

УДК 532.546:622.276

© 1992 г. С. Н. ЗАКИРОВ, НГУЕН ХЫУ ЧУНГ, А. Н. ШАНДРЫГИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НАКЛОННЫХ МАКРОНЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Известно, что на процессы фильтрации флюидов в пористых средах определяющее влияние оказывает их макронеоднородность. Исследованию закономерностей фильтрации жидкостей и газов в неоднородных пористых коллекторах посвящено значительное число работ [1, 2]. В [3, 4] исследовалась фильтрация флюидов в зонально-неоднородных коллекторах. Влияние слоистости пластов на процессы вытеснения жидкостей изучено, например, в [5, 6].

Однако до настоящего времени не рассматривалась двухфазная фильтрация жидкостей в таких сложных условиях неоднородности коллекторов, когда линии (или точки) отбора и нагнетания жидкостей, расположенные в разнопроницаемых зонах коллектора, находятся под некоторыми углами к линии контакта этих зон. Такие условия фильтрации встречаются при разработке слоисто-неоднородных нефтеносных пластов при залегании их под определенными углами наклона. При сильной слоистой неоднородности пластов даже незначительные углы наклона могут играть существенную роль в процессах фильтрации жидкостей в нефтяных и газовых залежах, предопределяя значимость такого вида неоднородности, который можно назвать «косая слоистость» [7].

Возникновение косой слоистости иллюстрирует фиг. 1. Здесь выделен фрагмент нефтяной оторочки нефтегазовой залежи (линия 1 — газонефтяной, линия 2 — водонефтяной контакты) с системой площадного заводнения. Вследствие наклонного залегания пластов даже при небольших углах наклона двумя находящимися рядом скважинами, имеющими одинаковые по величине и глубине интервалы перфорации, вскрываются уже разные продуктивные пропластки. При нагнетании в пласт воды фильтрацией охватываются не все пропластки и вытеснение нефти водой проходит под некоторым углом к линии раздела слоев различной проницаемости.

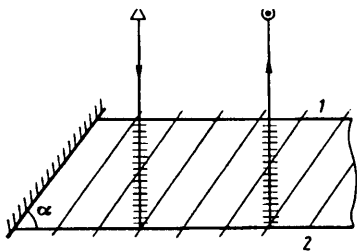
Нагнетание и отбор жидкости под некоторым углом к линии контакта разнопроницаемых зон может проявляться не только в слоисто-неоднородных наклонных пластах, но и в зонально-неоднородных коллекторах. Во многих случаях нагнетательные и эксплуатационные скважины оказываются расположенными на нефтяных залежах в различных по проницаемости зонах, а сами зоны контактируют между собой под некоторыми углами наклона к прямым, соединяющим эти скважины.

Учет наличия косой слоистости при разработке, например, нефтегазовых залежей приводит к нетрадиционным подходам воздействия на процессы их разработки.

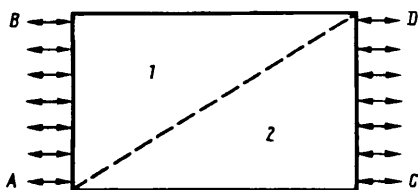
В данной работе представлены результаты экспериментов, проведенных с целью определения основных показателей процесса вытеснения из таких сред одной жидкости (несмачивающей) другой жидкостью (смачивающей). Независимо от того, исследуется фильтрация в наклонных слоисто-неоднородных пластах или в зонально-неоднородных средах (с соответствующим расположением скважин), ниже для описания этих процессов используется термин «косая слоистость».

1. Экспериментальная установка. Схема эксперимента. Моделирование процесса фильтрации в неоднородных коллекторах производилось с учетом основных критериев подобия [7].

