

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ
В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ

Т.К.РАМАЗАНОВ, М.Х.ГЮЛЬМАМЕДОВ, М.Г.ХАНБАБАЕВА
*Бакинский Государственный Университет;
Институт Геологии НАН Азербайджана*

Численным методом решена задача фильтрации газа к центральной скважине в упругопластическом дилатирующем пласте. Вводя автомодельное переменное, определен радиус упруго-пластической границы, распределения пластового давления, пористости эффективных напряжений, скорости газа и твердых фаз вдоль пласта. По значениям скоростей фаз можно вычислить дебит скважины и интенсивность выноса твердых фрагментов, поступающих из неустойчивой призабойной зоны.

Твердые фрагменты слабосцементированного пласта могут проникать в скважину без фильтрации и при наличии фильтрационного потока. На практике разработки нефтегазовых месторождений это явление обычно объясняется воздействием гидродинамической силы на структурные изменения скелета пласта. Если эта сила превосходит силы сцепления между частицами, тогда разрушаются структурные связи скелета пласта и происходит вымывание (суффузия) (Горбунов А.Т., 1981; Рамазанов Т.К., 1996).

С другой стороны, в слабосцементированных газовых месторождениях перепад пластового давления больше, чем в нефтяных. При этом газ сильно сжимается вблизи эксплуатационной скважины и возникновение неустойчивой зоны приводит к интенсивному выносу твердых фрагментов пласта в скважину. Поэтому представляет интерес изучение развития упругопластической границы и определения гидродинамических параметров пласта при первоначальном понижении пластового давления в бесконечном пласте для случая работы скважины с постоянным дебитом.

1. Рассмотрим неустановившуюся осесимметричную фильтрацию баротронного газа к мгновенно включенной с постоянным дебитом скважине. Предполагается, что пластическая область локализована в забое скважины и процесс фильтрации с выносом твердых фрагментов вызывается линейным стоком. Условия интенсивностей линейного стока для каждой фаз будем задавать на достаточно малом радиусе $a(t)$ условной скважины $a(t) < a_0$

$$Q_f = -2\pi a h m v = \text{const}, \quad Q_s = -2\pi a h (1 - m) v = \text{const}. \quad (1.1)$$

Для нахождения радиуса условной скважины будем использовать равенство нулю радиального эффективного напряжения на ее забое

$$\sigma_r^f = 0 \rightarrow p = p_a, \quad r = a(t) \quad (1.2)$$

На бесконечности все параметры пласта равны первоначальным значениям

ям

$$p = p_0, \quad \sigma_{rr}^{f(0)} = -(\Gamma - p_0), \quad m = m_e^0 \quad (1.3)$$

Дискретизация этих граничных условий осуществляется на достаточно большом радиусе, в котором радиус возмущенной области (расширение контура питания) пропорционально растет \sqrt{t} (Басниев К.С. и др., 2005)

$$R(t) = \sqrt{2\eta t}, \quad \eta = k_e / (\mu\beta_*), \quad (1.4)$$

где k_e абсолютный коэффициент проницаемости упругого пласта, μ - динамическая вязкость газа, β_* - коэффициент упругоэластичности пласта.

Пусть в неограниченном пласте постоянной толщины h в момент $t = 0$ пущена добывающая газовая скважина и при $t > 0$ возникающая упруго-пластическая область с радиусом $b(t)$, а также радиус скважины $a(t)$ перемещаются во внешнюю сторону.

Запишем уравнения баланс сил для газовой и твердой фаз во внутренней пластической области ($a(t) \leq r \leq b(t)$) пласта (Николаевский В.Н., 1996; Рамазанов Т.К., Гюльмамедов М.Х., Ханбабаева М.Г., 2006)

$$\frac{\partial p_n}{\partial r} = -\frac{\mu}{k_n} m_n (w_n - v_n), \quad \frac{\partial \sigma_{rr}^{f(n)}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr}^{f(n)} - \sigma_{\theta\theta}^{f(n)}}{r} - \frac{\partial p_n}{\partial r} = 0, \quad (1.5)$$

