

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

*В.А. Николаев, А.Ф. Соколов, О.В. Николаев, В.П. Ваньков
(ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)*

Разработка многих газовых месторождений ОАО «Газпром», в том числе базовых, вступила в завершающую стадию отбора запасов углеводородов. Для этой стадии характерно внедрение в газонасыщенную область законтурной или подошвенной воды.

Вследствие обводнения продуктивного пласта возникают серьезные осложнения в работе скважин эксплуатационного фонда, которые требуют принятия мер по оптимизации зональных отборов газа. Адекватность научно-технических решений на этом этапе разработки залежи является условием максимально высокой конечной газоотдачи продуктивного пласта. В связи с этим очевидно, что для выбора стратегии регулирования продвижения воды необходима информация о закономерностях фильтрации образующейся водогазовой смеси.

Несмотря на наличие большого числа публикаций, посвященных совместному движению в пласте газа и воды, многие стороны процесса изучены слабо.

В ООО «Газпром ВНИИГАЗ» были методически обоснованы и проведены экспериментальные исследования по фильтрации водогазовых смесей (ВГС) с использованием моделей пластов, характеризующихся разной степенью смачиваемости флюидами поверхности порового пространства (гидрофильных, гидрофобизованных, частично гидрофобизованных).

Целью экспериментов являлось изучение реологических особенностей двухфазных смесей при их массопереносе по пласту, а также физических эффектов, влияющих на фильтрационные характеристики коллектора.

При подготовке моделей пласта (МП) следовали рекомендациям Стандарта [1]. Был использован промытый водопроводной водой и прокаленный кварцевый песок, часть которого размалывали на шаровой мельнице, что позволяло получать заданные величины проницаемости максимально плотно утрамбованных образцов пористой среды.

Программой экспериментов были предусмотрены три серии с гидрофильной пористой средой, одна серия с гидрофобизованной пористой средой и одна серия – с частично гидрофобизованной средой. Для получения пористой среды с гидрофобизованной поверхностью смесь песка и помола обрабатывали бензольным раствором нефти одного из месторождений Западной Сибири с последующей просушкой до постоянного веса. Частично гидрофобизованная смесь содержала обработанный таким образом песок, тогда как помол песка не был гидрофобизован.

В качестве фильтрующейся жидкой фазы использовали слабоминерализованную воду (с содержанием солей до 20 мг/л), в качестве газовой фазы – азот (аналог метана по физико-химическим свойствам и растворимости в воде).

Все эксперименты проведены при давлении 13 МПа и температуре 9 °С, характерных для многих залежей углеводородов Восточной Сибири.

Использовалась установка двухфазной фильтрации. Компьютерная система управления позволила вести процессы фильтрации в автоматическом режиме с высокоточным контролем за параметрами ($\pm 0,5$ – $1,0$ %).

Серии экспериментов с использованием гидрофильной пористой среды предусматривали исследования (табл. 1):

- фильтрации ВГС с разным содержанием воды α (МП № 1–6, α от 0 до 1);
- пропитки (МП № 7) при поэтапном повышении содержания в водогазовой смеси (ВГС) воды α от 0 до 1;
- дренирования (МП № 8) при поэтапном уменьшении α от 1 до 0.

Особенностью процедуры нагнетания смеси в модель пласта в экспериментах первой серии (МП № 1–6) была высокая дискретность подачи компонентов. Смесь подавали «порциями» по 0,01 объема пор МП (сначала газовую долю порции, затем жидкостную). В остальных сериях газ и воду подавали в МП одновременно. Линейная скорость фильтрации флюидов в МП во всех экспериментах была приблизительно одинакова и характерна для промысловых – около 1,5 м/сут. Процесс на-

гнетания шел практически непрерывно в автоматическом режиме в соответствии с программой, реализуемой блоком компьютерного управления установки.

