

УДК-632.516

**ФИЛЬТРАЦИЯ ДВУХФАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ
В ЧИСТО ТРЕЩИНОВАТЫХ КОЛЛЕКТОРАХ****М.А.ДЖАМАЛБЕКОВ, М.Ф.ГУЛИЕВ**
Институт Прикладной Математики БГУ
mjamalbayov@ctnet.az

В работе рассматривается задача фильтрации двухфазных и двухкомпонентных углеводородных жидкостей в чисто трещиноватых породах. Предлагается обобщенное решение задачи фильтрации газированной и легких нефтей в чисто трещиноватых (деформируемых) средах. При этом нефть и газ в пластовых условиях рассматривается в виде двухфазной и двухкомпонентной углеводородной жидкости с массообменом между фазами. Исследуется влияние изменений пористости и проницаемости к рассматриваемому процессу. Приводятся результаты численных экспериментов разработки на истощение гипотетической залежи в чисто трещиноватых коллекторах.

Ключевые слова: трещиноватый пласт, фильтрация, деформация, истощение, газоконденсат, двухфазный, двухкомпонентный.

Число месторождений нефти и газа, представленных глубокозалегающими трещиноватыми пластами растет. Известно, что чем больше глубина залегания залежей, тем выше оказываются их начальные пластовые давления. При разработке таких залежей падение давления внутри пустот приводит к деформациям коллекторов и изменяются их фильтрационные и емкостные характеристики. Это обстоятельство (особенно при наличии АВПД) требует учета деформации при описании фильтрационных процессов в рассматриваемых условиях.

К исследованию теории фильтрации жидкостей в деформируемых и недеформируемых коллекторах посвящен ряд работ [1, 2, 4-7, 9, 12 и др.]. В работе [10] рассматривается процесс фильтрации газированной нефти в пористой среде в условиях постоянства фильтрационно-емкостных свойств пласта. Работа [3] посвящена решению проблемы взаиморастворимых углеводородных жидкостей в недеформируемых пористых коллекторах. А в [2] получено численное решение задачи фильтрации газированной нефти в деформируемых пористых пластах.

В [1] рассматривается фильтрация газоконденсатной смеси в чисто трещиноватых коллекторах и предлагается методика прогнозирования разработки газоконденсатной залежи при различных технологических и

пластовых режимах. А в [5] получено решение задачи фильтрации летучих нефтей в деформируемых гранулярных коллекторах. Анализ этих и других работ, выполненных в отмеченной области убеждают, что задачи фильтрации газированной и легких нефтей в чисто трещиноватых (деформируемых) коллекторах являются актуальными.

В пределах настоящей работы считается, что деформации коллектора носят упругий характер. При этом проницаемость и пористость пород являются в каждом конкретном случае однозначными функциями пластового давления.

Учитывая, что газированная нефть является частным случаем летучей нефти, уравнения для движения газированной и летучих нефтей в условиях, когда проницаемость и пористость являются функциями пластового давления, напишем в следующем виде [3, 5]:

$$\nabla \left\{ \left[\frac{f_n(\rho)k(p)}{a(p)\mu_n(p)} + \frac{f_g(\rho)k(p)p\beta c(p)}{\mu_g(p)z(p)p_{at}} \right] \nabla p \right\} = - \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \left[\frac{\rho_n}{a(p)} + (1 - \rho_n) \frac{p\beta c(p)}{z(p)p_{at}} \right] m(p) \right\}, \quad (1)$$

$$\nabla \left\{ \left[\frac{f_g(\rho)k(p)p\beta}{\mu_g(p)z(p)p_{at}} [1 - c(p)\bar{\gamma}] + \frac{f_n(\rho)k(p)S(p)}{\mu_n(p)a(p)} \right] \nabla \right\} = - \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \left[\frac{(1 - \rho_n)p\beta}{z(p)p_{at}} [1 - c(p)\bar{\gamma}] + \frac{\rho_n S(p)}{a(p)} \right] m(p) \right\}, \quad (2)$$

