

УДК 532.546+629.276

© 1991 г.

А. Н. ШАНДРЫГИН

## **ОСОБЕННОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ ГАЗА ГАЗОМ ИЗ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОГО КОЛЛЕКТОРА**

Представлены данные экспериментальных исследований процесса смешивающегося вытеснения газа газом из трещиновато-пористого коллектора. Установлено, что на процесс вытеснения влияет конвективная и молекулярная диффузия. Коэффициент вытеснения газа из трещиновато-пористых коллекторов зависит как от коллекторских свойств пласта, так и от технологических параметров вытеснения. В опытах отмечалось уменьшение коэффициента вытеснения с увеличением отношения проницаемости трещин и блоков коллектора и уменьшением пластового давления. Выявлена зависимость коэффициента вытеснения от осредненной скорости газа в пласте, представляющей собой отношение расхода газа к произведению площади фильтрации и коэффициента общей пористости коллектора (включая блоки и трещины).

Процесс вытеснения газа газом из трещиновато-пористого коллектора исследовался экспериментально. Для выполнения условий подобия реальным процессам при моделировании использовались критерии подобия, применяемые при изучении фильтрации взаиморастворимых флюидов [1]. Модель пласта изготовлялась из металлической трубы с набивкой, имитирующей исследуемую среду. Стенки трубы покрывались смолой и затем мелкозернистым песком. Общая длина модели составляла 2 м при диаметре 0,075 м.

Модель трещиновато-пористой среды представляла собой набор цилиндрических блоков из искусственного цементно-песчаного камня или из естественного песчаника. Использование цементного камня и песчаника для блоков позволило моделировать трещиновато-пористый коллектор с различными соотношениями коэффициентов проницаемости трещинной и пористой сред. Пространство между блоками и трубой, а также между отдельными блоками заполнялось мелкозернистым песком, имитирующим систему трещин. В опытах модель состояла из блоков диаметром 0,073–0,074 и длиной 0,2–0,3 м. Коэффициент проницаемости блоков в отдельных сериях экспериментов равнялся 0,02 мкм<sup>2</sup> (цементный камень) и 1,5 мкм<sup>2</sup> (песчаник). Соответственно общий коэффициент проницаемости модели составлял 0,085 и 1,53 мкм<sup>2</sup> при проницаемости системы трещин 2,51 мкм<sup>2</sup>. Величина отношения проницаемости блоков и трещин коллектора  $K=K_2/K_1$ , таким образом, равнялась 0,008 и 0,6. Коэффициенты пористости и проницаемости блоков определялись по контрольным образцам с использованием стандартной аппаратуры. Параметры системы трещин пересчитывались по полученным для модели и блоков данным.

В качестве вытесняемого газа в опытах использовался азот. Вытеснение его производилось в вертикальном направлении снизу вверх воздухом, содержащим для индикации двуокись углерода до 1%. Концентрация двуокиси углерода в отбираемом из модели газа определялась с помощью газоанализатора ГИАМ-5М (цена деления прибора 0,02%). Выбор в качестве рабочих агентов этих неуглеводородных газов был обусловлен возможностью насыщения ими трещиновато-пористых сред в условиях,

полностью исключают фазовые превращения. На входе в модель поддерживалось постоянное давление, а на выходе из модели задавался темп отбора газа. Эксперименты проводились при начальных пластовых давлениях 5 и 2 МПа.

Исследовались следующие два этапа процесса вытеснения одного газа другим: отбор пластового газа с самого начала вытеснения до прорыва вытесняющего газа к выходу модели и отбор смеси газов после прорыва вытесняющего газа до установления в смеси концентрации вытесняющего газа на уровне 0,95—0,96.

Экспериментами было установлено, что при вытеснении газа газом из трещиновато-пористого коллектора допрорывный и полный коэффициенты вытеснения газа могут оказаться значительно меньше единицы. Под коэффициентами вытеснения газа понимаются отношения объемов отобранного вытесняемого газа из модели пласта к начальному объему его в модели (все объемы исчисляются при атмосферном давлении).

