

УДК 532.546:622.276.435

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ПЛОЩАДНОГО ЗАВОДНЕНИЯ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТОВ АНОМАЛЬНОЙ НЕФТИ

КОСТОМАРОВ М. П., ПАНКОВ В. Н.

При вытеснении водой аномальных нефтей [1] в продуктивных пластах образуются целики остаточной невытесненной нефти [2, 3]. При расчете объема целиков наиболее исследованы однородные пласты [4–8]. В настоящей работе оценка остаточного объема проведена с использованием модели слоисто-неоднородного пласта. Послойная неоднородность пластов подчиняется случайному распределению Вейбулла или Пирсона (гамма-распределению), которые характерны для месторождений нефтей, обладающих аномальными свойствами (см., например, [9]). Проведено параметрическое исследование четырех известных схем площадного заводнения: двухточечной (прямолинейной), пяти-, семи- и девятиточечной [10]. Полученные оценки остаточного объема нефти могут быть использованы при обосновании технологических параметров разработки месторождений аномальных нефтей.

1. Математическая формулировка задачи расчета формы и объема целиков остаточной аномальной нефти при заводнении слоисто-неоднородных пластов дана в [11]. Для пластов со случайно заданной послойной неоднородностью эта задача сводится к решению следующих уравнений:

$$\operatorname{div}(K|\nabla p|)\nabla p(x, y) = 0 \quad (1.1)$$

$$\beta = \iint_{(D)} (1 - h(|\nabla p(x, y)|)) dx dy$$

$$K(|\nabla p|) = \int_0^{|\nabla p|} 2Q_1 k^{3/2} f(k) dt, \quad k = \frac{1}{Q_1^2 t^2}$$

$$h(|\nabla p|) = \int_0^{|\nabla p|} 2Q_1 k^{3/2} f(k) dt, \quad Q_1 = \frac{\mu Q}{k_* G_* L}$$

$$f(k) = \frac{\alpha^\alpha}{\Gamma(\alpha)} k^{\alpha-1} \exp(-\alpha k), \quad \alpha = \frac{1}{v^2} \quad (1.2)$$

$$f(k) = \exp(-\lambda k^\alpha) \lambda \alpha k^{\alpha-1}, \quad \lambda = \Gamma^\alpha(1/\alpha + 1) \quad (1.3)$$

$$\frac{\Gamma(2/\alpha + 1)}{\Gamma^2(1/\alpha + 1)} - 1 = v^2$$

Здесь  $p$  — давление,  $x, y$  — декартовы координаты плоскости простирания,  $K$  — эффективная проницаемость пласта,  $\beta$  — относительный объем целиков остаточной нефти (в долях объема пор),  $h$  — относительная толщина промытого водой пласта (отсчет ведется от наиболее проницаемого водой пропластка, для которого  $k = \infty$ , к наименее проницаемому, для которого  $k = 0$ ),  $D$  — рассматриваемая в плане область пласта,  $k = k(h)$  — проницаемость пласта в направлении простирания,  $Q_1$  — безразмерный дина-

мический параметр,  $\mu$  — вязкость воды,  $Q$  — дебит скважины на единицу толщины пласта,  $k_*$  — среднее значение проницаемости,  $G_*$  — предельный градиент для нефти, отвечающий средней проницаемости пласта,  $L$  — расстояние между скважинами,  $f(k)$  — плотность распределения проницаемости по толщине пласта: для распределения Пирсона — (1.2), Вейбулла — (1.3),  $\Gamma(x)$  — гамма-функция,  $v^2$  — квадрат коэффициента вариации (относительная дисперсия).

Уравнения записаны в безразмерном виде. За масштаб декартовых координат выбрано расстояние между скважинами для двухточечной схемы заводнения, за масштаб  $k(h)$  и  $K(|\nabla p|)$  — среднее значение проницаемости,  $h$  отнесена к полной толщине пласта, масштабом давления является величина  $\mu Q/k_*$ .

