

УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА  
В ЗОНАЛЬНО-ОДНОРОДНОМ ДИЛАТАНСИОННО-  
ПЛАСТИЧЕСКОМ И УПРУГОМ КРУГОВОМ ПЛАСТЕ

Т.К.РАМАЗАНОВ, М.Г.ХАНБАБАЕВА

Бакинский Государственный Университет  
mehri72@rambler.ru

*Рассмотрена стационарная фильтрация идеального газа в зональной дилатансионно-пластической и упругой пористой среде в центральную скважину. Определены фильтрационные параметры пласта в кольцевой пластической зоне вокруг скважины и распределения порового давления вдоль пласта. С учетом дилатансионного изменения пористости и коэффициента проницаемости найдена продуктивность скважины.*

Изучение распределения порового давления и потока флюида в дилатансионно-пластических пластах представляет большой интерес для изучения проблемы устойчивости призабойной зоны скважины. Течение твердых фрагментов из пластической зоны пласта в скважину нарушает ее нормальный режим работы, приводит к образованию каверн в призабойной зоне и песчаных пробок в скважине. Для предотвращения выноса песка, разрушения призабойной зоны и смятия колонны скважины, а также утолщения пластов, приведенные к оседанию свободной поверхности, территории месторождений нуждаются в более простых постановках решений задач о пластических разрушениях пористых сред при фильтрации флюида.

Фильтрация флюида в упругих и вязкоупругих пористых средах в литературе достаточно хорошо изучена [1-6]. В упрощенных постановках решены некоторые осесимметричные задачи фильтрации несжимаемой жидкости в упруго-пластических пластах и установлена связь между расходом жидкой и твердой фаз [7-9]. Рассмотрена автомодельная задача о пуске газовой скважины в упруго-пластическом пласте с постоянным дебитом [10].

**1. Постановка задачи.** Пусть порода пласта вокруг действующей скважины во внутренней кольцевой зоне с радиусом  $R$  подвергается дилатансионно-пластической деформации, а во внешней зоне – линейно-упругой. На контуре питания  $R_k$  ( $R_k \gg R$ ) поддерживается постоянное пластовое давление  $P_0$ , а на стенке скважины радиусом  $R_c$  радиальное эффективное напряжение и поровое давление  $P_c$  меньше соответствующих контурных напряжения и давления. Эффективные напряжения удовлетворяют то условие текучести, при котором вокруг скважины реализуются только одна пластическая зона.

Для стационарного случая в пластической зоне уравнения сохранения массы для твердой и жидкой фаз в плоскорадиальном пласте имеют вид [12]:

$$\frac{d}{dr} [r(1-m)\rho_1 v_1] = 0, \quad \frac{d}{dr} [rm\rho_2 v_2] = 0. \quad (1)$$

Здесь  $m$  – пористость пласта,  $v_1, v_2$  – компоненты истинных скоростей твердой и газовой фаз,  $\rho_1, \rho_2$  – плотности материала матрицы и газа.

Уравнение состояния идеального газа, которым будем пользоваться в дальнейшем, запишется в виде:

$$\rho_2 = \frac{\rho_{at}}{p_{at}} p, \quad (2)$$

Фильтрация газа при  $v_2 \gg v_1$  описывается законом Дарси

$$v_2 = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3)  $\rho_{at}$  – плотность газа при атмосферном давлении  $p_{at}$ ,  $k$  – коэффициент проницаемости в пластической зоне,  $\mu$  – динамическая вязкость газа.

Кинематическая связь между скоростями объемной деформации и сдвига матрицы пласта принимает вид [7]:

$$\frac{dv_1}{dr} + n \frac{v_1}{r} = 0, \quad (4)$$

где,

$$n = 1 + \frac{2\Lambda \left( 3\Lambda - \sqrt{3(3 - \Lambda^2)} \right)}{3 - 4\Lambda^2}. \quad (5)$$

$\Lambda$  – скорость дилатансии.

