

отрыва $l_s^\circ = l_s/d$ от соотношения $h^\circ = h/d$. Цифрами 1-8 обозначены значения угла γ соответственно 45, 90, 180, 208, 220, 270, 300 и 315°. По мере увеличения h° при всех γ кривые сначала резко возрастают (до $h^\circ \approx 1$), затем плавно выходят ($h^\circ \approx 4$) на свои предельные значения $l_s^\circ = l_s^*$. Зависимость $l_s^* = f(\gamma^\circ)$ при $M=3$ может быть записана простой формулой $l_s^* = 728/(\gamma^\circ + 38) - 1,42$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войтенко Д. М., Зубков А. И., Панов Ю. А. Обтекание цилиндрического препятствия на пластине сверхзвуковым потоком газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 1. С. 121-125.
2. Войтенко Д. М., Зубков А. И., Панов Ю. А. О существовании сверхзвуковых зон в пространственных отрывных течениях // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 1. С. 20-24.
3. Авдучевский В. С., Медведев К. И. Физические особенности течения в области отрыва при трехмерном взаимодействии пограничного слоя с ударной волной // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 1. С. 25-33.
4. Корнилов В. И., Харитонов А. М. Вязкие пространственные течения в угловых конфигурациях // Успехи механики. 1984. Т. 7. Вып. 1. С. 109-136.
5. Корнилов В. И., Харитонов А. М. О развитии поперечных течений в пограничном слое при продольном обтекании прямого двугранного угла // ПМТФ, 1979. № 1. С. 72-78.

Москва

Поступила в редакцию
22.IV.1988

УДК 532.546

ПАНКОВ В. Н.

ВЛИЯНИЕ ПОСЛОЙНОЙ СООБЩАЕМОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТОВ НА ОБЪЕМ ЦЕЛИКОВ ОСТАТОЧНОЙ НЕФТИ

Для пластов типа «слоеного пирога», неоднородность которых подчиняется случайному распределению (Пирсона), проведен расчет предельно-равновесных целиков остаточной нефти, обладающей начальным градиентом давления. При расчетах предполагается, что в направлении напластования пласты обладают полной гидродинамической разобщенностью. Проведено параметрическое исследование объема целиков для двух задач (пятиточечной схемы площадного заводнения и одиночной скважины в круговом пласте), а также сравнение с результатами расчетов для пластов с идеальной послойной сообщаемостью.

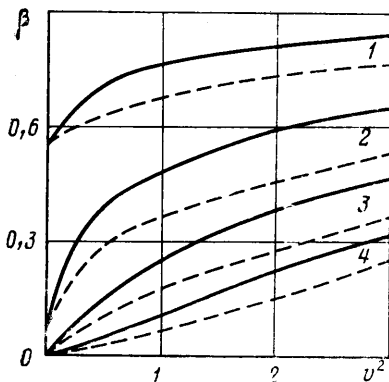
Одной из форм залегания остаточной нефти в продуктивных пластах являются целики [1]. Изложенная в [2] модель предельно-равновесных целиков остаточной нефти, обладающей начальным градиентом давления, построена для тонкого слоисто-неоднородного пласта с идеальной послойной гидродинамической сообщаемостью. Однако продуктивные пласты зачастую обладают анизотропной структурой и их послойная сообщаемость затруднена. Наиболее простой способ исследовать влияние послойной сообщаемости - рассмотреть другой предельный случай слоисто-неоднородного пласта - с полной гидродинамической разобщенностью между слоями. В задачах теории фильтрации впервые такие схемы предельной анизотропии введены в [3].

В слоисто-разобщенных пластах отдельные прослои будут сообщаться между собой только через скважины, которые должны вскрывать пласт по всей толщине. Расчет целиков остаточной нефти при таком допущении сводится к последовательному определению объема нефти для каждого прослоя и интегрированию полученных объемов по всей толщине пласта с соблюдением условия одинаковости перепада давления между нагнетательными и добывающими скважинами для всех прослоев.

