

*М. Н. Петров¹**

Влияние трещиноватости и условий разработки на профиль кажущегося удельного электрического сопротивления в модели нефтенасыщенного трещиновато-пористого коллектора

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: PetrovMN@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Одной из важнейших задач при исследовании нефтенасыщенных коллекторов является определение их фильтрационных свойств. Делать это можно посредством численного моделирования гидродинамических процессов в окрестности скважины. В работе рассматривается модель двойной пористости/проницаемости для нефтенасыщенного трещиновато-пористого коллектора, основанная на подходе Баренблатта, когда и блоки, и трещины представляются как отдельные сплошные среды с собственными значениями пористости и проницаемости, связанные флюидообменом между собой. Приводится анализ влияния трещиновой пористости и сценариев разработки на профиль кажущего удельного электрического сопротивления. Под сценариями разработки предполагаются такие параметры, как минерализация бурового раствора и превышение давления в скважине над пластовым давлением.

Ключевые слова: трещиновато-пористый коллектор, модель двойной пористости/ проницаемости, гидродинамическое моделирование, профиль УЭС

*М. N. Petrov¹**

Effect of fracturing and development conditions on the apparent electrical resistivity profile in the model of an oil-saturated fractured porous reservoir

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: PetrovMN@ipgg.sbras.ru

Abstract. One of the most important tasks in the study of oil-saturated reservoirs is the determination of filtration properties. This can be done through numerical simulation of hydrodynamic processes in the vicinity of the well. Thus, the paper considers a dual porosity/permeability model for an oil-saturated fractured-porous reservoir based on the Barenblatt approach, when both blocks and fractures are presented as separate continuous media with their own porosity and permeability values, connected by fluid exchange with each other. An analysis of the effect of fracture porosity and development scenarios on the apparent electrical resistivity profile is given. Development scenarios include such parameters as drilling fluid salinity and excess pressure in the well over reservoir pressure.

Keywords: Fractured-porous reservoir, dual porosity/permeability model, hydrodynamic modeling, resistivity profile

Введение

Введение в разработку трещиновато-пористых коллекторов приводит к необходимости создания моделей, отражающих структуру таких коллекторов и позволяющих эффективно определять их фильтрационные параметры. Одним из подходов в определении фильтрационных параметров нефтенасыщенных коллекторов является численное моделирование гидродинамических процессов в окрестности скважины, вскрывающей пласт. В данной работе речь идет о трещиновато-пористых коллекторах, которые обладают особенностью, связанной с наличием двух систем (блоков и трещин), участвующих в миграции флюида, характеризующихся собственными значениями пористости и проницаемости. Таким образом, для эффективного описания гидродинамических процессов в таких средах, необходимо рассматривать модели двойной пористости/проницаемости.

Методы и материалы

Общая идея таких моделей заключается в том, что и блоки, и трещины представляются как отдельные системы, связанные между собой флюидообменом. Отличия же моделей заключаются в различной геометрии блочного и трещинного пространства [1-8].

В данной работе представлена модель нефтенасыщенного трещиновато-пористого коллектора, основанная на подходе Баренблатта [1, 2], когда системы блоков и трещин представляют собой две сплошные среды с собственными значениями пористости φ_i и проницаемости k_i . Они связаны обменом флюида через поверхность вещества блоков, определяющимся как поток F , который можно выразить как:

$$F = \rho k_1 (p_1 - p_2) G / \eta, \quad (1)$$

где ρ , η – обозначают плотность, и вязкость флюида, p_i – давление в блоках и трещинах (здесь и далее $i = 1$ – блоки матрицы, $i = 2$ – трещины), k_1 – проницаемость блоков. Параметр G определяет удельную поверхность блоков, однако, как правило, установить точную геометрию блочного пространства довольно затруднительно, но для оценки параметра можно использовать следующую формулу [1-8]:

$$G = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2} \right), \quad (2)$$

где l_i – линейные размеры блоков в соответствующих направлениях.