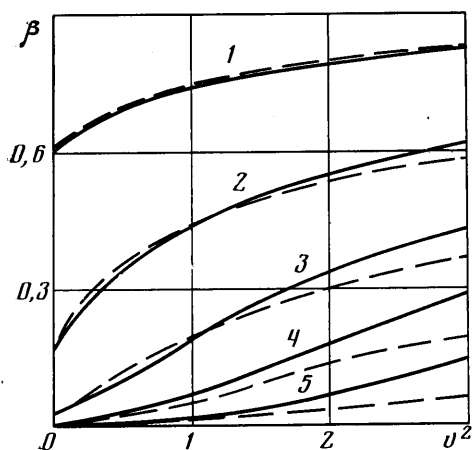
При выводе уравнений помимо прочих использованы следующие допущения. Нефть обладает предельным градиентом давления  $G$ , ниже которого ее подвижность практически равна нулю. Предельный градиент для нефти связан с проницаемостью зависимостью  $kG^2 = \text{const}$ . Режим вытеснения жесткий, поршневой, установившийся, предысторией вытеснения пренебрегается. Остаточная нефть неподвижна, а в пласте движется только вода, предварительно вытеснившая нефть из областей повышенного градиента давления. Пласт достаточно тонкий и по толщине допускает свободные послынные перетоки, что позволяет рассматривать плоское, осредненное по толщине пласта, движение воды.

Уравнения решены численно непосредственно на физической плоскости. При решении нелинейного эллиптического уравнения для давления (1.1) использован разностно-итерационный метод. При аппроксимации уравнения в случае двух-, пяти- и девятиточечной схем заводнения использована квадратная сетка и пятиточечный шаблон, а в случае семиточечной схемы — треугольная сетка и четырехточечный шаблон. Выбор сетки обусловлен формой области интегрирования  $D$ . Полученные при аппроксимации (1.1) разностные уравнения решены итерационным методом, основанным на сочетании методов верхней и нижней релаксации. Верхняя релаксация обеспечивает скорость сходимости, нижняя — устойчивость метода. В качестве начального приближения использовано решение задачи без учета аномальных свойств нефти.

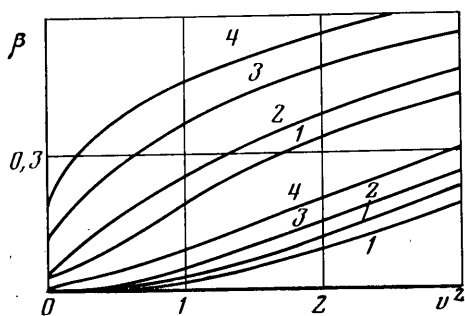
2. Расчет объема целиков остаточной нефти проведен для двух-, пяти-, семи- и девятиточечной схем заводнения. Три из них основаны на квадратной сетке разбуривания, одна (семиточечная) — на треугольной. При расчете принято, что все дебиты нагнетательных и эксплуатационных скважин соответственно равны, а область интегрирования  $D$  является один из элементов симметрии (треугольник для семиточечной и квадрат для остальных схем) с условиями либо непротекания, либо постоянства давления на гранях. Плотность сетки разбуривания для всех схем принята одинаковой. При сравнении схем это условие требует, чтобы для семиточечной схемы расстояние между скважинами было в  $\sqrt{2/\sqrt{3}}$  раз больше, чем для любой другой схемы заводнения.

При заданном типе послынной неоднородности и дебите нагнетательных скважин решение задачи для каждой схемы заводнения зависит от двух безразмерных параметров: динамического  $Q_1$  и неоднородности  $v^2$ . Численное исследование зависимости относительного остаточного объема аномальной нефти  $\beta$  от параметров  $Q_1$  и  $v^2$  для всех схем заводнения проведено в диапазоне  $0 \leq Q_1 \leq 100$ ,  $0 \leq v^2 \leq 3$ .

Результаты параметрического исследования показывают, что для рассматриваемых схем заводнения и типов неоднородности зависимость остаточного объема нефти  $\beta$  от параметров  $Q_1$  и  $v^2$  носит одинаковый характер. Остаточный объем уменьшается с ростом динамического параметра, а послынная неоднородность пласта всегда является отрицательным фактором, увеличивающим остаточный объем. Последний в общем случае выше для пластов, послынная неоднородность которых подчиняется распределению Пирсона, чем для пластов с распределением Вейбулла. Это расхождение увеличивается с ростом динамического параметра.



