

Исследование процесса теплопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа

Ю.О. Бобренёва¹, И.М. Губайдуллин^{1,2}

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Космонавтов 1, Уфа, Россия, 450062

²Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, проспект Октября 141, Уфа, Россия, 450075

Аннотация. Авторы изучают процесс теплопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа. Коллектора такого типа имеют естественную систему разрушения и описываются моделью двойной пористости. Наиболее подробно процесс фильтрации описывают уравнения Уоррена-Рута, где рассматривается перераспределение флюида между матрицей и сетью естественных трещин. Однако, сложное геологическое строение не всегда позволяет определять параметры пласта и пластовое давление при использовании только уравнения по распределению давления. В связи с этим появилась необходимость дополнить систему Уоррена-Рута уравнениями теплопроводности. Использование температуры будет дополнять стандартные подходы, и увеличивать объем информации о резервуаре для получения дополнительных параметров. В данной работе построена численная модель теплопереноса для коллектора трещиновато-порового типа. Для решения дифференциальных уравнений в частных производных используется метод конечных разностей. Аппроксимация задачи проводится по неявной схеме. Нелинейная система разностных уравнений на каждом временном слое решается методом матричной прогонки.

1. Введение

Гидродинамические методы определения параметров пласта и пластового давления для коллекторов трещиновато-порового типа из-за сильной неоднородности существенно отличаются от обычных стандартных методов. Трещиноватые коллектора характеризуются интенсивным обменом жидкости между трещинами и пористыми блоками [1], что вносит определенные коррективы в известные традиционные методы определения фильтрационных параметров.

В настоящее время большое внимание уделяется выбору технологий и совершенствованию разработки коллекторов трещиновато-порового типа на основе математического моделирования [2,3]. Поэтому изучение процессов протекающих в трещиновато-пористых коллекторах является актуальной задачей.

Как правило, у таких коллекторов свойства продуктивного пласта значительно меняются от скважины к скважине [4]. Для выбора эффективной технологии извлечения нефти из данных пластов необходимо изучение процессов тепло- и массопереноса в коллекторах трещиновато-порового типа. В процессе фильтрации в коллекторах данного типа необходимо учитывать обмен флюидов между блоками (в дальнейшем матрица) и сетью естественных трещин. Для исследования системы в работе используется модель Уоррена-Рута [5]. Модель Уоррена-Рута

предполагает, что поровый коллектор представлен одинаковыми прямоугольными параллелепипедами, которые обладают высокой пористостью и низкой проницаемостью. Матрица разделена сетью естественных трещин, которые обладают высокой проницаемостью и низкой пористостью. Также предполагается, что движение жидкости к скважине осуществляется по системе трещин, а матрица непрерывно питает всю сеть естественных трещин. Перераспределение флюида между матрицей и трещинами зависит от формы и размеров блоков матрицы, чем блоки меньше, тем легче осуществляется переток флюида между ними [6]. Для описания механизма фильтрации жидкости в системе «сеть трещин-матрица» используются уравнения пьезопроводности (6-7) [7]. Однако основной проблемой остается сложность строения карбонатных коллекторов, так как наличие таких границ, зачастую, препятствует определению параметров пласта, перекрывая псевдорadiaльный режим течения. Как правило, в таких исследованиях получаем некоторую оценку пластового давления и выявляем только наличие границы, остальные параметры остаются неизвестными. Одним из способов решения данной проблемы может быть введение дополнительных уравнений и соотношений, которые получены из данных распределения температурного фронта в пласте при проведении гидродинамического исследования.

2. Постановка задачи

Рассмотрим постановку задачи для моделирования процесса теплопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа. Вводятся следующие допущения: геометрические размеры блоков, вязкости жидкостей и плотности постоянны, однофазная жидкость, учитываются эффект Джоуля-Томсона, адиабатического расширения, конвективный и кондуктивный механизмы теплопереноса. Предполагается, что течение подчиняется закону Дарси.

$$\frac{\lambda}{c_p} \operatorname{divgrad} T_f = \frac{\partial T_f}{\partial t} + \bar{u}(\operatorname{grad} T_f + \varepsilon_I \operatorname{grad} P) - \varphi \frac{c_p}{c_m} \eta_s \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\lambda}{c_p} \operatorname{divgrad} T_m = \frac{\partial T_m}{\partial t} + \bar{u}(\operatorname{grad} T_m + \varepsilon_I \operatorname{grad} P) - \varphi \frac{c_p}{c_m} \eta_s \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

$$T_f|_{r=0} = T_0 - \Delta T, \quad T_f|_{r=r_e} = T_0, \quad (3)$$

$$T_f|_{t=0} = T_0, \quad T_m|_{t=0} = T_0$$

$$\bar{u} = \frac{c_p}{c_m} v \quad (4)$$

$$v = -\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} P \quad (5)$$

где λ – теплопроводность пористой среды [Вт/м³·К], c_p – теплоемкость жидкости [Дж/м³·К], c_m – теплоемкость пористой среды [Дж/м³·К], T – температура (К), \bar{u} – скорость конвективного переноса тепла в пористой среде [м/с], v – скорость фильтрации [м/с], φ – пористость [%], ε_I – коэффициент Джоуля-Томсона [К/Па], η_s – коэффициент адиабатического расширения [К/Па]. Частная производная давления по времени с учетом законов Дарси и Гука представляет уравнение пьезопроводности. Принимается, что пьезопроводность практически не зависит от температуры в пределах небольших колебаний. В связи с этим, предполагается, что изменения температуры существенно не влияют на распределение давлений в пористой среде, значит, уравнение пьезопроводности (6-7) можно решать независимо от уравнений (1-2). Таким образом, полученное решение задач (6-7) подставим в уравнения (1-2) для определения температурного поля [8].