уравнения сохранения масс

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_n \rho_f}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m_n \rho_f w_n) &= 0, \\ \frac{\partial (1 - m_n) \rho_s}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r (1 - m_n) \rho_s v_s) &= 0, \end{aligned} \quad (1.6)$$

кинематическое соотношение дилатансии

$$\frac{\partial v_n}{\partial t} + n \frac{v_n}{r} = 0 \quad (1.7)$$

и условие пластического течения матрицы пласта

$$N \sigma_{rr}^{f(n)} - \sigma_{\theta\theta}^{f(n)} = K_n. \quad (1.8)$$

Во внешней упругой области $b(t) \leq r \leq R(t)$ выполняются те же уравнения (1.5) и (1.6), но кинематическое условие дилатансии (1.7) и условие пластического течения заменяются обобщенным законом Гука (Николаевский В.Н., 1996).

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{f(e)} &= (K + G) \frac{\partial u_e}{\partial r} + (K - G) \frac{u_e}{r} + \varepsilon p_e, \\ \sigma_{\theta\theta}^{f(e)} &= (K - G) \frac{\partial u_e}{\partial r} + (K + G) \frac{u_e}{r} + \varepsilon p_e. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Здесь индексы « n » и « e », соответственно, относятся к пластической и упругой зоне; w , v – истинные скорости газа и твердой частицы; p – пластовое давление; σ_{ij}^f -эффективные напряжения; m , k – пористость и коэффициент проницаемости пласта; G , K – модуль сдвига и коэффициент объемного сжатия сухого пористого пласта; $\varepsilon = \beta_1 K$ - коэффициент сжимаемости матрицы пласта; u

– радиальное смещение твердых частиц; $n = 1 + 2\Lambda(3\Lambda + \sqrt{3(3 - \Lambda^2)}) / (3 - 4\Lambda^2)$; Λ – скорость дилатансии, которая при $\Lambda > 0$ характеризует разрыхление плотной матрицы пласта, при $\Lambda < 0$ – уплотнение рыхлой матрицы, а при $\Lambda = 0$ несжимаемость породы, $K_n = 2Y_n \sin\varphi / \alpha(1 - \sin\varphi)$, $N_n = (1 + \sin\varphi) / (1 - \sin\varphi)$, α , Y_n – коэффициенты внутреннего трения и сцепления, φ – угол внутреннего трения.

Считаем, что газ является баротропным, а плотность твердой фазы постоянна

$$\rho_f = \frac{\rho_{at}}{\rho_s} p, \quad \rho_s = \text{const}. \quad (1.10)$$

На границе $b(t)$, разделяющей пластическую область от упругой, должны быть выполнены условия непрерывности давлений, радиальных напряжений, скоростей твердых и газовых частиц

$$p_n = p_e, \quad \sigma_{rr}^{f(n)} = \sigma_{rr}^{f(e)}, \quad v_n = v_e, \quad w_n = w_e \quad (1.11)$$

В вышеуказанных уравнениях и условиях присутствующие напряжения и давления включают в себя все действующие напряжения и давления в пласте, т.е. начальные и генерируемые при пуске скважины. Если упругие эффективные напряжения на некотором радиусе удовлетворяют условию Мора-Кулона (1.8), то этот радиус $b(t)$ будет внешней границей пластической области.

2. Осесимметричная задача (1.1)-(1.10) является автомодельной и поэтому введем автомодельную переменную $\xi = r/\sqrt{t}$ и новые функции $W = w/t, V = v/t, U = u/t$. Тогда искомые функции удовлетворяют обыкновенные дифференциальные уравнения. Если подставляя (1.9) во второе уравнение (1.5), а (1.9) в (1.6), то уравнения (1.5) и (1.6) в упругой области $\xi_b \leq \xi \leq \xi_R$ в автомодельной переменной примут вид (Графутко С.В., Николаевский В.Н., 1998)

$$\frac{dp_e}{d\xi} = -\frac{\mu}{k_e} m_e (W_e - V_e), \quad (2.1)$$

$$\frac{dV_e}{d\xi} = \frac{\mu(1-\varepsilon)}{2k_e(K+G)} \xi m_e (W_e - V_e) - \frac{V_e}{\xi}, \quad (2.2)$$

$$\frac{dW_e}{d\xi} = \frac{\xi - 2W_e}{2m_e p_e} \frac{d(m_e p_e)}{d\xi} - \frac{W_e}{\xi}, \quad (2.3)$$

$$\frac{dm_e}{d\xi} = \frac{\mu(1-\varepsilon)(m_e - 1)}{k_e(K+G)(\xi - 2V_e)} \xi m_e (W_e - V_e) \quad (2.4)$$

