УДК 622.276.031

Г.Я. ХУСАИНОВА, к.ф.-м.н., доцент, доцент, СФ БашГУ
И.Г. ХУСАИНОВ, д.ф.-м.н., профессор, профессор, СФ БашГУ
г. Стерлитамак

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ СПОСОБ ОЧИСТКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА

Как известно, из пласта углеводороды добываются в течение весьма продолжительного времени. В процессе их фильтрации через поровые каналы происходит засорение последних за счет того, что твердые частицы (смолистые вещества, парафины и т.п.) оседают на стенки пор. Радиус свободной части пор уменьшается, что приводит к уменьшению скорости фильтрации, т.е. к снижению дебита скважины. [1-3]

Для очистки призабойной зоны пласта используют кислотные ванны, закачку раствора поверхностно-активных веществ и другие экологически вредные способы. В данной работе для очистки пор призабойной зоны предлагается использовать горячий газ, — например, энергию взрыва. Так, если внутри скважины создать небольшой взрыв, то давление в скважине увеличится, а температура газа поднимается. В результате этого процесса высокотемпературный газ проникает глубоко в пористые породы, нагревая и расплавляя парафины, осевшие на стенках пор, что в конце концов приводит к очистке призабойной зоны пласта.

Кроме этого, исследования изменения давления внутри скважины позволяют сделать оценку коллекторских параметров пласта.

Перечислим и рассмотрим основные уравнения, необходимые для решения поставленной задачи. Пусть в начальный момент времени $(t<0)$ давление газа в пористой среде вокруг некоторой полости равно p_0. В данной работе рассматриваются полости плоской, цилиндрической и сферической формы. Полость заполнена взрывчатым веществом. В момент времени $t=0$ после взрыва давление в полости равно значению p_e. После этого происходит проникание продуктов взрыва в пористую среду, окружающую полость. Постепенно давление в полости будет снижаться и стремиться к исходному значению p_0.

Чтобы построить математическую модель задачи, сделаем следующие допущения: скелет окружающей полость среды однородный и несжимаемый; давление в пористой среде небольшое; значения фильтрационных параметров флюида не зависят от температуры и давления.

Используя принятые допущения, запишем математическую модель, состоящую из закона сохранения флюида, уравнения пьезопроводности и закона Дарси в следующем виде:

$$\frac{d}{dt}\Big((\pi a)^n a\rho\Big) = -(2\pi a)^n \rho\upsilon\Big|_{r=a}\ , \tag{1}$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \chi \frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r} r^n \frac{\partial p'}{\partial r},\ \upsilon' = -\frac{k}{\mu_g}\frac{\partial p'}{\partial r} \tag{2},$$

где p', υ' — функции зависимости давления и скорости фильтрации от времени и координаты; χ — параметр пьезопроводности, который определяется по формуле $\chi = \dfrac{kp_0}{\mu_g m}$; m, k — параметры пористости и проницаемости среды вокруг полости; ρ, μ_g — параметры плотности и вязкости флюида; a — радиальный параметр полости; $n = 0$ или 1. Параметр n определяет форму полости: $n = 0$ — плоско-одномерная форма; n=1 — радиально-симметричная форма полости.

Исходя из постановки задачи, начальное и граничное условия имеют следующий вид:

$$p' = p_0 \text{ при } t = 0,\quad r > a;\ p' = p(t),\ \upsilon = \upsilon' \text{ при } t > 0,\quad r = a. \tag{3}$$

Значения плотности и давления флюида внутри полости связаны с помощью степенного закона, т.е. уравнения состояния

$$\frac{p}{p_e} = \left(\frac{\rho}{\rho_e}\right)^{\gamma}, \tag{4}$$

где γ – определяет показатель политропы.