Таблица 1

Параметры МП и экспериментов серий 1 (МП № 1-6), 2 (МП № 7) и 3 (МП № 8)

№ МП	Длина, мм	Диаметр рабочий, мм	Пористость, д.е.	Объем пор V, см³	Проницаемость, мД	α, д.е.	Скорость подачи ВГС, ΔQ, 10 ⁻³ см³/с
1	301,5	40	0,258	97,6	81,8	0	5,00
2	302,0	32	0,271	65,9	78,3	0,103	5,00
3	301,5	40	0,250	94,9	75,9	0,455	5,00
4	298,0	40	0,250	93,8	77,3	0,573	5,00
5	301,5	40	0,259	98,3	77,3	0,895	5,00
6	301,5	40	0,260	98,4	80,1	1,000	5,00
7	1008,0	38.7	0.281	333.2	298	0-1	6,67
8	1001,5	38.7	0.298	351.1	335	1-0	5,00

Параметры МП (№ 9 и 10) и экспериментов по пропитке водой частично гидрофобизованной и гидрофобизованной пористых сред приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры МП и экспериментов серий 4 (МП № 9) и 5 (МП № 10)

№ МП	Длина, мм	Диаметр рабочий, мм	Пористость, д.е.	Объем пор V, см³	Проницаемость, мД	α, д.е.	Скорость подачи ВГС, ΔQ, 10 ⁻³ см³/с
9	301,5	40	0,2288	86,67	114,4	0-1	5,00
10	298,0	40	0,1968	73,68	121,7	0-1	5,00

Важнейшим начальным этапом каждого эксперимента был вывод системы на установившийся режим. Внешним признаком стабилизации было полное выравнивание составов нагнетаемой смеси и «продукции» МП, а также перепада давления ΔP. По балансу определялась установившаяся при этом величина водонасыщенности модели пласта S_{ст}.

Для начального этапа экспериментов с гидрофильными и гидрофобизованными пористыми средами характерна разная динамика стабилизации режима. Сравнение графических зависимостей V_{ст} = f(α) на рис. 1 показывает, что гидрофильная пористая среда удерживает большой объем воды

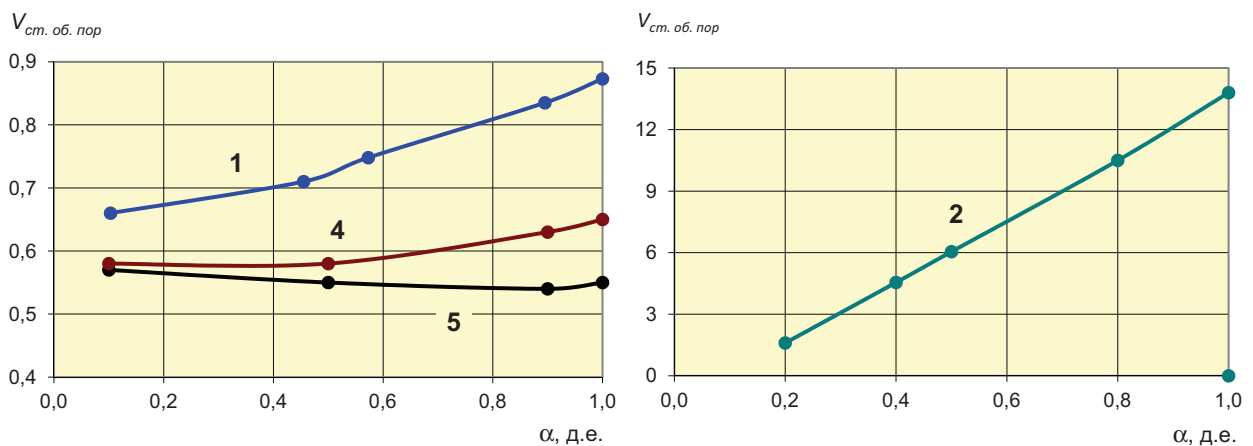


Рис. 1. Зависимость объема воды (в составе ВГС), который необходимо закачать в МП для стабилизации режима фильтрации, от величины α и длины МП. Цифрами у кривых указаны номера серий экспериментов; слева - МП длиной 0,3 м с пористыми средами: 1 - гидрофильной, 4 - частично гидрофобизованной, 5 - гидрофобизованной; справа - МП длиной 1 м, гидрофильная пористая среда