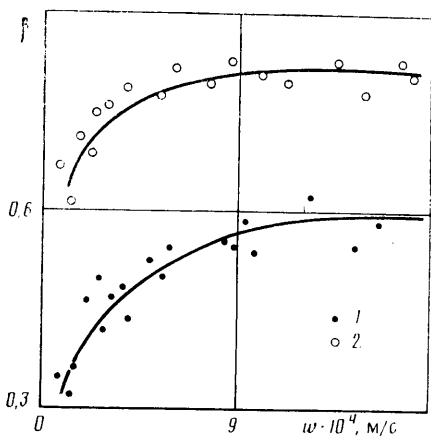
В опытах наблюдалось влияние на коэффициенты вытеснения расхода газа ( $w$ , следовательно, скорости фильтрации), отношения коэффициентов проницаемости блоков и трещин коллектора, а также давления. На фиг. 1 представлены зависимости допрорывных коэффициентов вытеснения  $\beta$  от истинной осредненной скорости газа в модели  $w$  при различных отношениях проницаемостей сред коллектора (начальное давление в модели составляло 5 МПа). За истинную осредненную скорость газа принималось отношение расхода газа к площади сечения модели и к коэффициенту общей пористости модели.

Как видно из фиг. 1, допрорывный коэффициент вытеснения газа зависит от скорости газа (расхода газа) в области малых скоростей и практически не изменяется при больших скоростях. Так, для коллектора с низкопроницаемыми блоками ( $K=0,008$ ; данные 1) в условиях эксперимента отмечается значительный рост допрорывного коэффициента вытеснения при скоростях газа до  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с (расход газа до 9,8 см<sup>3</sup>/с). В интервале скоростей от  $0,71 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с коэффициент вытеснения увеличивается от 0,33 до 0,46. При изменении значений скорости от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $5,3 \cdot 10^{-4}$  м/с отмечается (при некотором разбросе экспериментальных точек) увеличение коэффициента вытеснения газа до 0,51—0,54. В области скоростей газа, больших  $5,3 \cdot 10^{-4}$  м/с, коэффициент вытеснения стабилизируется в диапазоне 0,58—0,6.

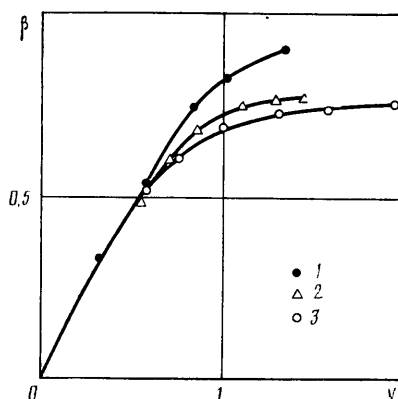
Характерно, что эти же значения скоростей газа ( $2 \cdot 10^{-4}$ — $5,3 \cdot 10^{-4}$  м/с) отделяют области с различным характером изменения полного коэффициента вытеснения газа. При скоростях меньших  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с и больших  $5,3 \cdot 10^{-4}$  м/с в экспериментах значения полного коэффициента вытеснения газа практически не зависели от скоростей газа и составляли 0,87—0,9 (при скоростях меньших  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с) и 0,7—0,8 (при скоростях больших  $5,3 \cdot 10^{-4}$  м/с).

Для коллектора с высокопроницаемыми блоками ( $K=0,6$ ; данные 2) также можно выделить характерные области изменения коэффициента вытеснения газа с увеличением скорости газа (фиг. 1). Так, в опытах при тех же значениях давления 5 МПа наблюдалось увеличение коэффициента вытеснения газа при возрастании скорости газа от  $0,6 \cdot 10^{-4}$  до  $2,8 \cdot 10^{-4}$  м/с (расход газа от 3,5 до 16,6 см<sup>3</sup>/с). В этом интервале изменения скорости газа отмечается увеличение допрорывного коэффициента вытеснения газа от 0,60 до 0,74. При последующем увеличении скорости газа до  $4,8 \cdot 10^{-4}$  м/с (расход 27,9 см<sup>3</sup>/с) наблюдается увеличение допрорывного коэффициента вытеснения газа до 0,79. Общий коэффициент извлечения газа в рассматриваемом диапазоне изменения скорости газа составлял 0,95—0,98.

