

УДК 532.546.3; 536.717

В.М. Зайченко, В.В. Качалов, И.Л. Майков, В.М. Торчинский

Моделирование волнового воздействия на газоконденсатную систему

Газовый конденсат представляет собой сложную смесь метана и высших производных метанового ряда. Фазовая диаграмма такой смеси содержит так называемую «ретроградную область», т.е. область, в которой при понижении давления возможно образование ретроградной жидкости, испаряющейся с дальнейшим уменьшением давления. При отборе конденсата из продуктивного пласта происходят падение давления и изменение температуры вблизи забоя скважины. Газоконденсатная смесь в призабойной зоне частично конденсируется с образованием ретроградной жидкости (конденсатной «пробки»), которая заполняет поровое пространство и препятствует выходу газовой фазы [1].

Волновые технологии воздействия на многофазные системы могут найти применение для интенсификации технологических процессов в добыче газоконденсата, повышения дебита газа и проницаемости пласта. Для преодоления или снижения фильтрационного сопротивления могут быть использованы волновые (акустические воздействия) на призабойную зону пласта. С помощью циклических волновых воздействий можно изменить проницаемость и таким образом способствовать извлечению газа и конденсата при разработке газоконденсатных месторождений на истощение.

Целью настоящей статьи является теоретическое исследование разрушения газоконденсатной пробки при волновом воздействии и определение оптимальных параметров этого воздействия.

Математическая модель

Нестационарные процессы, происходящие при фильтрации углеводородной смеси в пористом коллекторе, моделировались в одномерном приближении в изотермических условиях. По структуре математическая модель состоит из двух частей – гидродинамической, описывающей процесс двухфазной фильтрации в пористой среде в приближении закона Дарси, и термодинамической, в рамках которой с помощью уравнений состояния для смеси в паровой и жидкой фазах рассчитываются коэффициенты сжимаемости смеси и параметры фазового равновесия системы [2].

Запишем уравнения сохранения для каждой фазы с учетом обобщенного закона Дарси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(m\rho_1s)}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} k \cdot \frac{f_1(s)}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial x} - W; \\ \frac{\partial(m\rho_2(1-s))}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} k \cdot \frac{f_2(s)}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial x} + W, \end{aligned} \quad (1)$$

где m – пористость; s – газонасыщенность; k – абсолютная проницаемость; i – номер фазы (1 – газ, 2 – жидкость); μ_i – коэффициент динамической вязкости; ρ_i – плотность; P_i – давление; f_i – функция относительной фазовой проницаемости; W – удельная скорость образования жидкой фазы из газообразной; t – время; x – координата. Система уравнений (1) дополняется уравнениями состояний для газовой и жидкой фаз. Предполагается равенство давлений в фазах ($P_1 = P_2 = P$).

Ключевые слова: модель двухфазной фильтрации, углеводородная смесь, газоконденсатный флюид, термобарические условия, волновое воздействие.

Keywords: model two-phase flow, hydrocarbon mixture, gas condensate fluid, pressure and temperature conditions, the wave impact.

Выражение для удельной скорости образования жидкой фазы из газообразной при численном решении имеет вид [2, 3]:

$$W = -\rho_1 s m \frac{m_2 z_1 (1-w)}{m_1 z_2 w} k \cdot \frac{f_1(s)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{1}{\Delta x},$$

где w – мольная доля газовой фазы; Δx – размер расчетной ячейки.

При моделировании волнового воздействия на пласт в отличие от работы [3] на границе использовались периодические условия для давления:

$$P(x=0) = P_0, P(x=L) = P_L + \delta(1 + \sin(\omega t)), \quad (2)$$

где P_0 – невозмущенное давление (давление в пласте); P_L – постоянная составляющая давления на границе; δ – амплитуда колебаний давления на границе; ω – частота колебаний; L – характерный размер. В качестве начального условия выбиралось

$$P(x, t=0) = P_0. \quad (3)$$

Для других переменных граничные и начальные условия ставились аналогично.