(V_{cm} – объем воды, который требуется закачать в МП для стабилизации режима). Процесс фильтрации стабилизируется только после определенного насыщения породы водой, причем в случае значительной длины МП для насыщения пористой среды требуется закачка воды в объемах, кратных превышающих объем пор данной МП.

В то же время стабилизация процесса в гидрофобизованной среде наступает относительно быстро, и продолжительность периода выхода на установившийся режим значительно меньше зависит от состава закачиваемой смеси (величины α). Это свидетельствует о том, что в гидрофобизованной пористой среде эффекта удерживания воды не наблюдается и ВГС фильтруется относительно свободно.

Основной этап экспериментов – фильтрация ВГС при установившемся режиме – начинался, как отмечалось, после стабилизации всех основных параметров процесса: водонасыщенности S_{cm} , перепада давления ΔP и подвижности смеси k/μ .

Величина ΔP фиксировалась компьютером непосредственно по показаниям контрольных приборов, величины S_{cm} и k/μ рассчитывались автоматически также с использованием показателей комплекса приборов.

На рис. 2 приведены зависимости $S_{cm} = f(\alpha)$ для всех экспериментов. Они демонстрируют незначительную, но при этом явную связь уровня S_{cm} и состава закачиваемой в МП смеси при реализации режима пропитки. До $\alpha \sim 0,1-0,2$ величина S_{cm} возрастает, затем в определенном интервале остается на одном уровне. После увеличения доли воды в закачиваемой смеси до $\alpha > 0,4-0,5$ наблюдается некоторое уменьшение величины S_{cm} в экспериментах как на гидрофильных, так и на гидрофобизованных МП.

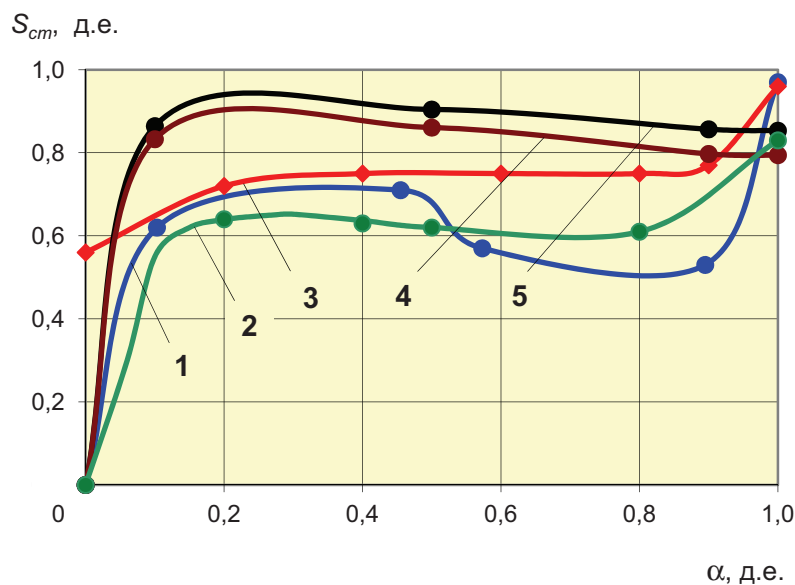


Рис. 2. Величина стабилизировавшейся водонасыщенности S_{cm} как функция α и длины МП. Цифрами здесь и далее указаны номера серий экспериментов: 1, 2, 4, 5 – пропитка (2 – МП длиной 1 м, остальные 0,3 м); 3 – дренирование, МП длиной 1 м; 4 – частично гидрофобизованная пористая среда, 5 – гидрофобизованная

Эти изменения объясняются физикой двухфазной фильтрации.