где p – давление; k , m – абсолютная проницаемость и пористость пласта; $f_n(\rho)$, $f_g(\rho)$ – относительные фазовые проницаемости жидкой и газовой фаз; ρ – насыщенность трещин жидкой фазой; μ_n , μ_g – динамические вязкости жидкой и газовой фаз; a – объемный коэффициент жидкой фазы; S – количество растворенного газа в нефти; z , β – коэффициенты сверхсжимаемости и температурной поправки; c – содержание потенциально жидких углеводородов в газовой фазе; $\bar{\gamma}$ – доленое содержание потенциально жидких углеводородов в газовой фазе в пластовых условиях; p_{at} – атмосферное давление; t – время.

Уравнения (1), (2) описывают движение двухкомпонентной, двухфазной системы. Так, при $c(p)=0$ система уравнений (1) и (2) описывает движение газированной нефти, а в случае $c(p)>0$ – движение летучих нефтей.

В качестве зависимостей относительных фазовых проницаемостей от насыщенности $f_n(\rho)$, $f_g(\rho)$ для чисто трещиноватых коллекторов можно использовать зависимость [11]:

$$f_n = \rho, \quad f_g = 1 - \rho. \quad (3)$$

Следуя результатам работы [8] в качестве зависимостей $k(p)$ и $m(p)$ можно принять степенной или экспоненциальный законы:

$$m = m_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\alpha_m}, \quad k = k_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\beta_k}, \quad (4)$$

где m_0 , k_0 – значения m и k , соответствующие начальному значению дав-

ления p_0 ; a_m , β_k - коэффициенты изменения пористости и проницаемости. При этом β_k изменяется от 0,1 до 0,5 для гранулярных пород и доходит до 3-4 у трещиноватых коллекторов. Коэффициент a_m меньше коэффициента β_k на один порядок. А при экспоненциальном законе

$$m = m_0 e^{a_m(p-p_0)}, \quad k = k_0 e^{\beta_k(p-p_0)}, \quad (5)$$

при этом a_m изменяется в диапазоне 0-0,02 1/МПа, $\beta_k/a_m = 5 \div 15$. Значение β_k для трещиноватых пород на порядок больше величины этого коэффициента для пористых сред.

Для решения уравнений (1), (2) применяем метод осреднения и вводим функцию H , аналогичную функции Христиановича

$$H = \int \varphi(p, \rho) dp + const, \quad (6)$$

где подынтегральные функции $\varphi(p, \rho)$ для жидких и газовой фаз имеют следующий вид:

$$\varphi = \frac{f_n(\rho_n)k(p)}{a(p)\mu_n(p)} + \frac{f_z(\rho)k(p)p\beta c(p)}{\mu_z(p)z(p)p_{at}} \quad (7)$$

и

$$\varphi = \frac{f_z(\rho_n)k(p)p\beta}{Z(p)p_{am}\mu_z(p)} [1 - c(p)\bar{\gamma}(p)] + \frac{f_n(\rho_n)k(p)S(p)}{a(p)\mu_n(p)}, \quad (8)$$

соответственно.

Ввиду использования метода осреднения [3], уравнение (1) или (2) может быть записано в виде: $\nabla^2 H = -\Phi(t)$.

Используя для задач истощения следующие граничные условия

$$r = R_k, \quad H = H_k(t); \quad r = r_c; \quad H = H_c(t)$$

и применяя метод смены осредненных состояний, получаем обобщенное выражение для мгновенного значения притока нефти и газа к скважине или галерее [1, 3, 5]:

$$q = \frac{2\pi h(H_k - H_c)}{\ln \frac{R_k}{r_c} - \frac{1}{2}}, \quad (9)$$

$$q = \frac{2bh(H_k - H_c)}{l_k}, \quad (10)$$

где h - мощность пласта; R_k , l_k - координаты контура питания в условиях радиального и прямолинейного течений; b - ширина пласта; r_c - радиус скважины.

