по газу при различных градиентах давления. Далее проводился анализ зависимостей проницаемости от градиента давления с целью получения информации о фильтрации при изменении напряженно-деформированного состояния пласта.

Приведем результаты исследований особенностей фильтрации через низкопроницаемую модель пласта, характеристики которой указаны в табл. 1. На этапе создания остаточной конденсатонасыщенности при вытеснении конденсата газом были зарегистрированы пульсации давления (рис. 2), что свидетельствует о прерывном характере течения за счет возможного образования в поровом пространстве плечонных конденсатных и водяных перемычек, увеличивающих гидравлическое сопротивление фильтрации. После завершения вытеснения конденсата фильтрационный поток прекращался, чем обеспечивалось перераспределение насыщенности в модели. Далее определялась величина начального градиента давления $|gradP|_0$, если эффект НГД имел место. Для этого на модели пласта при термобарических условиях реализовывалась фильтрация при постоянном перепаде давления $\Delta P = const$, начиная от самых низких значений, которые позволяла задавать установка, до значений, обеспечивающих устойчивую фильтрацию. Значение ΔP , при котором начинал регистрироваться расход газа на выходе из модели пласта, мож-

но было считать начальным градиентом давления $|gradP|_0$.

Таким образом, на первом этапе эксперимента были получены результаты, характеризующие особенности фильтрации в тонкопоровых низкопроницаемых коллекторах в виде зависимости расхода газа в пластовых условиях от градиента давления (красные точки на рис. 3). На графике отражено, что все экспериментальные точки лежат на одной прямой, точка пересечения которой с осью абсцисс соответствует значению $|gradP|_0$. Если измерение начального градиента давления для данного типа коллекторов не представляется возможным (эффект НГД слишком мал, чтобы реализовать на установке соответствующий перепад давления, при котором начинается фильтрация), то величину $|gradP|_0$ можно оценить путем анализа данных о расходе газа при более высоких значениях градиента давления, экстраполируя зависимость $Q = f(gradP)$ на ось абсцисс.

На последующих двух этапах происходило увеличение эффективного давления за счет увеличения горного давления при поддержании пластового давления. При этом объем порового пространства уменьшался, что должно было привести к росту насыщенности жидкой фазы и увеличению $|gradP|_0$.

Тем не менее, в эксперименте наблюдалось обратное: величина $|gradP|_0$ снижалась в сторону более низких значений градиента давления (синие и зеленые точки на рис. 3). Такое поведе-

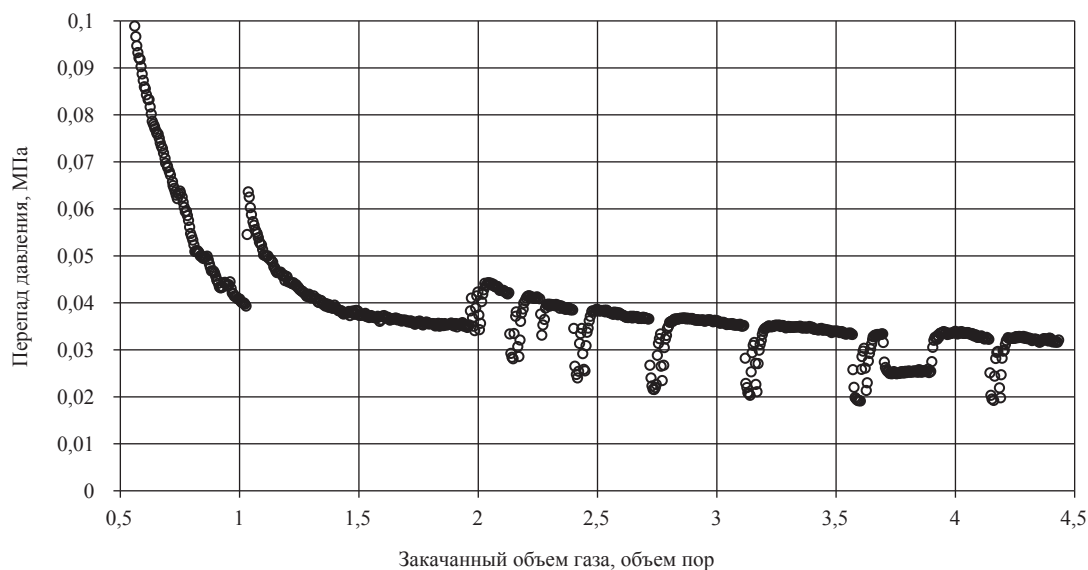


Рис. 2. Вытеснение конденсата газом. Объем пор – 4,478 см³, скорость фильтрации – 2 м/сут, остаточная вода – 37,8 %, остаточный конденсат – 37,4 %