$$\varphi_f c_{tf} \frac{\partial P_f}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k_f}{\mu} r \frac{\partial P_f}{\partial r} \right) - S \frac{k_m}{\mu} (P_f - P_m) \quad (6)$$

$$\varphi_m c_{tm} \frac{\partial P_m}{\partial t} = S \frac{k_m}{\mu} (P_f - P_m) \quad (7)$$

$$P_f|_{r=0} = P_0 - \Delta P, \quad P_f|_{r=r_e} = P_0, \quad (8)$$

$$P_f|_{t=0} = P_0, \quad P_m|_{t=0} = P_0,$$

$$2\pi h \frac{k_f}{\mu} \left(r \frac{\partial P_f}{\partial r} \right)_{r=r_w} = Q(t);$$

$$S = \frac{4 * n * (n + 2)}{L^2}, \quad (9)$$

$$L = \frac{3 * a * b * c}{a * b + b * c + c * a}, \quad (10)$$

где P – давление [Па], φ_f – пористость сети трещин (д.ед), φ_m – пористость матрицы (д.ед), c_{tf} – сжимаемость сети трещин (1/Па), c_{tm} – сжимаемость матрицы (1/Па), k_f – проницаемость сети трещин (m^2), k_m – проницаемость матрицы (m^2), μ – вязкость нефти (Па•с), P_f – пластовое давление в сети трещин (МПа), P_m – пластовое давление в матрице (МПа), h – эффективная мощность пласта, q – дебит жидкости ($m^3/сут$), $\pi \approx 3,14$, S – коэффициент трещиноватой породы ($1/m^2$), n – число взаимно перпендикулярных групп трещин, L – размер блоков (м), a – длина стороны блока матрицы (м), b – ширина стороны блока матрицы (м), c – высота стороны блока матрицы (м).

Аналитическая модель представленной задачи не учитывает теплопроводность матрицы и системы трещин, в связи с этим возникает необходимость разработки численной модели.

Численное решение задачи (6-7) с учетом граничных условий (8) было получено и проанализировано в работе [7].

Для численного решения нелинейной системы (1-2) применяется метод конечных разностей. Нелинейная система разностных уравнений на каждом временном слое решается методом матричной прогонки [9].

3. Литература

- [1] Денк, С.О. Проблемы трещиноватых продуктивных объектов / С.О. Денк. – Пермь: Электронные издательские системы, 2004. – 334 с.
- [2] Масыгин, В.Ф. Применение разрывного метода галёркина для моделирования температурного поля в вертикальной скважине с трещиной гидроразрыва / Ю.О. Бобренёва, И.М.Губайдуллин, Р.В. Жалнин // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – Т. 63, № 1. – С. 13-16.
- [3] Бобренёва, Ю.О. Моделирование температурных полей в вертикальной скважине с техногенной трещиной с использованием адаптивных сеток / И.М. Губайдуллин, Р.В. Жалнин, В.Ф. Масыгин // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016): труды международной научной конференции, 2016. – С. 454-462.
- [4] Черницкий, А.В. Геологическое моделирование нефтяных залежей массивного типа в карбонатных трещиноватых коллекторах / А.В. Черницкий. – М.: ОАО «РМНТК Нефтеотдача», 2002. – 254 с.
- [5] Голф-Рахт, Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов / Т.Д. Голф-Рахт. – Москва: Издательство «Недра», 1986. – 608 с.
- [6] Баренблатт, Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1984. – 211 с.
- [7] Бобренёва, Ю.О. Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа / Ю.О. Бобренёва, А.А. Мазитов, И.М. Губайдуллин // Сборник трудов ИГНТ-2018. – Самара: Новая техника, 2018. – С. 1775-1780.
- [8] Чекалюк, Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э.Б. Чекалюк. – Москва: Издательство «Недра», 1965. – 240 с.
- [9] Самарский, А.А. Численные методы / А.А.Самарский, А.В. Гулин. – Москва: Издательство «Наука», 1989. – 432 с.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (код проекта 16-29-15116).

Investigation of heat transfer process in the fracture-porous reservoir

Yu.O. Bobreneva¹, I.M. Gubaydullin^{1,2}

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, 450062

²Institute of Petrochemistry and Catalysis of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia, 450075

Abstract. The authors study the process of heat transfer in a fractured-porous reservoir type. A reservoirs of this type has a natural fracture system and is described by a dual porosity model. The process of filtration is described by the Warren-Ruth equations, where fluid redistribution between the matrix and the natural fracture system is considered. However, the complex geological structure does not allow to determine the parameters of the reservoir and reservoir pressure using only the pressure distribution equation. It has become necessary to supplement the Warren-Ruta system with heat conduction equations. The application of temperature will complement the standard approaches, and increase the amount of information about the reservoirs. In this paper, a numerical model of heat transfer is constructed for a fractured-porous reservoir. To solve partial differential equations, the finite difference method is used. The approximation of the problem is carried out in an implicit scheme. The nonlinear system of difference equations at each time layer is solved by the matrix sweep method.