При  $n > 1$  происходит разрыхление матрицы пласта,  $n < 1$  ее уплотнение, а  $n = 1$  соответствует критическому состоянию матрицы (несжимаемость матрицы пласта). Коэффициент проницаемости пласта на основе экспериментальных данных может быть задан степенной функцией пористости [1].

$$k = k_0 \left( \frac{m}{m_0} \right)^l; \quad l = \frac{a_k}{a_m}, \quad (6)$$

где  $k_0, m_0$  – соответствуют начальным значениям порового давления  $p_0$ ;  $a_k, a_m$  – коэффициенты, определяемые при обработке экспериментальных данных.

В упругой зоне при установившейся фильтрация газа распределения давления определяется из следующего уравнения [2, 3]

$$\frac{d^2 p_e^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp_e^2}{dr} = 0, \quad R \leq r \leq R_k. \quad (7)$$

**Граничные условия.** На стенке скважины задано паравое давление

$$p(r) = p_e(r) \text{ при } r = R. \quad (8)$$

На упруго-пластической границе должны быть выполнены условия неразрывности поровых давлений и скоростей фильтраций:

$$p(r) = p_e \text{ при } r = R_e, \quad (9)$$

$$\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr} = \frac{k_e}{\mu} \frac{dp_e}{dr} \text{ при } r = R. \quad (10)$$

На контуре пластической зоны пористость пласта принимает свое критическое значение:

$$m(r) = m_R \text{ при } r = R. \quad (11)$$

В зоне течения разрушенной массы интегрирование уравнения (4) приводит к кинематическому интегралу:

$$v_1 = \frac{C}{r^n}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в уравнение неразрывности для твердой фазы (1) и интегрируя его при граничным условием (11), получаем

$$m = 1 - (1 - m_R) \frac{\rho_1(R)}{\rho_1(r)} \left( \frac{r}{R} \right)^{n-1}, \quad R_c \leq r \leq R. \quad (13)$$

Если считать плотность материала матрицы из (13) имеем:

$$m = 1 - (1 - m_R) \left( \frac{r}{R} \right)^{n-1}, \quad R_c \leq r \leq R. \quad (14)$$

Из уравнения неразрывности газовой фазы (1) с учетом (2) следует

$$v_2 = C_1 \frac{p_{am}}{m \rho_{am} r p}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в закон фильтрации (3) с учетом (6) для определения функции давления в области  $R_c \leq r \leq R$  приходим к уравнению:

$$p \frac{dp}{dr} = - \frac{C_1 p_{am} \mu m_0^l}{\rho_{am} k_o} \frac{1}{r [m(r)]^{l+1}}. \quad (16)$$

Решение уравнения (16) имеет вид:

$$p^2(r) = - \frac{2C_1 p_{am} \mu m_0^l}{\rho_{am} k_o} \int \frac{dr}{r [m(r)]^{l+1}} + C_2, \quad (17)$$

где  $C_2$  и  $C_3$  – постоянные интегрирования.

Дважды интегрируем уравнение (7) получаем:

$$p_e^2(r) = C_3 \ln r + C_4. \quad (18)$$

Используя граничные условия (8)-(10) и условия на контуре питания с учетом (14) определяем постоянные интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$ . После подстановки их выражения в (17) и (18) имеем:

$$p(r) = \sqrt{p_c^2 + \frac{m_R m_0^l k_e (p_o^2 - p_c^2) f(R_c, r)}{m_R m_0^l k_e f(R_c, R) + k_0 \ln \frac{R_k}{R}}}, \quad R_c \leq r \leq R, \quad (19)$$

$$p_e(r) = \sqrt{p_0^2 + \frac{k_0(p_0^2 - p_c^2) \ln \frac{R_k}{r}}{m_R m_0^l k_e f(R_c, R) + k_0 \ln \frac{R_k}{R}}}, \quad R \leq r \leq R_k, \quad (20)$$

где

$$f(R_c, r) = - \int_{R_c}^r \frac{dx}{x \left[ 1 - (1 - m_R) \left( \frac{x}{R} \right)^{n-1} \right]^l},$$

$$f(R_c, R) = \int_{R_c}^R \frac{dx}{x \left[ 1 - (1 - m_R) \left( \frac{x}{R} \right)^{n-1} \right]^l}.$$