Вытеснение газа газом из модели трещиновато-пористого коллектора



Фиг. 1

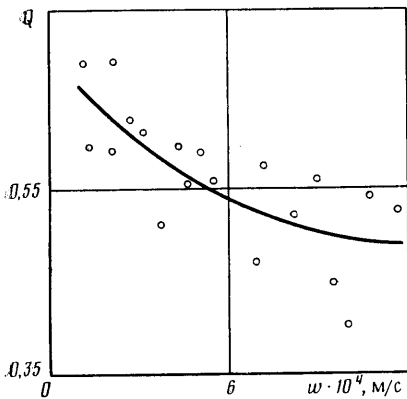


Фиг. 2

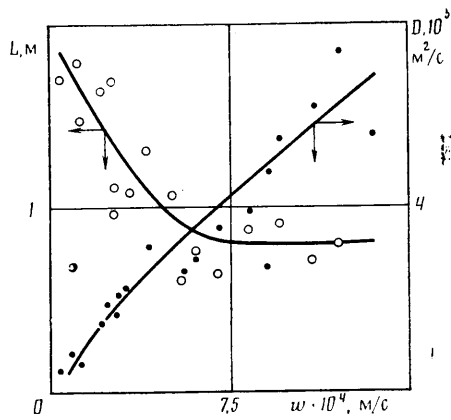
при давлении 2 МПа уже отличается количественно от этого же процесса при давлениях 5 МПа. Допрорывный коэффициент вытеснения газа в данном случае в среднем в 1,1–1,2 раза ниже, чем при вытеснении газа под давлением 5 МПа. Значительное увеличение допрорывного коэффициента вытеснения газа отмечается в диапазоне скоростей газа от  $2,1 \cdot 10^{-4}$  до  $8,5 \cdot 10^{-4}$  м/с (расходы 1,5–6,1 см<sup>3</sup>/с). При этом коэффициент вытеснения газа увеличивается в среднем от 0,51 до 0,66. В области скоростей газа выше  $24,2 \cdot 10^{-4}$  м/с (расход 17,3 см<sup>3</sup>/с) в опытах происходила стабилизация допрорывного коэффициента вытеснения газа в пределах 0,68–0,7. Полный коэффициент вытеснения газа практически не менялся и составлял в среднем 0,92–0,96. При этом также отмечался некоторый разброс точек в исследуемом диапазоне изменения скорости газа.

Следует подчеркнуть, что в опытах полный коэффициент вытеснения газа определялся в момент достижения на выходе из модели концентрации вытесняющего газа в смеси 0,95–0,97. Блоки коллектора к этому времени были заняты смесью газов, однако процесс вытеснения считался окончанным. Для полного замещения в блоках вытесняемого газа вытесняющим потребовалось бы время, в десятки раз превосходящее то, в течение которого были достигнуты указанные концентрации.

Темпы отбора газа из модели в ходе его вытеснения оказывают влияние не только на величины достигаемых коэффициентов вытеснения, но и на необходимые объемы закачиваемого для вытеснения газа. Это следует из данных, представленных на фиг. 2 и 3, для условий вытеснения газа из коллектора с низкопроницаемыми блоками при давлении 5 МПа. На фиг. 2 показаны зависимости суммарного (полного) коэффициента вытеснения газа от относительного объема вытесняющего газа при различных скоростях газа в модели. Под относительным объемом понимается отношение объема закачанного в модель вытесняющего газа, приведенного к пластовым условиям, к объему порового пространства модели. Как видно из фиг. 2, прирост коэффициента вытеснения газа после прорыва вытесняющего газа к выходу из модели (на графике в момент отклонения от линейной зависимости) сопровождается значительным увеличением относительного объема вытесняющего газа. Характерно, что высокие значения коэффициента вытеснения газа для одних и тех же относительных объемов вытесняющего газа достигаются при более низких его скоростях. Так, для представленных на фиг. 2 примеров одно и то же значение коэффициента вытеснения газа 0,78 достигается при