В диапазоне высокого содержания газа ($\alpha \leq 0,1-0,2$) для режима пропитки характерна относительно независимая фильтрация газа и воды. Весь нагнетаемый газ свободно движется по всему газонасыщенному объему МП. Что касается воды, то в фильтрации участвует лишь часть воды из всего водонасыщенного объема S_{cm} (это характерно для любой величины α , включая $\alpha = 1$). При этом, если в фильтрующемся потоке, как и в нагнетаемой смеси, объемная доля воды составляет α , а газа $(1 - \alpha)$, то линейная скорость фильтрации воды, очевидно, значительно ниже линейной скорости газа из-за тормозящего влияния как пористой среды, так и удерживаемой пористой средой воды (неэффективной части S_{cm}). Таким образом, в диапазоне низких величин α соотношение фильтрующихся объемов газа и воды равно $N_v = (1 - \alpha) : \alpha$, тогда как соотношение эффективных сечений $N_s < N_v$.

Эффекты неравенства линейных скоростей газа и воды, естественно, количественно различны в гидрофильной и гидрофобизованной пористых средах.

По мере увеличения α , то есть уменьшения доли газа в нагнетаемой смеси, все большее влияние оказывает усиливающаяся дисперсность газа, а в гидрофильных пористых средах возрастает роль капиллярных сил. Соответственно возрастают гидродинамические сопротивления нагнетаемой смеси и градиенты давления (темп подачи смеси остается постоянным). В этих условиях, несмотря на увеличение доли воды в нагнетаемой смеси, содержание воды в поровом пространстве не растет – нагнетаемая ВГС является хорошим вытеснителем. Более того, при снижении доли газа до величин менее 0,4–0,5 все заметнее эффект заземления газа, при этом эффективное сечение потока смеси сокращается, и поток частично компенсирует это путем дополнительного вытеснения воды, так что соответственно уровень S_{cm} несколько снижается. Особенно это заметно на моделях небольшой длины (0,3 м), когда явно наблюдается влияние концевых эффектов (см. интервал $\alpha \geq 0,5$ –0,6 на рис. 2).

Таким образом, если при низких α ВГС в поровом пространстве распределена между тремя объемами: фильтрующимся газом, фильтрующейся водой и неподвижной водой, то при высоких α смесь распределена уже между четырьмя объемами – добавляется неподвижный (заземленный) газ.

В гидрофобизованной пористой среде капиллярные эффекты существенно слабее, поэтому гидродинамическое сопротивление потоку также невелико, ВГС фильтруется почти как однофазный флюид. Этим обусловлены более значительные уровни S_{cm} при высоких величинах α в гидрофобизованной пористой среде по сравнению с гидрофильной (см. рис. 2, кривые 4 и 5).

Очевидно, что такого рода явления характерны для фильтрации двухфазных водогазовых смесей как динамического процесса. Как известно, аналогичные эффекты наблюдаются при лабораторных исследованиях влияния капиллярного давления на остаточную водонасыщенность гидрофильных пористых сред в процессе фильтрации водогазовых смесей (рис. 3) [1].