Решение в такой постановке основной системы уравнений массопереноса, изменения водонасыщенности, солепереноса и т.д. с учетом деформационных процессов, вызванных изменением пластового давления, для сценариев вскрытия и добычи приводились в работах [9-11], где и были показаны поля распреде-

ления давлений, водонасыщенности, минерализации и пр. для систем трещин и блоков.

Как отмечалось выше, одним из способов определения фильтрационных параметров коллектора является моделирование гидродинамических процессов в окрестности скважины. Параметры модели пласта подбираются так, чтобы полученный по ее результатам профиль удельного электрического сопротивления соответствовал практическим данным.

Для построения профиля УЭС в представленной постановке воспользуемся обобщенной формулой Арчи, которая определяется как:

$$\rho = \frac{A}{(\varphi + \varphi_0)^{n_1} (C + C_0)^{n_2} (S_w + S_w^0)^{n_3}}. \quad (3)$$

Здесь A , n_1 , n_2 , n_3 – параметры Арчи, φ – общая пористость коллектора, S_w – общая водонасыщенность коллектора, C – общая минерализация, φ_0 , C_0 , S_w^0 – дополнительные параметры, такие как остаточная водонасыщенность и т.п.

Согласно [2, 3] водонасыщенность для трещиновато-пористого коллектора определяется с учетом вклада каждой системы в общее значение:

$$S_w = \nu S_{2w} + (1 - \nu) S_{1w}, \quad (4)$$

аналогично и для минерализации:

$$C = \nu C_2 + (1 - \nu) C_1, \quad (5)$$

где $\nu = \frac{\varphi_2}{\varphi}$ – доля объёма трещин в общем объёме породы.

Результаты и обсуждение

С учетом всего выше сказанного рассмотрим модель трещиновато-пористого нефтенасыщенного пласта, который вскрывает скважина радиусом $r_0 = 0.1$ м, при этом предполагается, что вскрытие происходит мгновенно и в начальный момент времени обе системы блоков и трещин находились в равновесии:

$$\begin{aligned} p_1(r, 0) &= p_2(r, 0) = p_c, \\ S_{w1}(r, 0) &= S_{w2}(r, 0) = S_{w0}, \\ C_1(r, 0) &= C_2(r, 0) = C^0, \end{aligned} \quad (6)$$

где p_c – пластовое давление, S_{w0} , C^0 – соответственно начальные пластовые значения водонасыщенности и солёности.

В качестве расчетных параметров рассмотрим характерные значения для карбонатных трещиновато-пористых коллекторов из [12], представленные в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные параметры коллектора

Радиус скважины, м	0,1
Превышение давления в скважине над пластовым, атм	1; 5; 10
Соленость бурового раствора, г/л	1; 5; 20
Соленость пластовой воды, г/л	40
Начальная водонасыщенность в пласте, %	25
Проницаемость блоков, мкм ²	0,4
Проницаемость трещин, мкм ²	1,7
Матричная пористость (блоки), %	19
Трещинная пористость, %	0,2; 0,5; 1
Вязкость пластовой нефти, Па·с	0,004
Вязкость воды, Па·с	0,001
Сжимаемость пластовой нефти, 1/Па	$2 \cdot 10^{-9}$
Коэффициент сжимаемости матрицы, 1/Па	$1 \cdot 10^{-10}$
Коэффициент сжимаемости трещин, 1/Па	$2 \cdot 10^{-10}$, $2 \cdot 10^{-9}$

Так же положим, что соответствующие параметры Арчи принимают следующие значения: $A = 1$, $n_1 = 2$, $n_2 = 1$, $n_3 = 2$.

На рис. 1 показан профиль кажущего электрического сопротивления через 24 часа после вскрытия пласта при значениях трещинной пористости $\varphi_2 = 0,1\%$; $0,5\%$; 1% .