Рассмотрим пример плоско-одномерной задачи ($n = 0,\quad r = x$**).** Возьмём случай, при котором полость имеет плоско-одномерную форму. Так как граничное условие является переменной величиной, то для решения задачи применим принцип Дюгамеля [4] и получим:

$$p'(x,t) = \int_0^t \frac{\partial U(x-a, t-\tau)}{\partial t}(p(\tau) - p_0)d\tau\,, \tag{5}$$

где функция U определяется по следующей математической формуле:

$$U(x-a,t-\tau)=1-\Phi\left(\frac{x-a}{2\sqrt{\chi(t-\tau)}}\right)\ , \quad \Phi(\alpha)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\alpha} e^{-\mu^2}d\mu . \qquad (6)$$

Используя уравнения (4) и (2), из закона сохранения массы (1) получаем нелинейное интегральное уравнение, описывающее зависимость давления от времени внутри плоско-одномерной полости:

$$\ln\left(\frac{p}{p_e}\right)=-\frac{k\gamma}{a\mu_g\sqrt{\pi\chi}}\int_0^t \frac{p(\tau)-p_0}{\sqrt{t-\tau}}d\tau . \qquad (7)$$

Для численного исследования полученное уравнение (7) представим в безразмерной форме. Введем следующие безразмерные переменные:

$$\tilde{p}=\frac{p}{p_e}, \quad \tilde{p}_0=\frac{p_0}{p_e}, \quad T=\frac{t}{t_0}, \quad \tilde{\tau}=\frac{\tau}{t_0}, \quad t_0=\left(\frac{k\gamma p_e}{a\mu\sqrt{\pi\chi}}\right)^{-2} .$$

В безразмерных переменных уравнение (7) принимает вид:

$$\ln \tilde{p}=-\int_0^T \frac{\tilde{p}(\tilde{\tau})-\tilde{p}_0}{\sqrt{T-\tau}}d\tilde{\tau} . \qquad (8)$$

Приведём результаты численного решения задачи. Итак, численное решение уравнения (8) и анализ полученных результатов представляет наибольший интерес с точки зрения приложений. Нелинейное интегральное уравнение было исследовано при следующих значениях параметров системы: m=0.1, a=0.1 м, μ=10^{-5}Па$*$с, p_0=1 МПа, p_e=10 МПа.

Результаты расчета приведены на рисунке 1. Здесь получена зависимость периода полувосстановления давления t_p внутри полости от параметра проницаемости. В качестве t_p принимается время, за которое давление внутри плоско-одномерной полости уменьшается в два раза по сравнению с начальным значением.

Из рисунка видно, что с увеличением значения параметра проницаемости период полувосстановления давления уменьшается. Отметим, что проведя повторно опыт с взрывом, по уменьшению периода полувосстановления давления возможно будет оценить степень очистки пористой среды вокруг полости.

Таким образом, нами была рассмотрена задача очистки призабойной зоны пласта с помощью энергии взрыва. В результате получена математическая модель рассматриваемой задачи, а также исследован процесс восстановления давления в полости плоско-одномерной формы. Показано, что с помощью взрыва можно очистить пористую зону вокруг полости и оценить параметр проницаемости среды.

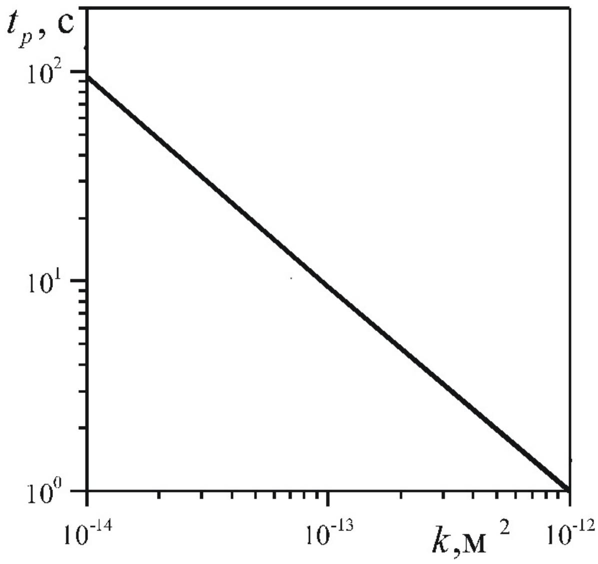

Рисунок 1. Зависимости периода полувосстановления давления внутри полости от параметра проницаемости

Список литературы:

1. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидродинамика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
2. Хусаинов И.Г. Моделирование процесса релаксации давления в скважине после ее опрессовки при наличии плоской или круговой границ // Вестник Башкирского университета. 2020. Т. 25. № 1. С. 4-11.
3. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Хакимова З.Р. Релаксация давления в трубчатом канале, имеющем поврежденный участок, после опрессовки. Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 2. С. 466-473.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнение математической физики. – М.: "Наука", 1972. – 735 с.