Как видно, уравнения движения жидкой и газовой фаз для случаев фильтраций газоконденсатной смеси и газированных (в том числе и летучих) нефтей идентичны. Различие состоит в свойствах самих жидкостей, учитывающихся в (10), и поэтому для определения фиктивной де-

прессии $H_k - H_c$ можно использовать аналогичные соотношения для газоконденсатной смеси [1].

Из (1), (2) можно получить выражение для определения газового фактора [10]:

$$\Gamma = \frac{\frac{\bar{\mu}(p)a(p)p\beta}{z(p)p_{at}}[1 - c(p)\bar{\gamma}(p)] + \frac{S(p)}{\psi(\rho)}}{\frac{1}{\psi(\rho)} + \frac{\bar{\mu}(p)a(p)p\beta c(p)}{z(p)p_{at}}}, \quad (11)$$

где $\bar{\mu}(p)$ - отношение вязкостей жидкой и газовой фаз; $\psi(\rho)$ - отношение относительных фазовых проницаемостей газовой и жидкой фаз.

Когда в выделяющемся газе отсутствуют тяжелые компоненты, т.е. в $c=0$, то из (11) получается выражение для газового фактора при фильтрации газированной нефти:

$$\Gamma = \psi(\rho) \frac{\bar{\mu}(p)a(p)p\beta}{z(p)p_{at}} + S(p). \quad (12)$$

Для определения основных временных характеристик процесса фильтрации двухфазных (взаиморастворимых) и двухкомпонентных систем используются уравнения материального баланса для жидкой и газовой фаз аналогично [1]:

$$q_n = -\Omega(p) \frac{d}{dt} \left[\frac{\rho_n}{a(p)} + (1 - \rho_n) \frac{p\beta c(p)}{z(p)p_{at}} \right], \quad (13)$$

$$q_c = -\Omega(p) \frac{d}{dt} \left[\frac{(1 - \rho_n)p\beta}{z(p)p_{at}} [1 - c(p)\bar{\gamma}] + \frac{\rho_n S(p)}{a(p)} \right], \quad (14)$$

где $\Omega(p) = \pi(R_k - r_c)^2 hm(p)$ или $\Omega(p) = bl_k hm(p)$ для полосообразного пласта.

Из совместного рассмотрения (13), (14) с (4) или (5) получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для определения $p(t)$, $\rho(t)$, решаемых одним из численных методов. Для случая фильтрации газированной нефти (т.е., когда $c=0$) эти уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{\frac{q_n}{\Omega(p)} (\alpha_4 \Gamma + \alpha_2)}{(\alpha_5 + \alpha_6) \cdot \alpha_4 + \alpha_7 \cdot \alpha_2}, \quad (15)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = - \frac{\frac{q_n}{\Omega(p)} + \alpha_7 \frac{dp}{dt}}{\alpha_4}, \quad (16)$$

где $\alpha_2 = \frac{p\beta}{z(p)p_{at}} - \frac{S(p)}{a(p)}$, $\alpha_4 = \frac{1}{a(p)}$, $\alpha_5 = (1 - \rho) \left[\frac{p\beta}{z(p)p_{at}} \right]'$,

$$\alpha_6 = \rho \left[\frac{S(p)}{a(p)} \right]', \quad \alpha_7 = \rho \left[\frac{1}{a(p)} \right]'; \quad \text{«'»} - \text{означает производную по } p.$$

По изложенной методике был выполнен круг численных расчетов, позволивших определить особенности влияния деформируемости коллекторов на основные показатели истощения залежи.