Для расчета свойств бинарной смеси в паровой и жидкой фазах использовалось обобщенное кубическое четырехкоэффициентное уравнение состояния Ван-дер-Ваальсового типа [4], разработанное специально для природных нефтегазоконденсатных смесей для давлений до 100 МПа и температур до 200 °С.

Результаты

На первом этапе моделирования были использованы экспериментальные данные по образованию газоконденсатной пробки [3]: абсолютная проницаемость – 10^{-11} м²; мольная доля метана в исходной смеси – 0,75; пористость – 0,33; температура – 310 К; давление на левой границе участка – 117 атм; давление на правой границе участка (P_0) – 45 атм; длина участка – 2 м.

Зависимость расхода газа от времени представлена на рис. 1.

С течением времени происходит накопление жидкой фазы, значение фазовых проницаемостей уменьшается. Выход газа практически завершается при временах более 150 с. Аналогичная картина наблюдается и в эксперименте, указанном в работе [3].

При расчетах по описывающим волновое воздействие уравнениям (1) с граничными и

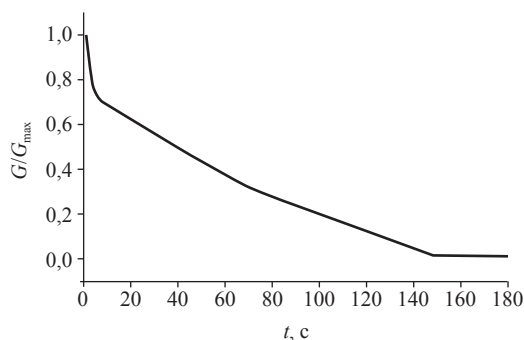


Рис. 1. Зависимость расхода газа от времени

начальными условиями (2) и (3) в качестве начальных условий использовались результаты, полученные при $\delta = 0$ (невозмущенное течение с образованием пробки – режим, представленный на рис. 1).

Зависимость разрушения пробки от частоты внешнего воздействия при различных амплитудах показана на рис. 2.

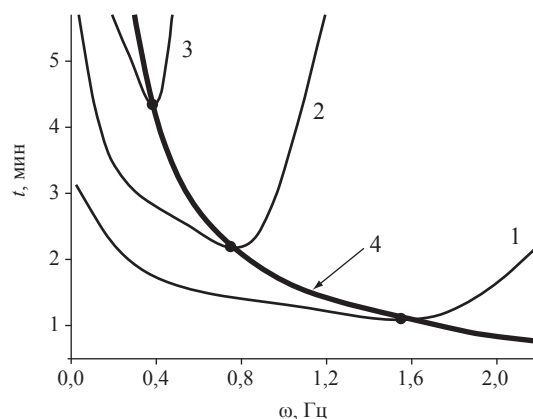


Рис. 2. Зависимость времени разрушения пробки от частоты внешнего воздействия при различных амплитудах воздействия:
1 – $\delta = 24,5$ атм; 2 – $\delta = 17,5$ атм;
3 – $\delta = 10,5$ атм; 4 – огибающая минимального времени

Расчеты проводились до полного восстановления расхода газа: при заданной амплитуде воздействия варьировалась частота внешнего воздействия.

Характерной особенностью представленных зависимостей является наличие минимума, который соответствует минимуму времени разрушения пробки при заданной амплитуде воздействия для определенной (резонансной) частоты.

Наличие минимума на определенной частоте можно объяснить следующим образом. При воздействии на малых частотах в газоконденсат передается количество энергии, недостаточное для приведения в движение существенной массы газа и жидкости (небольшое увеличение расхода наблюдается при любых частотах). С увеличением частоты в движение вовлекается все большее количество газоконденсата, и эта движущаяся масса выводит из состояния покоя «пробку» (изменяются проницаемости, вязкости, распределения давления и т.д.). При дальнейшем увеличении частоты воздействия газоконденсат не успевает за пришедшей волной возмущения за счет инерционных эффектов. Энергия волны воздействия будет переходить в тепло. Кривая 4 представляет кривую минимальных времен разрушения газоконденсатной пробки при различных параметрах внешнего воздействия (амплитуда и частота).