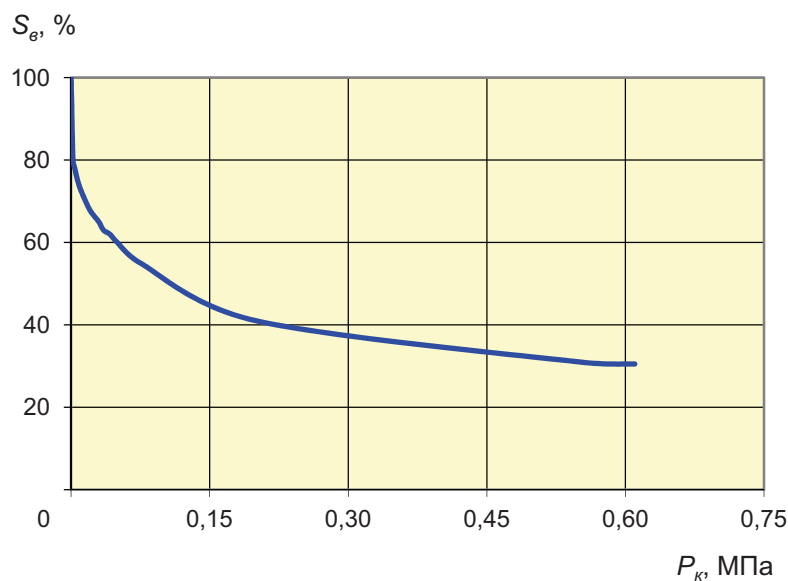


Рис. 3. Зависимость величины остаточной водонасыщенности S_o от капиллярного давления P_k для пористой среды с проницаемостью 10^{-13} м^2

Естественно, что в описываемых экспериментах наблюдалось некоторое ускорение роста градиента давления при фильтрации смесей в гидрофильных пористых средах в ходе увеличения α (рис. 4, кривые 1–3). В гидрофобизованных пористых средах капиллярные явления развиты слабо даже при небольшом содержании газа в нагнетаемой смеси. Рост градиента давления в этом случае связан в основном с увеличением в смеси доли более вязкого компонента – воды.

На кривой 1 рис. 4 наблюдается максимум, что, как и снижение S_{cm} в этом интервале α на рис. 2, объясняется влиянием концевых эффектов при недостаточно большой длине модели пласта (0,3 м). Гидрофобизация пористой среды ослабляет эти эффекты (эксперименты на МП также длиной 0,3 м – кривые 4 и 5 на рис. 2 и 4).

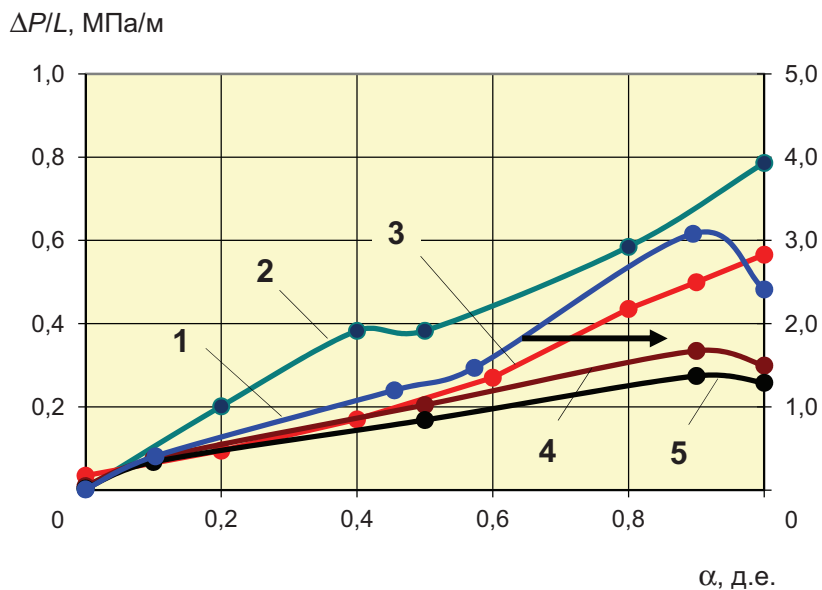


Рис. 4. Величина градиента давления при фильтрации ВГС как функция α . Цифрами указаны номера серий экспериментов

Выполненные эксперименты дают возможность сравнить такие фильтрационные характеристики гидрофильных и гидрофобизованных пористых сред, как подвижность водогазовой смеси k/μ и ее «вязкость» μ в зависимости от величины α . В предположении, что при фильтрации смесей соблюдается закон Дарси, по результатам измерений легко рассчитать k/μ для каждого из установившихся режимов, а затем, принимая проницаемость МП равной начальной, определить текущую «вязкость» смеси. Условность таких допущений очевидна, тем не менее сравнительный анализ полученных таким образом характеристик дает интересную информацию о физике процесса двухфазной фильтрации.