Опыты осуществлялись на экспериментальной установке, позволяющей визуально наблюдать за процессами фильтрации. Она включала в себя модель плоского неоднородного по коллекторским свойствам пласта, измерительную и напорную системы. Модель пласта состояла из стального корпуса прямоугольной формы и прозрачной крышки из органического стекла. Внутренние размеры корпуса модели: длина 564 мм, ширина 316 мм, толщина 30 мм. В торцевых



Фиг. 1



Фиг. 2

стенках на входе и выходе модели равномерно располагалось по семь штуцеров для ввода и отвода флюидов. Отключением отдельных подводящих линий в процессе эксперимента достигалось изменение в модели направлений фильтрационных потоков. Прозрачная крышка модели позволяла достаточно точно фиксировать положение фронта вытеснения в разные моменты времени.

Элемент неоднородного пласта моделировался двумя зонами различной проницаемости с поверхностью контакта этих зон вдоль диагонали модели пласта (фиг. 2, вид сверху). Пористая среда низкопроницаемой зоны пласта представляла собой набивку из маршаллита или цементированную песчано-цементную смесь. Для моделирования высокопроницаемой зоны использовался песок разного гранулометрического состава. Пористые среды обеих зон пласта были гидрофильны. Эксперименты проводились на моделях с соотношением проницаемостей зон пласта от 4,2 до 10,0 при их абсолютных значениях от 0,1 до 1,40 мкм² и при средней пористости коллектора 0,1 и 0,32 соответственно.

В опытах моделировалось вытеснение углеводородных жидкостей дистиллированной водой. В качестве углеводородной жидкости использовался керосин. Для визуального наблюдения за процессом вытеснения вода подкрашивалась флуоресцеином натрия (C₂₀H₁₀Na₂O₃). Вытеснение производилось при средней остаточной насыщенности модели пласта связанной водой 0,20—0,30. Нагнетание в модель воды и отбор жидкости выполнялись по разным схемам, предусматривающим вытеснение керосина как со стороны высокопроницаемой (фиг. 2; зона 1, коэффициент проницаемости 1,4 мкм²), так и со стороны низкопроницаемой зоны (фиг. 2; зона 2, коэффициент проницаемости 0,33 мкм²). Кроме того, осуществлялось нагнетание (и соответственно отбор) по всей ширине модели пласта или ввод (и отбор жидкости) в отдельных точках модели при различном положении точек ввода и отбора по отношению к линии контакта разнопроницаемых зон.

В таблице представлены результаты некоторых из выполненных экспериментов. Схемы нагнетания и отбора жидкости обозначены буквами. Варианты с нагнетанием и отбором жидкости по всей ширине модели обозначены четырьмя буквами, варианты с точечным нагнетанием и отбором — двумя. Первые буквы (для вариантов 9 и 10 первые две буквы) указывают точки нагнетания жидкости в соответствии с фиг. 2. Вторые буквы (для вариантов 9 и 10 — последние две буквы) указывают точки отбора жидкости. В экспериментах задавались различные перепады давления между выходом и входом модели, а следовательно, и различные темпы отбора жидкостей. Перепады давления изменялись от 0,018 до 0,05 МПа. Соответственно параметр $\pi_{12} = \sigma / (k_1 | \text{grad } p |)$, учитывающий соотношение капиллярных и гидродинамических сил, изменялся от 1,2 до $3,3 \cdot 10^6$. Здесь σ — поверхностное натяжение на границе фаз, k_1 — коэффициент проницаемости низкопроницаемого пропластка, p — давление.

Цель экспериментов — исследование двух основных периодов процесса вытеснения: безводного (от момента начала вытеснения до прорыва воды к выходу из модели) и водного (от момента прорыва воды до момента достижения обводненности продукции 0,95—0,98).

В каждом из экспериментов определялись динамика и конфигурация фронта вытеснения и площадь обводненных участков пластов, а также количество ото-