Массовый дебит скважины определяется равенством:

$$G = - \frac{2\pi R_c h \rho_{am} k}{\mu p_{am}} p \frac{dp}{dr} \text{ при } r = R_c. \quad (21)$$

Посредством элементарных преобразований в (19) и (21) получим:

$$G = \frac{\pi k_0 h \rho_{am} m_R k_e (p_0^2 - p_c^2)}{\mu p_{am} \left[ 1 - (1 - m_R) \left( \frac{R_c}{R} \right)^{n-1} \right]^l \left[ m_R m_0^l k_e f(R_c, R) + k_0 \ln \frac{R}{R_k} \right]}. \quad (22)$$

На основе полученного решения (19), (20) и по формуле (22) составлена программа для расчетов на персональном компьютере, реализованная при  $n = 0.95; 0.98; 1.0; 1.5; 2.0$ ;  $R = (0.5; 1.7; 3.0) \text{ м}$ ,  $l = 1; 2; 2.5; 4$

$$h = 10 \text{ м}, R_c = 0.1 \text{ м}, R_k = 100 \text{ м}, m_R = 0.3, m_0 = 0.2; k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2;$$

$$k_e = 0.5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2; \mu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}; p_{am} = 10^5 \text{ Па}.$$

Результаты расчетов представлены в виде кривых распределения давления и дебита скважины, часть из которых приведена, соответственно, на рис.1; 2 и 5. Анализ кривых показывает, что в отличие от упругой зоны  $r \in [R, R_k]$  (рис.2) кривые давления в дилатансионно-пластической зоне  $r \in [R_c, R]$  будут изогнутыми (рис. 1).

При малых значениях  $n$  ( $0.95 \leq n \leq 1$ ) давление в координатах изменяется гораздо более интенсивно, чем при больших значениях ее. Уплотнение матрицы в дилатансионно-пластической зоне пласта влечет за собой увеличение давления. Так, например, при фиксированных значениях  $R$  и  $l$  уменьшение параметра « $n$ » с двух до 0.95 приводит к увеличению порового давления на  $(9 \div 17)\%$ .

Однако в упругой зоне  $r \in [R, R_k]$  наблюдается обратная картина (рис. 2). При тех же данных проведены расчеты по формулам (6) и (14) для изменения пористости и проницаемости в дилатансионно-пластической зоне пласта, результаты которых представлены на рис. 3 и рис. 4.