Дифференцируя первое уравнение (1.9) по t с учетом закона фильтрации газа (1.5), переходим в новые переменные

$$\frac{d\sigma_{rr}^{f(e)}}{d\xi} = 4G \frac{V_e}{\xi^2} - \frac{\mu}{k_e} m_e (W_e - V_e), \quad (2.5)$$

где

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{t}} \frac{d}{d\xi}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{1}{2t} \xi \frac{d}{d\xi}, \quad V_e = -\frac{1}{2} \xi \frac{dU}{d\xi} + \frac{1}{2} U.$$

В пластической зоне ($\xi_a \leq \xi \leq \xi_b$) уравнения состояния (1.10) и движения газа (2.1), неразрывности фаз (2.3), (2.4) условие текучести (1.8) в новых переменных не изменяют свою форму, однако уравнение движения матрицы (1.5) с помощью (1.8), а также (1.7) принимают вид

$$\frac{d\sigma_{rr}^{f(n)}}{d\xi} = -\frac{\sigma_{rr}^{f(n)}(1-N_n)+K_n}{\xi} - \frac{\mu}{k_n} m_n (W_n - V_n), \quad (2.6)$$

$$\frac{dV_n}{d\xi} = -n \frac{V_n}{\xi}. \quad (2.7)$$

Упругопластическая граница определяется из условия текучести (1.8), которое выражается упругим эффективным напряжением $\sigma_{rr}^{f(e)}$ и скоростью V_e

$$\frac{d\sigma_{rr}^{f(e)}}{d\xi} = \frac{1}{N_e - 1} \left(4G \frac{V_e}{\xi} + K_n \right). \quad (2.8)$$

В автомодельной постановке задача приводится к стационарному решению в пространстве ξ и граничные условия (1.2), (1.3), (1.11) сохраняют свою форму, а (1.1) запишем в виде

$$\begin{aligned} Q_f &= -2\pi h \xi_a m_a W_a = \text{const}, \\ Q_s &= -2\pi h \xi_a (1 - m_a) V_a = \text{const}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

В переменной ξ начальные условия и условия в бесконечности $\xi \rightarrow \infty$ совпадают. В упругой $\xi_b \leq \xi \leq \xi_R$ ($p_e, W_e, V_e, m_e, \sigma_{rr}^{f(e)}$) (2.1)-(2.5) и пластической $\xi_a \leq \xi \leq \xi_b$ ($p_n, W_n, V_n, m_n, \sigma_{rr}^{f(n)}$) (2.1), (2.3), (2.4), (2.6), (2.7) областях эти системы уравнений относительно искомых переменных замкнуты. После определения этих переменных из второго уравнения (1.9), (1.8) и (1.10), соответственно, находятся $\sigma_{\theta\theta}^{f(e)}, \sigma_{\theta\theta}^{f(n)}, \rho_f^{(e)}, \rho_f^{(n)}$.

Поставленная задача решена численным методом Рунге-Кутты (Самарский А.А., Гулин А.В., 1989). Решение задачи имеет практический смысл только при соблюдении условия $a(t) \leq a_0$ (a_0 – реальный радиус скважины). Из определения (1.4) видно, что (1.3) выполняется при $\xi_R = \sqrt{2\eta}$ и в пространстве автомодельной переменной на скважине и на контуре питания ставятся те же граничные условия, как и в стационарной задаче.

При численной реализации критерий (1.8) проверялся на каждом шаге вычислений и на контуре питания газа скорость твердых частиц выбиралась так, чтобы выполнялось условие $\sigma_{rr}^{f(n)}$ при $\xi = \xi_a$.