Фиг. 1



Фиг. 2

Для двухточечной схемы заводнения зависимость  $\beta$  от  $v^2$  показана на фиг. 1, где кривые 1–5 отвечают следующим значениям  $Q_1$ : 1; 2,5; 5; 10; 30. Сплошные кривые здесь относятся к распределению Пирсона, штриховые – к распределению Вейбулла. Зависимость  $\beta$  от  $v^2$  (при  $Q_1=5$  – верхние кривые 1–4, при  $Q_1=20$  – нижние кривые 1–4) для всех четырех схем заводнения приведена на фиг. 2, где кривые 1–4 соответствуют двух-, пяти-, семи- и девятиточечной схемам.

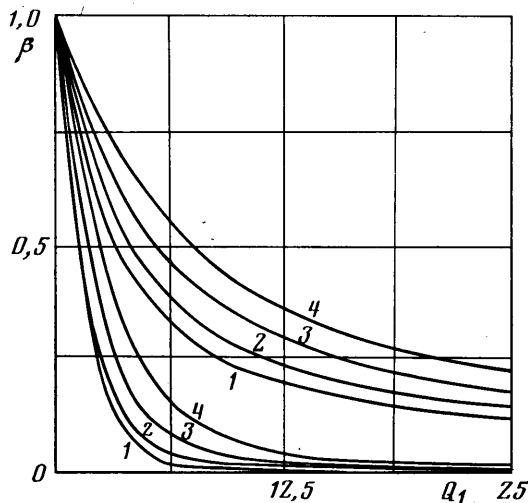
Для каждой исследованной схемы заводнения зависимость величины остаточного объема нефти от динамического параметра носит асимптотический характер, причем для однородных и слабонеоднородных пластов можно указать пороговое значение динамического параметра (для двухточечной  $Q_1 \approx 8$ , для пятиточечной  $Q_1 \approx 10$ , для семиточечной  $Q_1 \approx 12$ , для девятиточечной  $Q_1 \approx 16$ ), превысив который, остаточный объем нефти можно свести к нулю. Для пластов с большим параметром неоднородности такого значения указать нельзя, однако для каждой схемы заводнения можно выделить область сильного (малые значения) и слабого влияния (большие значения) динамического параметра  $Q_1$  на величину остаточного объема нефти.

Зависимость  $\beta$  от  $Q_1$  для всех четырех схем заводнения приведена на фиг. 3, где кривые 1–4 отвечают двух-, пяти-, семи- и девятиточечной схемам. Нижние кривые характеризуют однородный пласт, верхние – слоисто-неоднородный с распределением Пирсона и параметром неоднородности  $v^2=2,5$ . Результаты расчетов показывают, что при переходе от двухточечной к пяти-, семи- и девятиточечной схемам заводнения происходит последовательное увеличение объема нефти. Так, для распределения Пирсона при  $Q_1=10$  и  $v^2=2,5$  остаточный объем для каждой схемы соответственно составляет 22,6; 27,2; 34,3; 41,1% от первоначальных запасов, причем остаточный объем для девятиточечной схемы увеличивается почти вдвое по сравнению с двухточечной.

Таким образом, установлен следующий порядок эффективности площадных схем заводнения слоисто-неоднородных пластов аномальной нефти, который справедлив для всего исследованного диапазона параметров: двух-, пяти-, семи- и девятиточечная схемы. Наименьший объем нефти остается при разработке залежи по двухточечной схеме, наибольший – по девятиточечной.

Причину увеличения объема нефти при переходе от двух- к девятиточечной схеме можно объяснить соотношением между числом нагнетательных и эксплуатационных скважин. Для двух- и пятиточечной схем оно одинаково (поэтому остаточные объемы для этих схем наиболее близки) и равно 1:1, для семиточечной схемы 1:2, для девятиточечной 1:3. При одинаковой плотности сетки разбуривания и одинаковых дебитах нагнетательных скважин это обстоятельство приводит к падению общего темпа вытеснения, а в конечном итоге – к увеличению остаточного объема нефти. Увеличение остаточного объема для пятиточечной схемы по сравнению с двухточечной можно объяснить тем, что для двухточечной схемы фильтрационный поток воды находится в более стесненных условиях, при удалении от скважин происходит более быстрое выравнивание потока и общая интенсивность течения здесь выше, чем для пятиточечной схемы.