ние фильтрационной системы может быть объяснено конкуренцией двух процессов: ростом насыщенности жидкой фазы за счет сжатия порового объема при увеличении напряженно-деформированного состояния породы и снижением конденсато- и водонасыщенности за счет испарения при достаточно длительной фильтрации газа через модель пласта при проведении измерений расхода газа при различных значениях градиента давления. Если напряженно-деформированное состояние породы изменилось несущественно, то на величину $|gradP|_0$ в большей степени влияет испарение воды и конденсата. При дальнейшем увеличении эффективного давления (на четвертом этапе) также наблюдалось смещение $|gradP|_0$ в сторону меньших значений градиента давления (оранжевые точки на рис. 3). Пятый этап, наоборот, характеризовался резким, скачкообразным ростом начального градиента давления (черные точки на рис. 3), что при низких градиентах давления может привести к прекращению фильтрации в отдельных низкопроницаемых пропластках.

На основе полученных данных можно говорить о том, что в тонкопоровых низкопроницаемых коллекторах необходимо не только учитывать эффект НГД при моделировании фильтрации, но и оценивать возможность его резкого роста при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород.

В соответствии с рис. 3 математически эффект НГД можно выразить в виде смещенной относительно начала координат прямой зависимости объемного расхода газа от градиента давления: $Q_z = a \cdot gradP - b$ (где a и b – некоторые коэффициенты, $a \cdot |gradP|_0 = a/b$). Приведем линейную зависимость $Q = f(gradP)$ к виду:

$$Q_z = -a \cdot \left(1 - \frac{|gradP|_0}{|gradP|} \right) \cdot gradP. \quad (1)$$

Полученное выражение в предельном случае, когда $gradP \rightarrow \infty$, переходит в уравнение Дарси:

$$Q_z = -a \cdot gradP, \quad (2)$$

где $a = K_z A / \mu_z$, K_z – проницаемость по газу; μ_z – вязкость газа; A – площадь поперечного сечения, через которое происходит фильтрация.

Если считать, что закон Дарси также справедлив для случая фильтрации с проявлением эффекта НГД, то нелинейный множитель $(1 - |gradP|_0 / |gradP|)$ в уравнении (1) можно отнести либо к проницаемости, либо к вязкости. Нелинейная зависимость вязкости флюида от градиента давления справедлива для неньютоновских жидкостей, которой метан не является. Таким образом, в случае фильтрации газа через низкопроницаемые коллекторы более реальным представляется

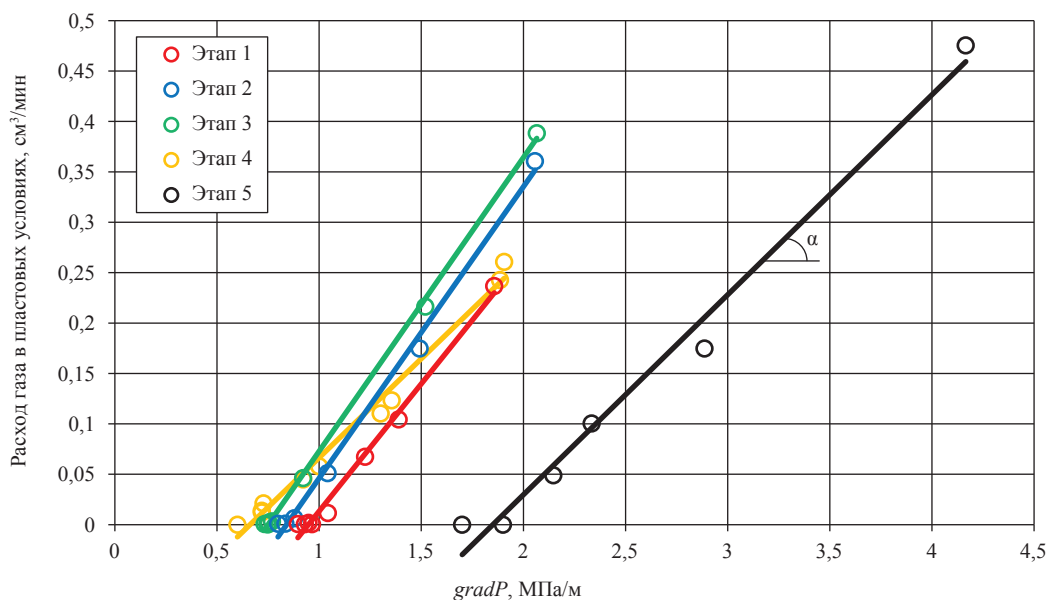


Рис. 3. Эффект НГД при фильтрации газа через частично насыщенную конденсатом модель пласта. Объем пор – 4,478 см³, остаточная вода – 37,8 %, остаточный конденсат – 37,4 %