В упругой области контур питания принимается как начало границы сетки. Сначала из уравнения (2.1) определяется p_e , потом последовательно находят $V_e, m_e, W_e, \sigma_{rr}^{f(e)}$ и $\sigma_{\theta\theta}^{f(e)}$. После определения из (2.8) ξ_b аналогично решается

задача в пластической зоне. Дебит газа и интенсивность выноса твердых частиц скважины при пластическом течении матрицы пласта вычисляются по скоростям фаз W_n и V_n .

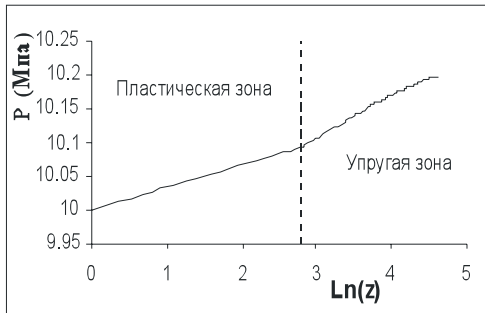


Рис. 1

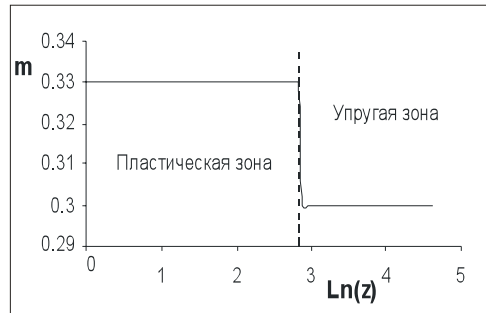


Рис. 2

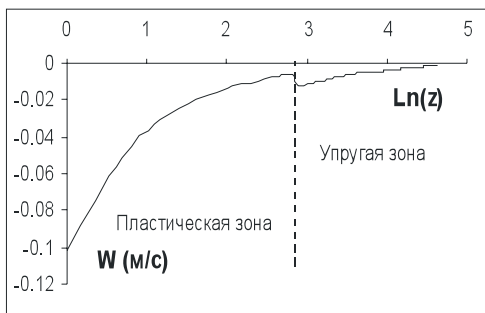


Рис. 3

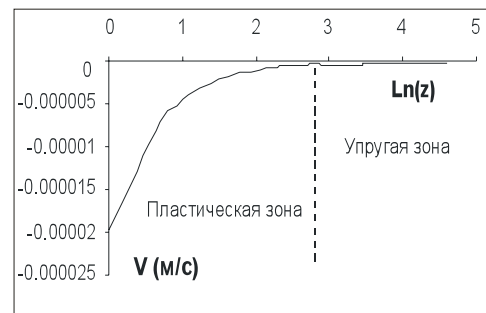


Рис. 4

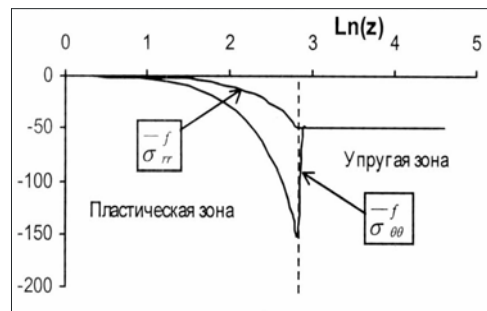


Рис. 5

Расчеты проведены для следующих параметров пласта и газа:

$$m_e^0 = 0,3; v = 0,25, N_e = N_n = 3, n = 1,5, k_e = k_n = 10^{-13} \text{ м}^2, a_0 = 0,1, \\ m, h = 10\text{м}, \mu = 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, K_e = K_n = 3,85 \cdot 10^5 \text{ Па}, \beta_1 = 10^{-11} \text{ Па}^{-1}, \\ E = 10^{10} \text{ Па}, \sigma_a^f = 0, \sigma_{rr}^{f(0)} = -5 \cdot 10^7 \text{ Па}, p_0 = 10^7 \text{ Па}, \eta = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Результаты вычисления представлены на рис. 1 – рис. 5, когда изначально плотной упаковки породы пласта разрыхляясь, развивает пластическую зону

вокруг скважины. В логарифмической координате $\ln z$, $z = \xi / \xi_a$ в пластической зоне пластовое давление и пористость практически не изменяется (рис. 1, рис. 2). Однако при переходе от пластической зоны в упругую пористость уменьшается скачкообразно и ее рост не заметен.