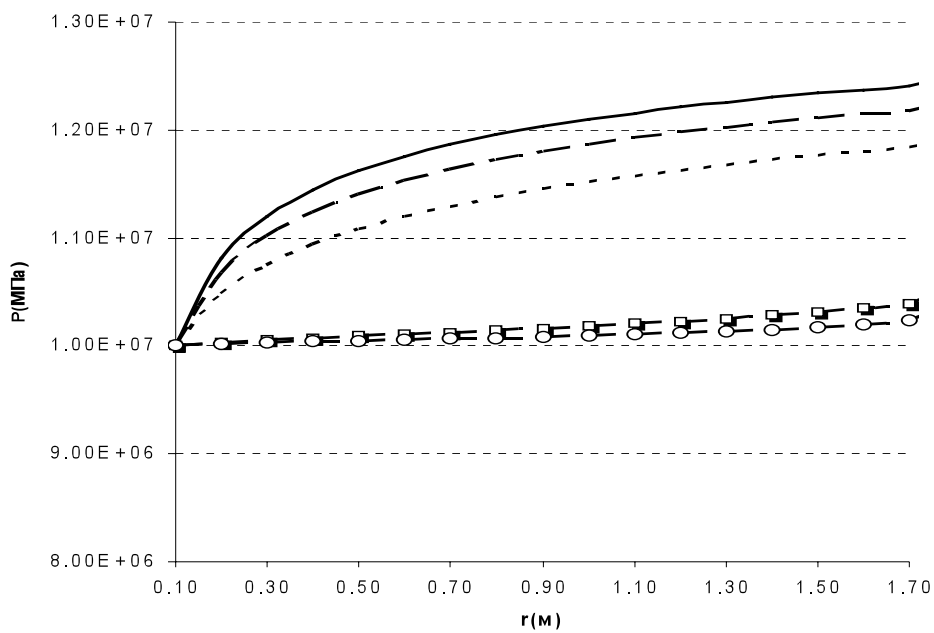


Рис. 1. Распределение давления в дилатансионно-пластической зоне пласта при  $l=2$ ;  $R=1.7$ ;  $R_c \leq r \leq R$

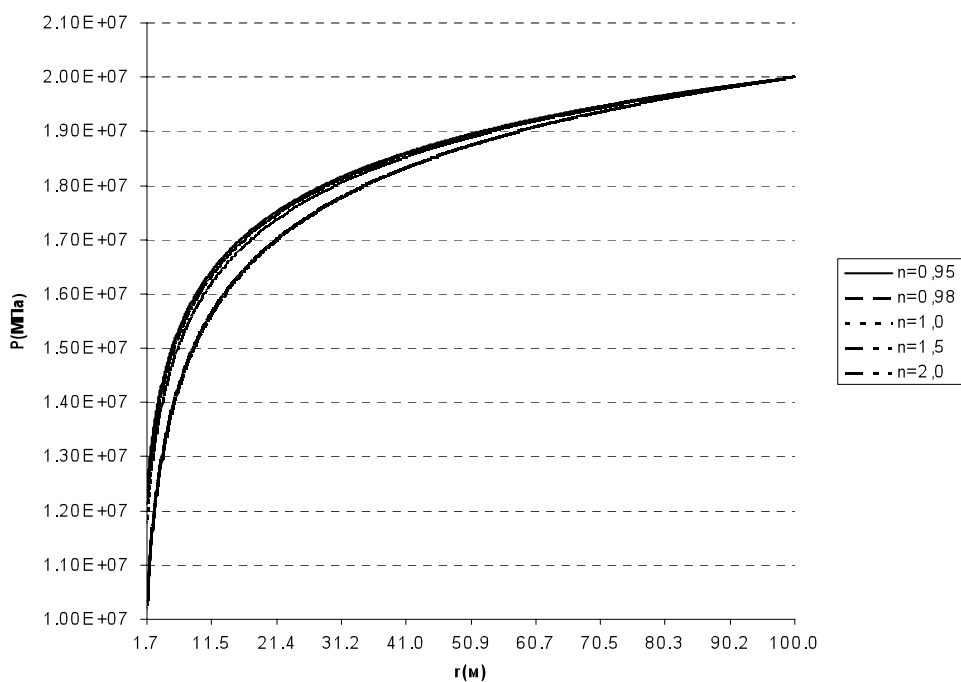


Рис. 2. Распределение давления в упругой зоне пласта при  $l=2$ ;  $R=1.7$ ;  $R \leq r \leq R_k$