Расчеты проведены для залежей газированной нефти с разными степенями деформируемости, приуроченных к трещиноватым коллекторам. Разработка ведется при заданной депрессии, равной 2,0 МПа. Расчеты остановлены в условии равенства пластового давления к 2,5 МПа. Был рассмотрен пласт круговой формы, при следующих исходных данных:

$$p_0 = 15,0 \text{ МПа};$$

$$R_k = 3000 \text{ м};$$

$$k_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2;$$

$$m_0 = 0,0075;$$

$$h = 50 \text{ м};$$

$$\beta_k = 0,3, 0,15, 0,075 \text{ и } 0 \text{ 1/МПа};$$

$$\beta_k / a_m = 10.$$

В пределах настоящей статьи приводится лишь часть результатов численных экспериментов. На рис. 1 иллюстрируется динамика падения давления в чисто трещиноватых пластах при различных степенях деформируемости породы. Видно, что чем больше деформируем пласт, тем выше в нем давление. Это связано эффектом ухудшения проницаемости. Снижение проницаемости приводит к адекватному уменьшению притока нефти (рис. 2), и тем самым, препятствует падению пластового давления. Из-за этого продолжительность процесса истощения залежи в случае учета деформируемости значительно увеличивается.

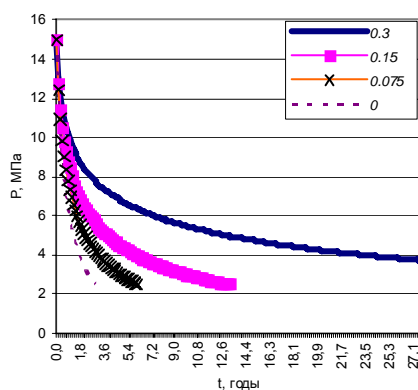


Рис. 1. Динамика падения давления в пластах различной деформируемости ($\beta_k = 0,3; 0,15; 0,075$ и 0 1/МПа).

Даже малые значения коэффициентов изменений проницаемости и пористости приводит к сильному уменьшению притока нефти к забою (рис. 2), и следовательно, к продлению срока разработки залежи.

Приведенные результаты наглядно демонстрируют, что насколько важен учет деформаций при решении задач фильтрации газированных и легких нефтей в трещиноватых нефтяных пластах.

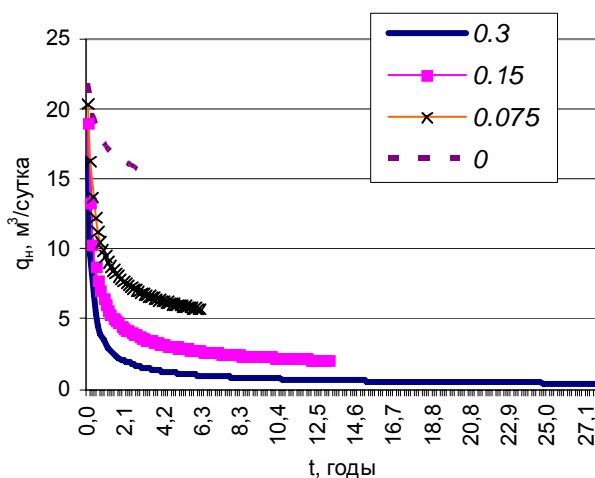


Рис. 2. Динамика уменьшения притока нефти к забою в пластах различной деформируемости ($\beta_k = 0,3; 0,15; 0,075$ и 0 1/МПа).