Таблица

№ опыта	Схема опыта	$\pi_{12}, 10^6$	В безводный период процесса выгеснения		В водный период процесса выгеснения												
			$\pi_9, 10^5$	$\beta_1, \%$	$\eta, \%$	при обводненности продукции 85—86%						при конечной обводненности продукции					
						$\pi_9, 10^5$	$\beta_1, \%$	$\eta, \%$	γ_0 , доли	$\pi_9, 10^5$	$\beta_2, \%$	$\beta_1, \%$	$\eta, \%$	γ_0 , доли			
1	AC	1,2	2,6	50,3	38,8	6,9	68,0	55,3	0,74	7,3	86,1	68,3	55,3	0,82			
2	CA	1,2	1,5	50,0	31,9	—	—	—	—	7,3	82,6	71,7	60,8	0,88			
3	BD	1,2	2,6	61,7	51,8	5,0	87,4	61,5	0,75	7,0	95,4	91,8	63,8	0,94			
4	DB	1,2	2,0	77,2	60,5	3,0	89,5	64,0	0,65	7,2	97,3	97,1	68,7	1,30			
5	AD	1,2	0,9	50,9	39,9	2,2	62,0	50,2	0,63	7,3	94,9	71,8	57,7	1,39			
6	DA	1,2	1,1	51,5	38,8	6,6	66,5	59,3	0,78	7,3	96,8	66,4	59,3	0,81			
7	BC	1,2	1,8	58,6 *	51,1 *	4,1	96,2	62,8	0,70	7,3	96,9	92,5	65,4	1,02			
8	CB	1,2	1,7	76,0	50,9	3,2	90,4	58,7	0,66	7,3	95,1	97,5	64,8	1,33			
9	AB—CD	3,3	0,3	40,6	37,3	0,9	75,0	57,5	0,66	2,6	97,9	91,5	60,4	1,34			
10	CD—AB	3,3	1,0	59,2	46,7	1,9	86,0	58,4	0,74	2,6	93,8	90,7	60,8	1,00			

* Появление воды на выходе из модели до видимого подходе зоны обводнения. При визуально-наблюдаемом подходе зоны обводнения к выходу из модели коэффициенты охвата и извлечения составляют около 70,0 и 54,5% соответственно.

бранных из модели керосина, воды и количество закачанной в модель воды. По этим данным рассчитывались коэффициент охвата β_1 пласта заводнением, коэффициенты извлечения η (допрорывный и полный) и величина обводненности продукции β_2 . Под коэффициентом охвата понималось отношение площади пласта, подверженной процессу вытеснения, к общей площади (площадь пласта в плане). Коэффициент извлечения рассчитывался как отношение объема отобранного из модели пласта керосина к начальному объему его в модели. Допрорывные коэффициенты определялись в момент прорыва воды к выходу из модели.

2. Данные экспериментальных исследований. Результаты проведенных экспериментов показывают, что процесс вытеснения углеводородов водой из пластов с косою слоистостью в значительной степени зависит от схемы нагнетания воды, т. е. от размещения в пласте точек нагнетания и отбора жидкости по отношению к зонам различной проницаемости. Это наглядно показывают представленные ниже результаты вытеснения керосина из модели пласта с коэффициентами проницаемости зон неоднородности, равными соответственно 0,33 и 1,4 мкм². Процессы вытеснения из модели пласта с другими соотношениями проницаемости качественно не отличались от представленных данных. Однако имеют место количественные отличия в показателях процесса вытеснения.

Влияние косою слоистости на показатели процесса вытеснения может проявляться в той или иной степени на различных этапах вытеснения. Это видно из фиг. 3, где представлены зависимости коэффициента охвата пласта от параметра

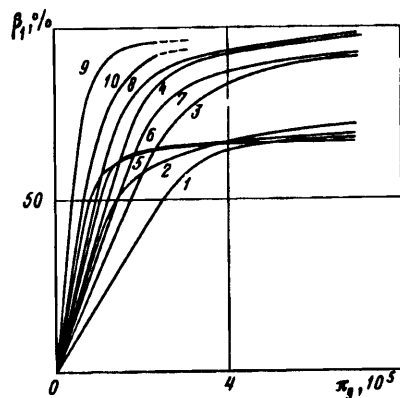
$$\pi_9 = \frac{t |\text{grad } p| \sqrt{k_1}}{\mu}$$

Здесь μ — коэффициент динамической вязкости воды, t — время процесса. Номера кривых обозначают номера вариантов. В безводный период процесса вытеснения имеют место разные темпы роста коэффициента охвата от параметра π_9 . Косою слоистость оказывает влияние и на величины допрорывных коэффициентов охвата и извлечения. В зависимости от схемы нагнетания воды в модель пласта в опытах отмечалось изменение допрорывных коэффициентов охвата от 40,6 до 77,2% и допрорывных коэффициентов извлечения от 31,9 до 60,5% (см. таблицу).