зависимость газопроницаемости от градиента давления:

$$K_z^* = K_z \cdot \left(1 - \frac{|gradP|_0}{|gradP|} \right), \quad (3)$$

где K_z – максимальная газопроницаемость при $gradP \rightarrow \infty$, вычисляемая как $K_z = a\mu_z / A$. На рис. 4 представлены зависимости газовой проницаемости K_z от градиента давления, построенные в соответствии с (3). Такой нелинейный рост проницаемости от нулевого до некоторого постоянного значения определялся наличием НГД. С учетом (3) модифицированный закон Дарси для фильтрации с эффектом НГД можно записать в виде:

$$Q_z = -A \frac{K_z^*}{\mu_z} gradP; \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_z^* = 0 \text{ при } |gradP| \leq |gradP|_0; \\ K_z^* = K_z \left(1 - \frac{|gradP|_0}{|gradP|} \right) \text{ при } |gradP| > |gradP|_0. \end{cases} \quad (5)$$

Будем в дальнейшем называть проницаемость $K_z = a\mu_z / A$ асимптотической газопроницаемостью, которая является постоянной величиной и характеризует фильтрационные свойства пористой среды. Согласно рис. 4, с ростом градиента давления проницаемость асимптотически стремится к постоянному значению K_z , определяемому углом наклона линейной зави-

симости расхода от градиента давления к оси абсцисс ($tga = a$).

Для анализа влияния напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрацию удобно использовать значения асимптотической проницаемости K_z и начального градиента давления $|gradP|_0$ (рис. 5). Асимптотическая проницаемость практически одинакова для первых трех этапов, а на четвертом и пятом существенно снижается. Величина $|gradP|_0$ постепенно снижается первые три этапа, затем, на четвертом этапе, остается неизменной, а на пятом происходит скачкообразный рост начального градиента давления. Последние два этапа соответствовали экспериментам, когда эффективное давление увеличивалось за счет снижения пластового давления, а перераспределение насыщенности было более ярко выражено за счет дегазации жидкой фазы. В эксперименте это проявлялось в изменении коэффициента a (угла наклона α линейной зависимости расхода газа от градиента давления к оси абсцисс).

Изученные особенности фильтрации газа через низкопроницаемые породы-коллекторы в условиях меняющегося напряженно-деформированного состояния горных пород позволили установить, что зависимость расхода газа от градиента давления в случае эффекта НГД является линейной, но смещенной относительно начала координат в сторону более высоких градиентов давления.

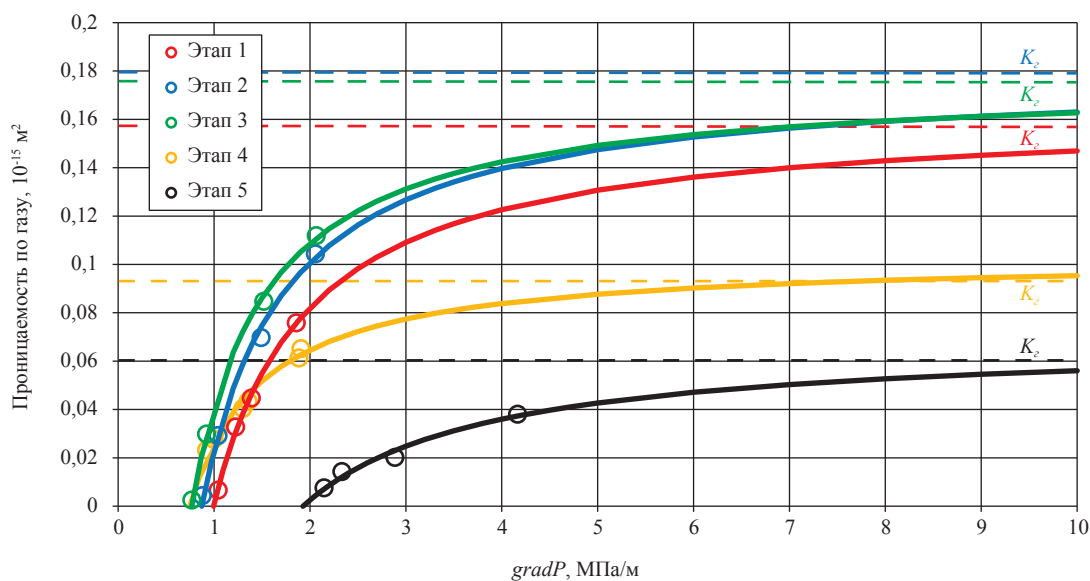


Рис. 4. Зависимость газопроницаемости от градиента давления.
Объем пор – 4,478 см³, остаточная вода – 37,8 %, остаточный конденсат – 37,4 %