ЛИТЕРАТУРА

1. Abasov M.T., Orudjaliev F.G., Djamalbekov M.A. Scientific Basis of Gas Condensate Reservoirs Development in Deformed Reservoir Rocks / Proceedings of the II Symposium on Mining Chemistry. Visegrad, Hungary: 22-24 October, 1986, p. 187-206.
2. Calalov Q.I., Əliyev A.Ə. Deformasiya olunan məsələli mühitdə qazlı mayenin qərarlaşmamış süzülməsi məsələsinin ədədi həlli / AMEA Geologiya İnstitutunun Əsərləri. Bakı: Nafta-Press, 2008, s. 31-39.
3. Абасов М.Т., Гасанов Ф.Г., Оруджалиев Ф.Г. О фильтрации газоконденсатной смеси // ДАН Азерб. ССР. 1966, №4, с. 14-19.
4. Aliev F.A., Djamalbekov M.A., Nasibov S.M. Mathematical modeling of the well-bed system under the gaslift operation // TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics. 2010, v.1, №1, pp.5-13.
5. Абасов М.Т., Дадашзаде Х.И., Джамалбеков М.А., Оруджалиев Ф.Г. Фильтрация летучих нефтей в деформируемых коллекторах // Известия АН Азерб. ССР. Сер. Науки о Земле, 1991, № 1-2, с.63-68 .
6. Абасов М.Т., Джалалов Г.И., Ибрагимов Т.М., Мамедов А.М., Фейзуллаев Х.А. Численное исследование задачи о притоке газоконденсатной смеси к несовершенной по степени вскрытия скважине в однородно-анизотропном по проницаемости пласте // Известия НАНА. сер. Науки о Земле, 2002, № 3, с. 7-9.
7. Абасов М.Т., Кулиев А.М. Методы гидрогазодинамических расчетов разработки многопластовых месторождений нефти и газа. Баку: Элм, 1976, 204 с.
8. Горбунов А.Т. Разработка аномальных нефтяных месторождений. М.: Недра, 1981, 237 с.
9. Закиров Э.С. Трехмерные многофазные задачи прогнозирования, анализа и регули-

- рования разработки месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2001, 302 с.
10. Розенберг М.Д., Кундин С.А., Курбанов А.К., Суворов Н.И., Шовкринский Г.Ю. Фильтрация газированной жидкости и других многокомпонентных смесей в нефтяных пластах. М.: Недра, 1969, 275 с.
 11. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966, 284 с.
 12. Джамалбеков М.А., Исмаилов Н.А., Насибов С.М. Алгоритм для прогнозирования процесса газлифта в системе скважина-пласт. Доклады НАНА. 2010, т. LXVI, № 5, с. 44-51.

İKİFAZALI KARBOHİDROGEN QARIŞIQLARININ ÇATLI KOLLEKTÖRLƏRDƏ SÜZÜLMƏSİ

M.A.CAMALBƏYOV, M.F.QLİYEV

XÜLASƏ

Məqalədə ikifazalı və ikikomponentli karbohidrogen qarışığının çatlı mühitdə süzülməsi məsələsinə baxılır. Qazlı və yüngül neftlərin çatlı (deformasiyalı) laylarda süzülməsi məsələsinin həlli verilir. Bu zaman neft və qaza lay şəraitində ikifazalı və ikikomponentli karbohidrogen qarışığı kimi baxılır. Məsələnin həllində fazalar arasındakı kütlə mübadiləsi, süzülən fazaların və mühitin real xüsusiyyətləri nəzərə alınır. Alınmış hesablama sxemi ilə bir sıra hesablama aparılmış, layın keçiricilik və məsaməliliyinin təzyiqdən asılı olaraq dəyişməsinin süzülmə prosesinə təsiri araşdırılmışdır.

Açar sözlər: Çatlı lay, süzülmə, deformasiya, tükənmə, qaz-kondensat, ikifazalı, ikikomponentli.

FILTRATION OF TWO-PHASE HYDROCARBON MIXTURES IN FRACTURED ROCKS

M.A.JAMALBAYOV, M.F.GULIYEV

SUMMARY

The problem of the filtration of two-phase and two-componental hydrocarbonic liquids in pure fractured collectors is considered. The solution of the problem of the filtration of aerated and light oils in pure fractured (deformable) environments is offered. Oil and gas in deformable environment are considered as two-phase and two-component hydrocarbon liquids with mass transfer between phases. The influence of changes of porosity and permeability on the considered process is investigated.

Key words: fractured collector, filtration, deformation, gas-condensate, two-phase, two-componental.

Поступила в редакцию: 06.04.2011 г.

Принято к печати: 17.06.2011 г.