Определим безразмерные переменные следующим образом:

$$x^* = \frac{x}{L}, t^* = \frac{t}{T_0}, P^* = \frac{P}{P_0 - P_L}, \rho_1^* = \frac{\rho_1}{\rho_0}, \rho_2^* = \frac{\rho_2}{\rho_0},$$

$$\mu_1^* = \frac{\mu_1}{\mu_0}, \mu_2^* = \frac{\mu_2}{\mu_0}, s^* = \frac{s}{s_0}, W^* = \frac{W}{W_0},$$

где ρ_0, μ_0, s_0 – плотность, вязкость газовой фазы и газонасыщенность в начальный момент времени; W_0 – скорость образования жидкой фазы при давлении начала конденсации.

Используя методы теории подобия, получим следующие безразмерные параметры:

$$\Psi = \frac{k}{L^2}, \xi = \frac{\delta}{P_0 - P_L}, \eta = \frac{\tau}{T_w},$$

где $\tau = \frac{m\mu_0}{P_0 - P_L}, T_w = \frac{2\pi}{w}$.

Для удобства использования безразмерных критериев масштабируем величину τ , введем T_0 и Ψ :

$$T_0 = \frac{m\mu_0 10^{12}}{P_0 - P_L} = 10^{12} \tau, \Psi = 10^{12} \psi.$$

Зависимость безразмерного времени разрушения пробки T^* от критериев подобия (η, ξ, Ψ) отражена на рис. 3.

Увеличение числа Ψ и амплитуды воздействия приводит к увеличению оптимальной (резонансной) частоты и уменьшению времени воздействия. Аналогичный эффект возникает при уменьшении вязкости или увеличении перепада давлений на участке.

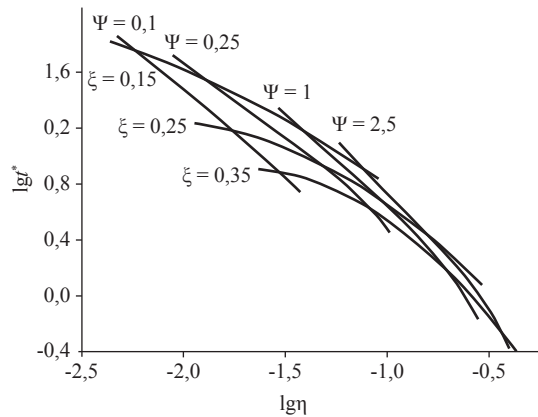


Рис. 3. Зависимость безразмерного времени разрушения конденсатной пробки от критериев подобия (η, ξ, Ψ)

Авторами настоящей статьи показано, что существует минимальное время разрушения конденсатной пробки при заданной амплитуде акустического воздействия на определенной (резонансной) частоте. В рамках теории подобия определены основные безразмерные критерии, влияющие на время разрушения пробки. Построена функциональная зависимость безразмерного минимального времени разрушения пробки от основных критериев подобия.

Полученные результаты могут быть использованы при планировании эксперимента для определения основных параметров экспериментальной установки: длительность эксперимента; характеристики пористой среды; расходы и т.д.

Список литературы

1. Вяхирев Р.И. Разработка и эксплуатация газовых месторождений / Р.И. Вяхирев, А.И. Гриценко, Р.М. Тер-Саркисов. – М.: Недра, 2002.
2. Директор Л.Б. Одномерная нестационарная модель двухфазной фильтрации газоконденсатной смеси: препринт ОИВТ РАН, № 2 – 441 / Л.Б. Директор, В.В. Качалов, И.Л. Майков и др. – М., 2000. – 45 с.
3. Зайченко В.М. Моделирование процессов фильтрации углеводородов в газоконденсатном пласте / В.М. Зайченко, И.Л. Майков, В.М. Торчинский и др. // ТВТ. – 2009. – 47. – № 5. – С. 701–706.
4. Баталин О.Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов / О.Ю. Баталин, А.И. Брусиловский, М.Ю. Захаров. – М.: Недра, 1992.