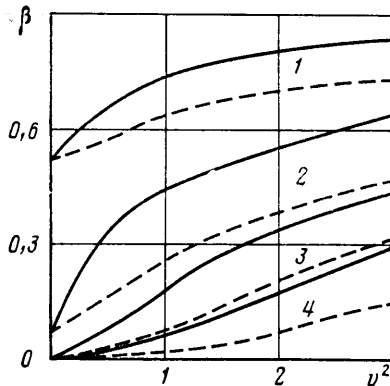
Главным этапом расчета целиков остаточной нефти для всего слоисто-разобщенного пласта является расчет целика для каждого изолированного прослоя. Этот расчет при известных допущениях можно свести к решению уравнений [4]

$$\begin{aligned} s=1, \Delta p(x, y) &= 0, |\nabla p| > G, (x, y) \in D_1 \\ 0 < s < 1, |\nabla p| &= G, \operatorname{div}(s(x, y) \nabla p) = 0, (x, y) \in D_2 \\ s=0, |\nabla p| &< G, (x, y) \in D_3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\beta_0(B_0) = \iint_{(D)} (1-s(x, y)) dx dy, \quad B_0 = \frac{\delta p}{GL}$$



Фиг. 1



Фиг. 2

дополняемых условиями сопряжения на неизвестных границах, отделяющих области D_1, D_2, D_3 , а также условиями на границах пласта.

Будем полагать, что неоднородность пласта подчиняется случайному распределению. Тогда после решения уравнений (1) расчет объема целика остаточной нефти для всего пласта сводится к вычислению следующего интеграла:

$$\beta(v^2, B) = 2 \int_0^{\infty} \beta_0(B/G) f(k) k^{1/2} dG, \quad kG^2 = \text{const} \quad (2)$$

$$f(k) = \frac{\alpha^\alpha}{\Gamma(\alpha)} k^{\alpha-1} \exp(-\alpha k), \quad \alpha = \frac{1}{v^2}, \quad B = \frac{\delta p}{G \cdot L}$$

В уравнениях (1), (2) p – давление, s – водонасыщенность однородного прослоя, (x, y) – декартовы координаты плоскости простирания, $G(h)$ – предельный градиент для нефти, h – общая толщина промываемых водой пропластков, β_0 – относительный остаточный объем нефти в отдельном прослое (в долях объема пор), β – объем целика остаточной нефти для всего пласта, D – рассматриваемая в плане область пласта, $k(h)$ – проницаемость пласта ($0 \leq k(h) < \infty$, $f(k)$ – плотность распределения проницаемости по толщине пласта (здесь принято гамма-распределение, которое наилучшим образом описывает послойную неоднородность пластов [5]), Γ – гамма-функция, v^2 – квадрат коэффициента вариации, B_0, B – безразмерные динамические параметры, δp – характерный перепад давления, L – характерный размер, G_* – предельный градиент для нефти, отвечающий средней проницаемости.

Исследование влияния гидродинамической сообщаемости слоисто-неоднородных пластов на объем целика остаточной нефти проведено при решении двух задач: для элемента пятиточечной схемы заводнения и для одиночной скважины в круговом пласте. В первой задаче расчет целика остаточной нефти в каждом однородном прослое проведен разностно-итерационным методом сквозного счета [4]. Вторая задача одномерна и часто используется как простейшая модель разработки элемента площадного заводнения. В первой задаче сетка разбуривания при расчетах принималась квадратной, характерным расстоянием служило расстояние между нагнетательными и добывающими скважинами с характерным перепадом давления на них. Для второй задачи за характерный размер выбрано расстояние между скважиной и контуром питания.