На рис. 5 и 6 приведены графики зависимостей $k/\mu = f(\alpha)$ и $\mu = f(\alpha)$, построенных по результатам выполненных экспериментов.

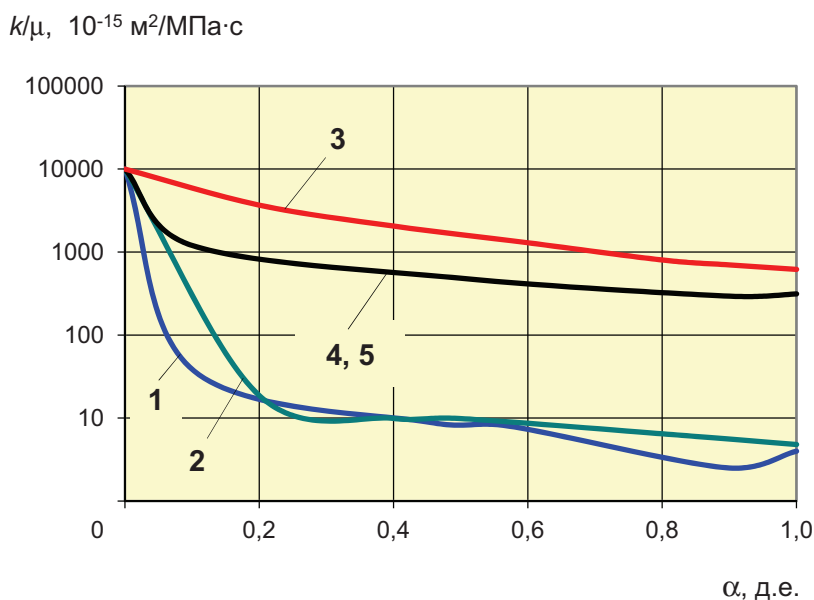


Рис. 5. Величина подвижности ВГС как функция α . Цифрами указаны номера серий экспериментов

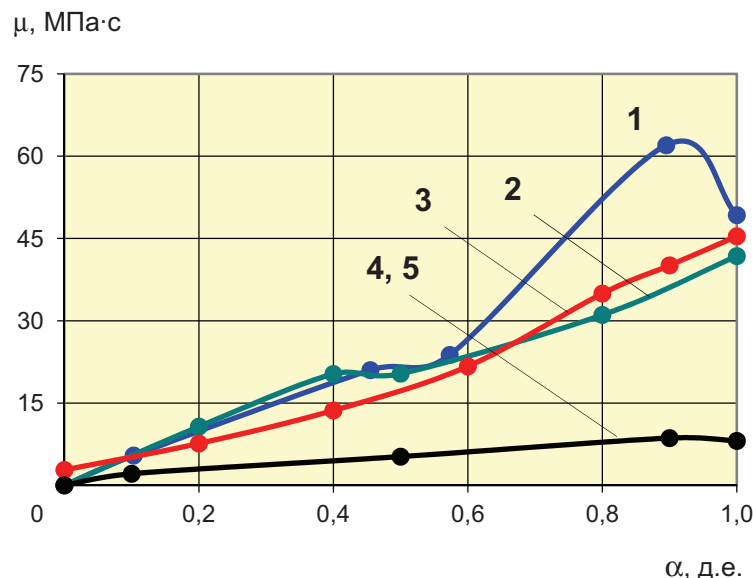


Рис. 6. Величина фильтрационной вязкости ВГС как функция α . Цифрами указаны номера серий экспериментов