В форме целиков остаточной нефти для слоисто-неоднородных пластов по сравнению с однородными для всех схем заводнения и типов неоднородности наблюдается одинаковая закономерность: целики остаточной нефти, увеличиваясь в объеме, захватывают в плане все большую часть пласта и для высоконеоднородных пластов промывание водой всех прослоев достигается только в окрестности скважин. Для двухточечной схемы заводнения и распределения Пирсона форма целиков остаточной нефти (при  $Q_1=7,5$ ) приведена на фиг. 4, где в плане показаны линии равной относи-



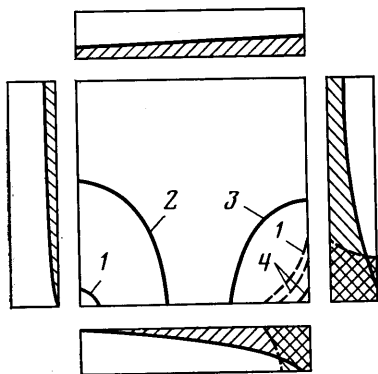
Фиг. 3

тельной толщины промытого водой пласта (кривые 1–4 отвечают значениям  $h=0,05; 0,2; 0,4; 0,95$ ), а также разрез пласта по граням рассчитываемой области. Скважина находится в начале координат, а главная линия тока совпадает с осью ординат. Заштрихованная область относится к целику остаточной нефти. Сплошные линии отвечают целику в высоконеоднородном пласте ( $v^2=2,5$ ), штриховые — в слабонеоднородном пласте ( $v^2=0,01$ ).

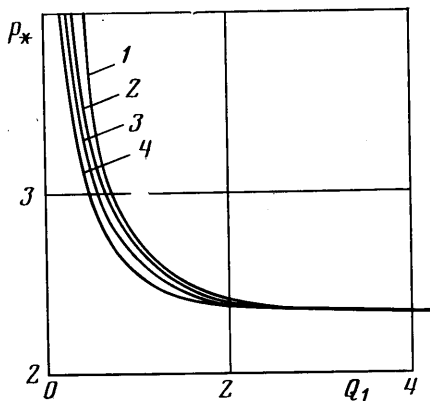
3. В предыдущем пункте сравнение схем заводнения проведено для случая одинаковых дебитов нагнетательных скважин. Однако вместо равных дебитов скважин основой сравнения могут служить равные перепады давления  $P_*$  между нагнетательными и эксплуатационными скважинами. Тогда при расчете остаточного объема нефти вместо одного динамического параметра  $Q_1$  появляются два: безразмерный радиус скважины  $r_*=r/L$  и динамический параметр  $B=P_*/(G_*L)$ . Параметры  $Q_1$  и  $B$  связаны между собой соотношением  $B=Q_1 p_*$ , где  $p_*$  — безразмерный перепад давления между скважинами. Последний в общем случае зависит от  $Q_1$ ,  $v^2$ ,  $r_*$  и при параметрическом исследовании схем заводнения рассчитывался вместе с величиной остаточного объема нефти. Безразмерный радиус скважин при расчетах сохранялся постоянным и равным 0,0005.

Полученная численно зависимость безразмерного перепада давления на скважинах  $p_*$  от параметров  $Q_1$  и  $v^2$  для всех исследованных схем заводнения и типов послойной неоднородности качественно одинакова. Главными особенностями этой зависимости является слабое влияние на нее неоднородности пласта, резкое увеличение  $p_*$  при  $Q_1 \rightarrow 0$  и быстрый асимптотический переход к постоянной величине (при  $Q_1 > 3$ ), одинаковой для каждой схемы при всех значениях и типах неоднородности. Для двухточечной схемы это значение равно 2,34, для пятиточечной — 2,24, для семиточечной — 2,09. Стремление  $p_*$  к постоянному значению с увеличением

$Q_1$  является положительным фактором с точки зрения энергетических затрат на вытеснение нефти. Этот факт означает, что для реализуемых на практике значений динамического параметра  $Q_1$  (в общем случае он равен десяткам) размерный перепад давления на скважинах и дебит скважин связаны одинаковой линейной зависимостью для всех типов и значений неоднородности, хотя остаточный объем нефти при этом изменяется. Зависимость  $p_*$  от  $Q_1$  для двухточечной схемы заводнения и распределения Пирсона приведена на фиг. 5, где кривые 1–4 соответствуют параметру неоднородности  $v^2=0; 0,5; 1,5; 2,5$ .