Фиг. 3



Фиг. 4

закачке в модель соответственно 0,83; 1,46 и 2 относительных объемов вытесняющего газа при скоростях  $1,3 \cdot 10^{-4}$ ;  $4,4 \cdot 10^{-4}$  и  $13,8 \cdot 10^{-4}$  м/с (кривые 1—3).

При меньших скоростях газа большими оказываются и отношения объемов отобранного из модели вытесняемого газа и закачанного газа к моменту завершения процесса вытеснения (т. е. к моменту установления на выходе из модели концентраций вытесняющего газа в смеси 0,95—0,97). Как видно из фиг. 3, при изменении скорости газа от  $0,8 \cdot 10^{-4}$  до  $13,8 \cdot 10^{-4}$  м/с в опытах отмечалось уменьшение величины отношения объемов вытесняемого и вытесняющего газа в среднем от 0,59—0,69 до 0,4—0,5.

Естественно предположить, что зависимости коэффициентов вытеснения газа и относительных объемов вытесняющего газа от скорости газа во многом определяются динамикой зоны смеси газов в трещинах коллекторов. В свою очередь движение зоны смеси в средах коллектора зависит от параметров обеих сред. Это подтверждают данные о времени прорыва зоны смеси к выходу модели. Значения времени прорыва зоны смеси в опытах были близки к величинам отношения длины модели к осредненной истинной скорости газа в модели.

Таким образом, поведение зоны смеси газов в трещинах модели определялось как параметрами трещинной среды, так и параметрами блоков. Поэтому в поведении зоны смеси в трещинах могут проявляться некоторые особенности, присущие динамике зоны смеси в пористых коллекторах (в частности, влияние на длину зоны смеси не только конвективной, но и молекулярной диффузии). Можно предположить, что рост длины зоны смеси в трещинах за счет молекулярной диффузии вызывает уменьшение допрорывного коэффициента вытеснения газа (с одновременным увеличением полного коэффициента вытеснения газа) в области малых скоростей фильтрации газа. При высоких скоростях газа стабилизация значений полного и допрорывного коэффициентов вытеснения газа может объясняться неизменностью длины зоны смеси в трещинах. Характерно, что чем меньше давление поддерживалось в опытах, тем при больших значениях скорости газа ощущалось влияние скорости газа на допрорывной коэффициент извлечения газа. Это согласуется с предположениями о влиянии на процесс вытеснения молекулярной диффузии, поскольку с уменьшением давления интенсивность молекулярной диффузии возрастает.

Для оценки влияния на процесс вытеснения газа молекулярной и конвективной диффузии в экспериментах для различных скоростей газа определялись длина зоны смеси в трещинах к моменту прорыва вытес-

няющего газа из модели и коэффициенты конвективной диффузии. Длина зоны смеси определялась по положению середины зоны смеси. Положение середины зоны смеси в модели в свою очередь рассчитывалась как произведение скорости движения газа на время, в течение которого вытесняющий газ прорывался на выход из модели (концентрация вытесняющего газа на выходе — 0,05). Результаты этих расчетов показаны на фиг. 4 в виде зависимости длины зоны смеси от скорости газа. Длина зоны смеси, согласно этим данным, в области повышенных скоростей фильтрации газа практически не зависит от этих скоростей. К примеру, для коллектора с низкопроницаемыми блоками при изменении скорости газа от  $5,8 \cdot 10^{-4}$  до  $14 \cdot 10^{-4}$  м/с (расход газа соответственно 30,5 и 70,1 см<sup>3</sup>/с) длина зоны практически не менялась и составляла в среднем 0,7—0,75 м. Увеличение длины зоны смеси с уменьшением скорости фильтрации газа наблюдается при скоростях ниже  $5,8 \cdot 10^{-4}$  м/с. Так, при уменьшении скорости фильтрации газа от  $5,8 \cdot 10^{-4}$  м/с до  $(0,86—1,37) \cdot 10^{-4}$  м/с длина зоны смеси увеличивается до 1,7—1,85 м. Аналогичный характер изменения длины этой зоны отмечается и для коллектора с высокопроницаемыми блоками.