Величины подвижностей приведены в безразмерном виде – при $\alpha = 0$ за единицу измерения принята величина $k/\mu = 10^{-11} \text{ м}^2/\text{МПа}$. Кроме того, для графиков $k/\mu = f(\alpha)$ была принята полулогарифмическая система координат, поскольку подвижность смеси по сравнению с однофазным газом уже при содержании воды 10 % даже в гидрофобизованной пористой среде снижается на порядок, а при более высоких величинах α оказывается еще кратно ниже. Используемые координаты дали возможность все данные по подвижности смесей объединить на одном рисунке. Однако при этом оказались резко сглаженными детали изменения параметра k/μ как функции α . Рис. 4 и 6 в этом отношении более информативны.

В то же время графики рис. 5 дают общую картину поведения подвижности ВГС как функции характеристика пористой среды и режима нагнетания смеси. Весьма интересно, что при реализации режима дренирования в гидрофильной пористой среде (кривая 3 рис. 5) подвижность ВГС как функция α аналогична подвижности смеси при реализации режима пропитки в гидрофобизованных пористых средах (кривые 4 и 5). Очевидно, начальная насыщенность пористой среды на 100 % водой снижает риски заземления для газа при закачке в последующем двухфазной смеси. Увеличение градиента давления и фильтрационной вязкости в этом случае при высоких α (рис. 4 и 6) происходит в основном за счет повышения доли более вязкого компонента – воды.

Характер зависимостей $DP/L = f(\alpha)$ и $\mu = f(\alpha)$ (см. рис. 4 и 6) идентичен. Это естественно: градиент давления при прочих равных условиях определяется реологическими свойствами флюида. Максимум на кривой 1 рис. 6 обусловлен, очевидно, недостаточной длиной модели пласта, как это отмечалось и при интерпретации графиков рис. 2 и 4.

Следует подчеркнуть, что при расчете величин k/μ и μ с указанными выше допущениями не принималось во внимание, что процессы фильтрации в пористых средах идут лишь в пределах эффективного объема порового пространства. Следовательно, эти величины существенно занижены как характеристики фильтрационного потока смеси. Для уточнения рассматриваемых динамических параметров как параметров собственно фильтрационного потока необходимы дополнительные исследования методами физического эксперимента.

Выделение в составе S_{cm} неэффективной доли воды (аналога остаточной водонасыщенности) возможно с помощью томографической техники. При этом методикой экспериментов должно быть предусмотрено на этапе вывода на режим стабилизации нагнетание ВГС, вода в которой содержит присадку (например, йодистый натрий) для повышения контрастности томографического изображения [2]. Основной этап – фильтрация смеси при стабильной величине S_{cm} – должен осуществляться с использованием при подготовке смеси «чистой» воды.

Тем не менее, результаты уже описанных в данной статье экспериментов представляют большой научный и практический интерес – они позволяют понять важные особенности фильтрации водогазовых смесей возможных составов в коллекторах с различной смачиваемостью поверхности порового пространства. Эти данные дают дополнительную информацию для интерпретации, в частности, физики процессов формирования водогазовых потоков в пласте-коллекторе и эффекта защемления газа, в том числе в призабойной зоне, при эксплуатации газовых скважин на стадии обводнения залежи, а также при эксплуатации подземных хранилищ газа, созданных в водоносных пластах.

Приведенная информация может быть полезна при обосновании мероприятий по регулированию динамики продвижения фронта воды при разработке газовых месторождений с активным водонапорным бассейном и при эксплуатации подземного хранилища газа в водоносном пласте.

Список литературы

1. *Гиматудинов Ш.К.* Физика нефтяного пласта / Ш.К. Гиматудинов. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – С. 145–146.
2. *Тер-Саркисов Р.М.* Применение компьютерной томографии при исследовании процессов фильтрации в пористой среде: обз. инф. / Р.М. Тер-Саркисов, В.А. Николаев, С.Г. Рассохин, А.Г. Захарян. – М.: ИРЦ Газпром, 1998. – С. 21. – (Серия «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений»).