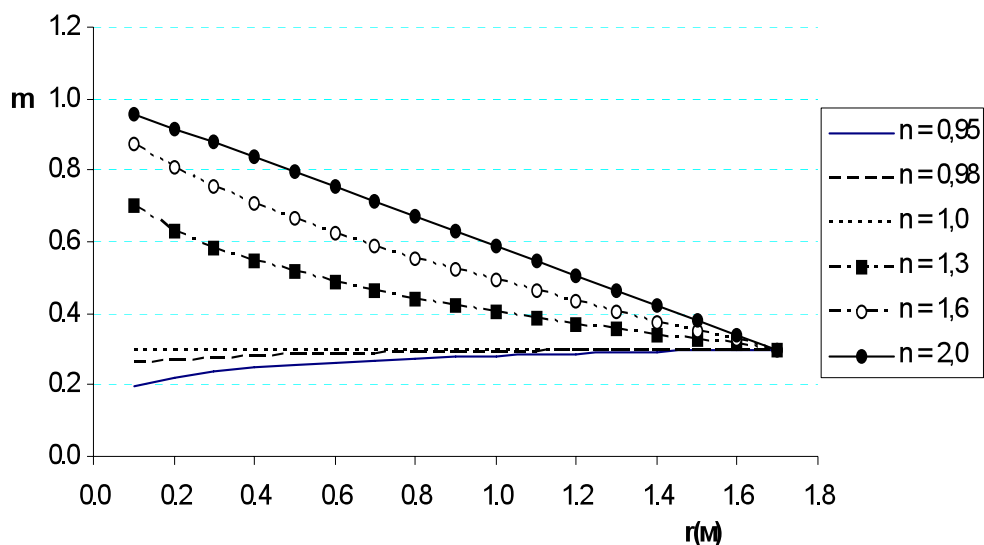


Рис. 3. Изменение пористости пласта в дилатансионно-пластической зоне при  $l=2$ ;  $R=1.7$ ;  $R_c \leq r \leq R$

Кривые, представленные на рисунках 4 и 5 показывают, что в случае разрыхления матрицы в области дилатансионно-пластической зоны пласта это ведет к увеличению проницаемости и, соответственно, увеличению дебита скважины на 43%.

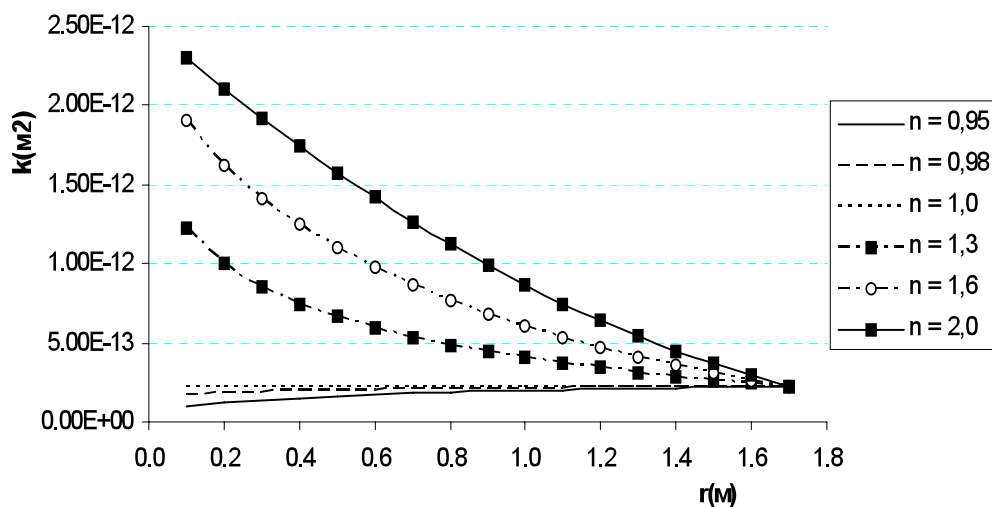
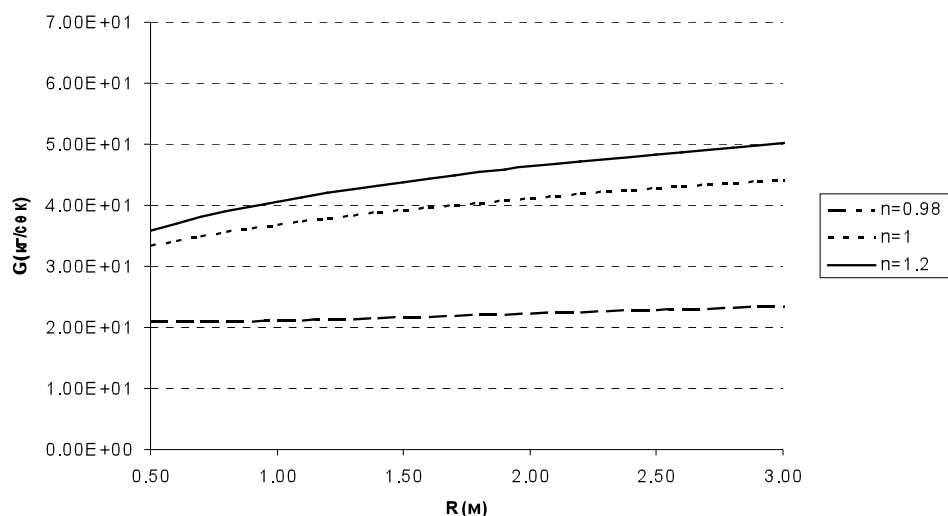