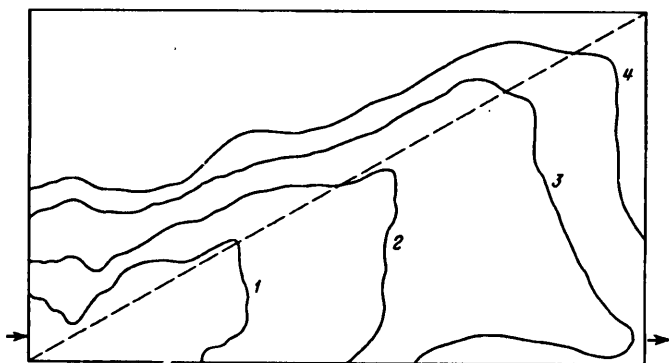
В водный период вытеснения схемы нагнетания жидкости определяют не только текущие и конечные значения коэффициентов охвата и извлечения, но и другие параметры процесса вытеснения, такие, к примеру, как отношение объемов отобранных из пласта нефти и жидкости. В опытах в качестве показателя, определяющего степень заводнения пласта, принималась величина относительного объема v_0 закачанной в пласт воды. Этот показатель представляет собой отношение объема закачанной в пласт воды к общему поровому объему пласта. Следует отметить, что v_0 в отличие от других показателей в значительной степени зависит от продолжительности рассматриваемого процесса. Величина относительного объема закачанной воды может непрерывно увеличиваться при незначительном изменении остальных показателей (например, коэффициентов охвата и извлечения). Поэтому в таблице для водного периода приведены значения основных показателей процесса, в том числе и на один и тот же момент обводненности продукции 85—86%.

На момент обводнения продукции в 85—86% для различных схем нагнетания — отбора в опытах достигались коэффициенты охвата пласта от 62,0 до 90,4%. Сильно различались по вариантам и коэффициенты извлечения керосина — от 50,2 до 62,8%. Определенные отличия к этому моменту наблюдались (для различных схем заводнения) в величинах относительных объемов закачанной воды — от 0,63 до 0,78.

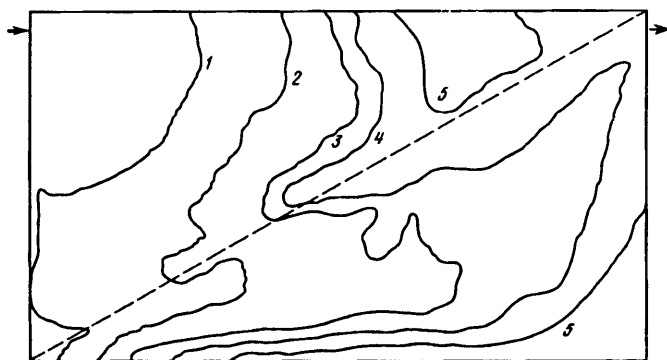
Более детальную оценку влияния схем нагнетания — отбора жидкости на процесс обводнения пластов с косою слоистостью можно дать на основе рассмотрения динамики продвижения фронта вытеснения в каждом из вариантов на-



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

гнетания жидкостей. Насколько велика зависимость динамики фронта вытеснения от схемы заводнения, видно из фиг. 4, 5, на которых представлены положения контакта керосин — вода в модели пласта для двух схем вытеснения: одной из наименее и одной из наиболее эффективной.

На фиг. 4 показана динамика фронта вытеснения при заводнении по схеме № 1 для моментов времени вытеснения 10, 30, 85 и 240 мин (соответственно кривые 1—4). Динамика фронта вытеснения при осуществлении заводнения модели по схеме № 3 приведена на фиг. 5 для моментов времени 10, 45, 85, 100 и 230 мин (соответственно кривые 1—5).