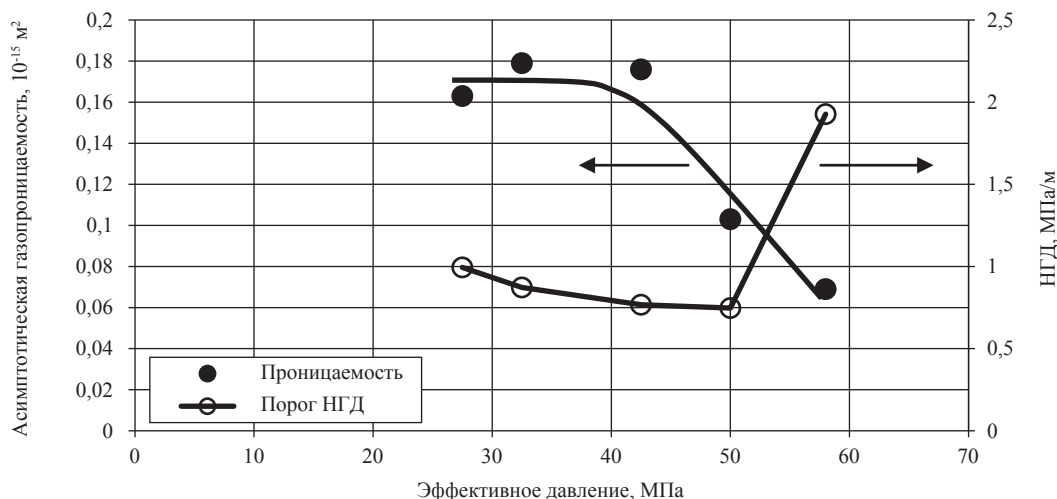


Рис. 5. Зависимость асимптотической газопрооницаемости и величины НГД от эффективного давления. Остаточная вода – 37,8 %, остаточный конденсат – 37,4 %

Величина начального градиента давления может быть определена двумя способами. Первый – непосредственное измерение на модели пласта перепада давления, начиная с которого наблюдается фильтрация газа, т.е. возможна регистрация расхода газа на выходе из модели пласта измерительными средствами установки Autoflood. Второй, и более надежный, способ оценки начального градиента давления заключается в анализе зависимости расхода газа от градиента давления: определяется значение градиента давления в точке пере-

сечения линейной аппроксимации экспериментальных данных с осью абсцисс. Показано, что с увеличением эффективного давления происходит усиление эффекта НГД: растет величина начального градиента давления и снижается проницаемость во всем диапазоне градиентов давления, причем наиболее сильно на фильтрацию влияет снижение пластового давления.

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

Список литературы

1. Басниев К.С. О построении определяющих уравнений теории фильтрации для течений с начальным градиентом / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев // Задачи рациональной разработки нефтяных месторождений и вопросы теории фильтрации. Ч I: сб. тр. – Казань, 1986. – С. 35–38.
2. Насберг Б.М. О начальном градиенте при фильтрации воды / Б.М. Насберг, М.Г. Эльбакидзе // Гидротехнологическое строительство. – 1957. – № 6. – С. 62–65.
3. Taha Sochi. Non-Newtonian flow in porous media / Taha Sochi // Polymer. – 2010. – Vol. 51, Is. 22. – P. 5007–5023.
4. Рыжов А.Е. Результаты экспериментального изучения начальных градиентов давления в карбонатных породах Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения / А.Е. Рыжов, М.И. Колоскова, Н.В. Савченко // Геология и газоносность газодобывающих областей: сб. науч. тр. – М.: ВНИИГАЗ, 1989.
5. Рыжов А.Е. Исследование аномальных явлений при фильтрации газа в низкопроницаемых коллекторах / А.Е. Рыжов, Н.В. Савченко // Актуальные проблемы состояния и развития газового комплекса России. – М.: ГАНГ, 1994. – 111 с.
6. Xueyi Mu. Study of starting pressure gradient in low-permeability oilfield / Mu Xueyi, Liu Yongxizng // Petroleum Geology and Recovery Efficiency. – 2001. – Vol. 8. – № 5. – P. 58–59.
7. Chengyuan Lu. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media / Lu Chengyuan, Wang Jian, Sun Zhigang // Petroleum Exploration and Development. – 2002. – Vol. 29. – № 2. – P. 86–89.