Рис. 4. Изменение коэффициента проницаемости пласта в дилатансионно-пластической зоне при  $l=2$ ;  $R=1.7$ ;  $R_c \leq r \leq R$

В случаях уплотнения матрицы пласта по сравнению с ее несжимаемостью массовые дебиты скважины дают существенно заниженные прогнозные оценки.



**Рис. 5.** Зависимость массового дебита скважины от радиуса дилатансионно-пластической зоны при  $l=2$ .

Таким образом, выведена аналитическая связь между поровыми давлениями, дебитом скважины и скоростями дилатансии в упруго-пластическом газовом пласте.

Авторы весьма признательны члену корр. НАНА, профессору Г.И.Джалалову за консультации при выполнении данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996, 447 с.
2. Басниев К.С. и др. Подземная гидродинамика. Институт компьютерных исследований, М.: Ижевск, 2005, 496 с.
3. Мирзаджанзаде А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С., Алиев З.О. Основы технологии добычи газа. М.: Недра, 2003, 880 с.
4. Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации. М.: Нефть и газ, 1995, ч.2, 493 с.
5. Молокович Ю.М., Осипов П.П. Основы теории релаксационной фильтрации. Казань: КГУ, 1987, 113 с.
6. Рамазанов Т.К., Гюльмамедов М.Х. Деформирование и фильтрация в окрестности скважины в линейно-наследственной среде// International Applied Mechanics, Kiev: 2003, т. 39, № 8, с. 921-928.
7. 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, с. 55-64.
8. Nikolaevskiy V.N. Theory of plastic flows of sands with fluid pressure effects// I. Engineering Mechanics ASCE, 131, 2005, № 9, p. 986-996.
9. Рамазанов Т.К. Пластические зоны вокруг действующей скважины// Изв. ВУЗ, Нефть и газ, 1996, № 3-4, с. 13-19.
10. Рамазанов Т.К., Гюльмамедов М.Х., Ханбабаева М.Г. Эксплуатация газовой скважины в условиях неустойчивости призабойной зоны // Вестник Бакинского Университета, Серия физ. мат. наук, 2008, № 2, с. 102-108.

11. Масленников В.В., Ремизов В.С. Системный геофизический контроль разработки крупных газовых месторождений. М.: Недра, 1993, 302 с.
12. Графутко С.В., Николаевский В.Н. Задача о выносе песка в работающую скважину. М.: Мех. жид. и газа, 1998, №5, с. 130-138.

**ELASTİKİ – PLASTİKİ DİLANTANT BİRCİNS  
LAYDA İDEAL QAZIN HƏRƏKƏTİ**

**T.K.RAMAZANOV, M.H.XANBABAIEVA**

**XÜLASƏ**

Elastiki – plastik dilatant layda qazın mərkəzi quyuya süzülmə məsələsinə baxılmışdır. Quyu ətrafında elastiki-plastik zonada layın kəmiyyətləri, lay təzyiqinin paylanması təyin edilmişdir. Məsələliyin dilatant dəyişməsi və keçiricilik əmsalı nəzərə alınmaqla quyunun məhsuldarlığı öyrənilmişdir.

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

**T.K.RAMAZANOV, M.H.KHANBABAYEVA**

**SUMMARY**

The stationary filtration of ideal gas to the dilatant-plastic and elastic porous medium in the central well is considered. Filtrational parameters of a layer in a circular plastic zone around of a well and distribution of pressure along a layer are determined. Taking into account dilatant changes of porosity and permeability, oil well production is determined.