Из фиг. 4 видно, что при заводнении пласта по схеме № 1 со стороны низкопроницаемого участка модели распространение зоны обводнения в безводный

период процесса вытеснения происходило в основном в высокопроницаемой области пласта. Низкопроницаемая часть пласта охватывалась вытеснением в этот период лишь на границе раздела зон. Такой характер распространения фронта вытеснения в модели пласта вполне объясняется существованием преимущественного направления фильтрационных потоков в высокопроницаемой зоне между точками ввода и отбора жидкости. В низкопроницаемой зоне модели пласта в этом случае образуются застойные зоны, фильтрационные процессы в которых протекают с очень малыми скоростями.

Естественно, что наиболее удаленные от границы контакта пропластков участки низкопроницаемого пропластка оказываются наименее охваченными процессом вытеснения и заводняются во многом благодаря капиллярной пропитке. В момент прорыва воды к выходу из модели ($\tau_0 = 2,6 \cdot 10^5$, время с начала процесса 85 мин) коэффициент охвата в опыте составлял 50,3%. Коэффициенты извлечения и вытеснения в этот момент соответственно равнялись 38,8 и 77,1%. Такой относительно высокий коэффициент вытеснения достигался в этот период в основном за счет преимущественного вытеснения керосина из высокопроницаемой зоны коллектора.

В водный период заводнения рассматриваемый вариант отличался медленным охватом пласта процессом вытеснения. В этот период вытеснение керосина продолжалось в основном из высокопроницаемой зоны коллектора, прилегающей к выходу модели. Внедрение же воды в низкопроницаемую часть пласта происходило в значительно меньших объемах. Таким образом, большая часть низкопроницаемой области модели пласта в этом случае остается неохваченной процессом вытеснения и отсекается зоной обводнения от точки отбора жидкостей из модели. В результате к моменту обводнения отбираемой из пласта жидкости до 85—86% достигается коэффициент охвата, равный всего 68,0%, а коэффициент извлечения — 55,3%.

Ненамного эффективнее процесс вытеснения керосина из модели пласта по схеме № 2, при заводнении пласта со стороны высокопроницаемого участка. Как и в варианте заводнения № 1, процесс вытеснения керосина в данной схеме в основном развивался в зоне пласта с более высокой проницаемостью. Это также легко объясняется преимущественным направлением фильтрационных потоков в высокопроницаемой зоне между точками нагнетания и отбора жидкости.

Противоположная картина наблюдалась при нагнетании жидкости со стороны низкопроницаемого участка пласта с отбором ее непосредственно у границы зон разной проницаемости (по схеме № 3). В этом случае, как видно из фиг. 5, отмечалось достаточно равномерное продвижение фронта вытеснения в обеих зонах пласта. Для объяснения такого характера обводнения модели пласта можно предположить следующее. Проводимость коллектора в направлении непосредственно между точками нагнетания и отбора жидкости при таком же расположении оказывается значительно более низкой, чем по другим направлениям. Это неизбежно вызывает в процессе фильтрации значительное искривление линий тока в пласте, глубокий охват ими как низко-, так и высокопроницаемых зон пласта. В результате в безводный период вытеснения керосина вначале фронт вытеснения более интенсивно продвигался в низкопроницаемом участке модели.

Характерно, что в этом опыте прорыв воды в точке отбора жидкости происходил из высокопроницаемого пропластка в виде незначительного по размерам языка обводнения. Коэффициент охвата пласта заводнением и коэффициент извлечения керосина на момент завершения безводного периода вытеснения составляли в опыте 61,7 и 51,8% соответственно.