Кольцевое эффективное напряжение $\sigma_{\theta\theta}^{f(n)}$ значительно падает по сравнению с радиальным $\sigma_r^{f(n)}$ вплоть до границы ξ_b , но при переходе в упругую зону оно скачком восстанавливается и асимптотически стремится к $\sigma_r^{f(e)}$ (рис. 3). Из рис.4 и рис. 5 видно, что вблизи скважины существенно увеличиваются скорости газа и твердых частиц, которые требуют необходимо учитывать течение твердых фрагментов пласта в скважину.

Заключение. Главными причинами выноса песка из пласта являются разрушение призабойной зоны, образование каналов и кверн, обрушение их стенок и вышележащих пород (Мелик-Пашаев В.С., Халилов Э.М., Серегина В.Н., 1984).

Основные факторы, влияющие на интенсивность выноса песка – глубина залегания пласта, уплотняемость и состояние поверхности забоя, депрессия на пласт, пластовое давление, ухудшение порницаемости, дебит скважины. В практике добычи флюида применяются различные методы борьбы с выносом песка, включая механические и химические методы укрепления песка путем установки различного вида фильтров и закачки химических реагентов. Поэтому для установки блочных скважинных фильтров не только требуется определить размер пластической области, а также – гидродинамических параметров и напряженно-деформированного состояния вокруг эксплуатационной скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов А.Т. Разработка аномальных нефтяных месторождений. М.: Недра, 1981, 237 с.
2. Рамазанов Т.К. Пластические зоны вокруг действующей скважины. Изв. ВУЗ, Нефть и газ, 1996, № 3-4, с. 13-19.
3. Басниев К.С. и др. Подземная гидродинамика. Москва-Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2005, 496 с
4. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996, 447 с.
5. Рамазанов Т.К., Гюльмамедов М.Х., Ханбабаева М.Г. Динамика дилатансионно-пластической зоны вокруг действующей скважины и интенсивность выноса твердой породы. Изв. НАН Азерб., серия Наук о Земле, Баку, 2006, стр. 55-64.
6. Графутко С.В., Николаевский В.Н. Задача о выносе песка в работающую скважины. М.: Мех. жид. и газа, 1998, №5, с. 130-138.
7. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.:Наука, 1989, 432 с.
8. Мелик-Пашаев В.С., Халилов Э.М., Серегина В.Н. Аномально высокие пластовые давления на нефтяных и газовых месторождениях. М.: Недра, 1984., 256 с.

**QUYUƏTRAFI ZONANIN DAYANIQSIZLIQ ŞƏRAİTİNDƏ
QAZ QUYUSUNUN İSTİSMARI**

T.Q.RAMAZANOV, M.X.GÜLMƏMMƏDOV, M.H.XANBABAYEVA

XÜLASƏ

Ədədi üsulün köməyi ilə elastiki-plastik dilatant layda qazın mərkəzi quyuya süzülmə məsələsi həll olunmuşdur. Avtomodel dəyişən daxil etməklə elastiki-plastik sərhədin radiusu, lay təzyiqinin, effektiv gərginliyin, məsaməliyin paylanması, layda bərk fazanın və qazın sürətləri təyin edilmişdir. Dayanıqsız quyu ətrafı zonada fazaların sürətlərinə görə bərk hissəciklərin axma intensivliyini və quyunun debitini hesablamaq mümkündür.

**OPERATION OF GAS CHINK IN CONDITIONS
OF BOTTOM-HOLE ZONE INSTABILITY**

T.G.RAMAZANOV, M.Kh.GYULMAMEDOV, M.H.XANBABAYEVA

SUMMARY

The filtering problem of gas to center hole decided with numerical method in elastoplastic dilotant layer.

Radius of elastically-plastic border, distribution of formation pressure, porosity of effective stresses, speed of gas and hard phases along layer are determined by entering auto model variable.

On values of speeds phases it is possible to calculate debit of chink and acting from unstable well bottom zone with intensity of carrying out of hard fragments.