Для пятиточечной схемы заводнения результаты расчетов объема целика остаточной нефти в неоднородных пластах с сообщающимися и разобщенными прослоями приведены на фиг. 1, где показана зависимость β от параметра неоднородности v^2 при различных значениях безразмерного перепада давления B . Сплошные кривые отвечают пласту с идеально сообщающимися прослоями, штриховые – послойно-разобщенному пласту. Неоднородность пласта подчиняется распределению Пирсона, параметр неоднородности изменяется в пределах $0 \leq v^2 \leq 3$, кривые 1–4 отвечают значениям $B=2,5; 5,7; 11,2; 22,3$.

Полученные результаты показывают, что объем целика остаточной нефти для послойно-разобщенных пластов меньше, чем для пластов с сообщающимися прослоями; это расхождение увеличивается с ростом послойной неоднородности и может достигать десятка процентов порового объема пласта. Наибольшее расхождение в остаточных объемах достигается при средних значениях динамического параметра B . Так, при $B=5,7$ и $v^2 > 1$ расхождение в объемах равно 0,12.

Результаты расчетов объема целика остаточной нефти для одиночной скважины

в круговом пласте приведены на фиг. 2. Сплошные кривые снова характеризуют объем целика в пластах с сообщающимися прослоями, штриховые — с разобщенными. Кривые 1-4 получены для значений параметра $B=2,21; 5,05; 9,92; 19,76$. Эти значения отвечают значениям параметра в предыдущей задаче, но характерный размер пласта здесь выбран так, что площади рассматриваемых областей пласта для обеих задач совпадают. При этом очевидно, что динамический параметр для одиночной скважины в круговом пласте необходимо уменьшить в $2/\sqrt{\pi}$ раз по сравнению с пятиточечной схемой заводнения.

Из фиг. 2 следует, что результаты расчетов объема целиков для одиночной скважины в круговом пласте качественно подтверждают результаты расчетов для пятиточечной схемы: остаточный объем нефти для пластов с сообщающимися прослоями снова выше, чем для пласта с разобщенными прослоями, но расхождение между объемами для этой задачи увеличивается. Объем целиков для обоих типов пластов растет вместе с послойной неоднородностью.

Общий итог проведенных расчетов для обеих задач состоит в том, что зависимость объема целиков остаточной нефти от темпа вытеснения и неоднородности пластов носит качественно одинаковый характер как для пластов с идеальной послойной сообщаемостью, так для слоисто-разобщенных пластов, причем послойная разобщенность при прочих равных условиях снижает объем предельно-равновесных целиков.

Полученные решения для двух предельных случаев слоисто-неоднородных пластов можно рассматривать как верхнюю и нижнюю границы объема целиков остаточной нефти в анизотропных слоисто-неоднородных пластах, для которых отдельные прослои частично гидродинамически сообщаются, а частично разобщены между собой.

Качественная близость полученных решений для обеих задач позволяет при оценке объема целиков остаточной нефти при площадном заводнении слоисто-неоднородных пластов воспользоваться решением упрощенной задачи для одиночной скважины. Наиболее простая оценка объема целиков получается в одномерном линейном случае. Она имеет вид

$$\beta = 2 \int_B^{\infty} k^h f(k) dG, \quad B = \frac{\delta p}{G \cdot L}, \quad kG^2 = \text{const}$$

и одинакова для тонких неоднородных пластов как с идеально сообщающимися, так и с разобщенными прослоями.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Выгодский Е. М.* Экспертная оценка форм залегаения остаточной нефти в пласте // Изв. вузов. Нефть и газ. 1984. № 8. С. 29-33.
2. *Енгов В. М., Панков В. Н., Панько С. В.* К расчету целиков остаточной вязкопластической нефти // ПММ. 1980. Т. 44. Вып. 5. С. 847-856.
3. *Михайлов Г. К.* К задаче о фильтрации в анизотропных земляных плотинах трапецеидального профиля на горизонтальном водоупоре // ДАН СССР. 1951. Т. 80, № 4. С. 553-556.
4. *Панков В. Н.* К оценке остаточного объема вязкопластической нефти при заводнении // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 1. С. 93-97.
5. *Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Проектирование разработки / Под ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 463 с.*

Томск

Поступила в редакцию
4.IV.1988