В водный период процесс вытеснения характеризовался достаточно быстрым обводнением продукции, отбираемой из модели, и расширением зон обводнения в обоих пропластках пласта. Достаточно быстрое обводнение продукции сопровождалось и быстрым увеличением площади пласта, охваченной процессом заводнения. К моменту полного обводнения продукции, получаемой на выходе из модели, коэффициент охвата пласта увеличился до 91,8%. Тем не менее вытеснение из зон пласта, обводнившихся на этом заключительном этапе, оказалось малоэф-

фективным. В результате этого средний по модели пласта коэффициент вытеснения к моменту полного обводнения пласта составил 69,4%, в то время как к концу безводного периода вытеснения он равнялся 83,0%. Полный коэффициент извлечения керосина из модели пласта по завершении процесса вытеснения составил 63,8%.

Еще более равномерным оказалось продвижение фронта вытеснения в модели пласта при заводнении ее по схеме № 4 — со стороны высокопроницаемого пропластка. На протяжении всего безводного периода вытеснения отмечалось относительно ровное перемещение линии контакта керосин — вода в обоих пропластках пласта. В момент прорыва воды к выходу модели коэффициенты охвата и извлечения составляли 77,2 и 60,5% соответственно.

Водный период вытеснения в данном эксперименте начался с очень быстрого обводнения продукции. Последующая затем длительная прокачка через модель воды позволила отобрать из модели до 68,7% керосина при полном обводнении модели (коэффициент охвата близок к 100%).

В значительной степени показатели вытеснения керосина из модели пласта зависят от расположения точек нагнетания и отбора жидкостей и в других схемах заводнения. Особенно низкими коэффициентами охвата и извлечения (как видно из таблицы) характеризовались варианты заводнения с расположением точек ввода и отбора у границы зон разной проницаемости (схемы № 5 и 6). В этих вариантах заводнения наблюдалось быстрое продвижение фронта вытеснения в высокопроницаемой области коллектора вдоль границ зон независимо от направления вытеснения. В результате в низкопроницаемых областях модели пласта оставались значительные по размерам участки пласта, не охваченные процессом вытеснения. Извлечение керосина из этих зон пласта происходило в основном уже за счет капиллярного впитывания в водный период вытеснения.

При расположении точек отбора — нагнетания жидкости под значительным углом к линии раздела разнопроницаемых зон (схемы № 7 и 8) отмечались наиболее благоприятные условия вытеснения. В этом случае для обоих вариантов заводнения (как со стороны низкопроницаемого, так и со стороны высокопроницаемого участка) вытеснение происходит равномерно по всему объему пласта. В результате в этих экспериментах отмечались высокие коэффициенты охвата и извлечения.

Таким образом, на основании представленных результатов экспериментов можно сделать следующие выводы. Косая слоистость является весьма значимым фактором в процессах вытеснения нефти водой. На показатели двухфазной фильтрации жидкостей в неоднородных пористых средах влияет положение границ разнопроницаемых зон коллектора относительно линии нагнетания — отбора жидкостей. В зависимости от величины углов между линиями нагнетания — отбора жидкостей и раздела зон коллектора, а также от направления вытеснения (по отношению к направлению изменения проницаемости) варианты заводнения могут значительно отличаться по эффективности вытеснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренблатт Г. Н., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
2. Эфрос Д. А. Исследования фильтрации неоднородных систем. М.: Гостоптехиздат, 1963. 351 с.
3. Борисов Ю. П., Воинов В. В., Рябинина З. К. Влияние неоднородности пластов на разработку нефтяных месторождений. М.: Недра, 1970. 288 с.
4. Борисов Ю. П., Рябинина З. К., Воинов В. В. Особенности проектирования разработки нефтяных месторождений с учетом их неоднородности. М.: Недра, 1976. 286 с.
5. Оганджаниянц В. Г. Экспериментальные исследования вытеснения нефти из неоднородных коллекторов // Тр. Ин-та геол. и разработки горючих ископаемых АН СССР. 1960. Т. 2. С. 129—137.
6. Ван А., Богомолова А. Ф., Максимов В. А. и др. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкостей. М.: Гостоптехиздат, 1962. 275 с.
7. Закиров С. Н., Шандрыгин А. Н., Нгуен Хью Чунг. Процессы вытеснения в наклонных слоисто-неоднородных коллекторах: Препринт № 9. М.: ИПНГ АН СССР, 1991. 64 с.