Фиг. 4



Фиг. 5

Проведенные расчеты безразмерного перепада давления позволяют от параметра  $Q_1$  перейти к параметру  $B$  и использовать результаты расчетов предыдущего пункта для оценки остаточного объема аномальной нефти при одинаковых перепадах давления на нагнетательных и эксплуатационных скважинах. Сравнение схем заводнения при одинаковом параметре  $B$  показывает, что величины остаточных объемов нефти для различных схем заводнения принимают более близкие значения, чем при одинаковых перепадах давления на нагнетательных и эксплуатационных скважинах. Лучшей схемой снова оказывается двухточечная, за ней следуют пяти- и семиточечная. Кривые остаточных объемов для различных схем имеют одинаковый вид, а расхождение между ними в общем случае составляет проценты от первоначальных запасов. Для пластов с высокой неоднородностью на остаточный объем сильнее влияет тип неоднородности, чем схема заводнения.

При одинаковой плотности сетки разбуривания условием сравнения схем заводнения может также служить расход воды на единицу площади месторождения, необходимый для поддержания соответствующей интенсивности течения. Поскольку площадь, приходящаяся на одну нагнетательную скважину для двух- и пятиточечной схем, равна  $2L^2$ , для семиточечной  $3\sqrt{3}/(2L^2)$ , для девятиточечной  $4L^2$ , то при одинаковом расходе воды на единицу площади месторождения дебит каждой нагнетательной скважины (параметр  $Q_1$ ) для девятиточечной схемы должен быть в 2 раза, а для семиточечной в 1,5 раза выше, чем дебит нагнетательной скважины для двух- или пятиточечной схем. Сравнение схем заводнения при таком критерии показывает (см. также фиг. 3), что остаточные объемы для семи- и девятиточечной схем становятся практически одинаковыми, а сами схемы по эффективности занимают промежуточное положение между двух- и пятиточечной схемами. Иными словами, расхождение между остаточными объемами для всех исследуемых схем становится сравнимым с погрешностью расчетов, но двухточечная схема по-прежнему остается наиболее эффективной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Девликамов В. В., Хабибуллин З. А., Кабиров М. М.* Аномальные нефти. М.: Недра, 1975. 167 с.
2. *Ковалев А. Г., Покровский В. В.* Экспериментальная оценка застойных зон при заводнении пластов, насыщенных нефтями, обладающими структурно-механическими свойствами.— Нефт. хоз-во, 1972, № 10, с. 43–48.
3. *Плещинский Б. И., Назаровский Г. А.* Экспериментальное определение формы застойных зон при вытеснении неньютоновской жидкости из модели кругового пласта.— В сб.: Проблемы разработки и гидродинамики нефтяных месторождений. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1975, с. 147–149.
4. *Бернадинер М. Г.* О предельной конфигурации застойных зон при вытеснении вязкопластичной нефти водой.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1970, № 6, с. 146–149.
5. *Алишаев М. Г., Бернадинер М. Г., Енгов В. М.* Влияние предельного градиента на потери нефти при вытеснении ее водой.— В кн.: Вопросы нелинейной фильтрации и нефтегазоотдачи при разработке нефтяных и газовых месторождений. М.: 1972, с. 15–32.
6. *Бернадинер М. Г., Енгов В. М.* Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. М.: Недра, 1975, 199 с.
7. *Алишаев М. Г.* О применении заводнения на месторождениях нефтей с начальным градиентом сдвига.— Нефт. хоз-во, 1975, № 10, с. 38–40.
8. *Котляр Л. М., Скворцов Э. В.* Плоские стационарные задачи фильтрации жидкости с начальным градиентом. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1978. 141 с.
9. *Акишева А. С., Ли Г. И., Хамзин Р. Г.* Оценка неоднородности коллекторов бобриковского горизонта нижнего карбона на Бавлинском и Ромашкинском месторождениях.— Тр. Татар. н.-и. и проект. ин-та нефт. пром-ти, 1973, вып. 24, с. 93–105.
10. *Фазлыев Р. Т.* Площадное заводнение нефтяных месторождений. М.: Недра, 1979. 255 с.
11. *Енгов В. М., Панков В. Н., Панько С. В.* К расчету целиков остаточной вязкопластической нефти.— ПММ, 1980, т. 44. № 5, с. 847–856.

Томск

Поступила в редакцию  
3.IV.1984