Поскольку размеры зоны смеси в трещинах и блоках при вытеснении газа газом из модели трещиновато-пористой среды определяются влиянием молекулярной и конвективной диффузии, по данным экспериментов определены коэффициенты эффективной и конвективной диффузии газов в трещинах модели коллектора. Коэффициенты диффузии рассчитывались по данным изменения во времени концентрации вытесняющего газа на выходе из модели. Для этого использовались методики расчета, представленные в [2]. На фиг. 4 показаны зависимости коэффициентов эффективной диффузии газов в трещиновой среде модели коллектора от скорости газов. Коэффициент молекулярной диффузии в опытах составлял  $(0,11—0,13) \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Как видно (фиг. 4), при значительных скоростях фильтрации газа коэффициенты конвективной диффузии значительно превосходили (на один—два порядка) коэффициент молекулярной диффузии. При меньших скоростях, примерно начиная со скорости  $3 \cdot 10^{-4}$  м/с и ниже, коэффициенты молекулярной и конвективной диффузии становятся уже сопоставимыми. Так, если при скорости газа  $3 \cdot 10^{-4}$  м/с коэффициент конвективной диффузии равнялся  $2,32 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, то при скорости фильтрации  $1,6 \cdot 10^{-4}$  м/с он составлял уже  $0,53 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Уменьшение скорости фильтрации до  $0,9 \cdot 10^{-4}$  м/с вызывало понижение коэффициента конвективной диффузии до  $0,28 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с.

Таким образом, представленные результаты позволяют дополнить существующие представления об эффективности осуществления сайклинг-процесса в газоконденсатных залежах с трещиновато-пористыми коллекторами.

При определенных условиях вытеснение одного газа другим из трещиновато-пористого коллектора может характеризоваться вполне приемлемыми коэффициентами извлечения газа. Это предопределяет необходимость дальнейших исследований процессов смешивающего вытеснения углеводородных газов в трещиновато-пористых средах. Однако уже на основе полученных данных можно отметить следующее. Эффективность проведения сайклинг-процесса в залежах с трещиновато-пористыми коллекторами определяется как коллекторскими свойствами пластов, так и технологическими показателями разработки залежи. Для каждой залежи в зависимости от коллекторских свойств существуют определенные оптимальные скорости вытеснения газа. Превышение этих скоростей при сайклинг-процессе вызовет увеличение относительного расхода закачиваемого сухого газа (отношение суммарного объема сухого газа к накопленному объему жирного газа, отбираемого из пласта). С другой сторо-

ны, при малых скоростях газа к моменту прорыва вытесняющего газа к линии отбора можно достичь лишь незначительных коэффициентов вытеснения газа.

Немаловажным фактором, способствующим увеличению эффективности сайклинг-процесса в трещиновато-пористых коллекторах, может стать и снижение темпов закачки сухого газа в залежи после прорыва зоны смеси к забою эксплуатационных скважин. Данное мероприятие в определенной мере способствует увеличению доли жирного газа в добываемой продукции в этот период разработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаевский В. Н., Бондарев Э. А., Миркин М. И. и др. Движение углеводородных смесей в пористой среде. М.: Недра, 1968. 192 с.
2. Забродин П. И., Раковский Н. Л., Розенберг М. Д. Вытеснение нефти из пласта растворителями. М.: Недра, 1968. 224 с.

Москва

Поступила в редакцию  
28.V.1990