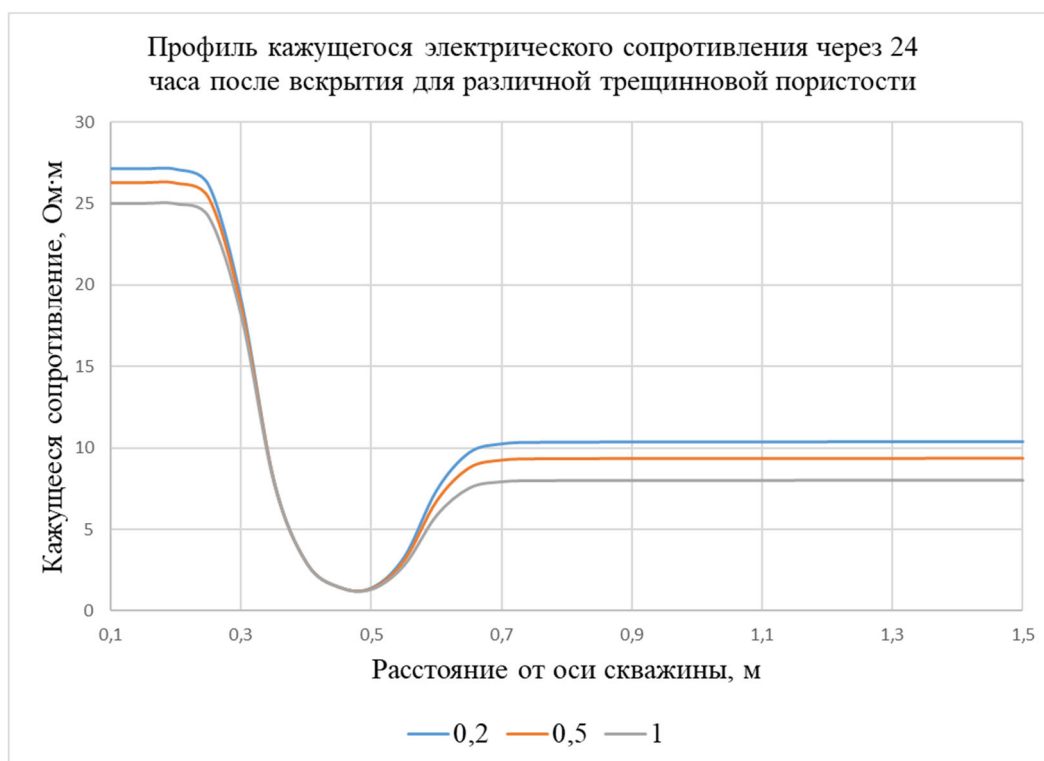


Рис. 2. Профиль кажущегося электрического сопротивления через 24 часа после вскрытия пласта при различных значениях трещинной пористости

Как видно из рисунка, чем больше трещинная пористость, которая характеризуется густотой или раскрытием трещин, тем больше ее вклад в общую пористость коллектора и, соответственно, ниже сопротивления в зоне проникновения и нетронутой части пласта.

Рассмотрим также влияние сценариев разработки на профиль УЭС, а именно минерализации бурового раствора (рис. 2) для соленостей, равных 1, 5 и 20 г/л, и превышение давления на границе скважины над пластовым давлением (рис. 3) 1, 5 и 10 атм.

Как видно из рисунков минерализация бурового раствора влияет лишь на сопротивления в зоне проникновения таким образом, что, чем более соленый раствор используется, тем ниже кажущееся сопротивление. Размер же зоны проникновения и окаймляющей зоны зависят от превышения давления в скважине над пластовым давлением – чем оно больше, тем выше скорость фильтрации и соответственно глубже проникновение за то же время.

В работе предложен способ численного расчета профиля кажущегося удельного электрического сопротивления по результатам гидродинамического моделирования в рамках модели двойной пористости/проницаемости для нефтенасыщенного трещиновато-пористого коллектора. Было показано влияние трещинной пористости, которая характеризует густоту или раскрытие трещин, на результаты расчетов, что отражается в снижении сопротивления за счет увеличения вклада трещинной пористости в общую пористость пласта. Кроме того, были показано влияние сценариев разработки пласта, которые характеризуются

параметрами минерализации используемого бурового раствора и превышением давления в скважине над пластовым. Они, в свою очередь, влияют на характер зоны проникновения.

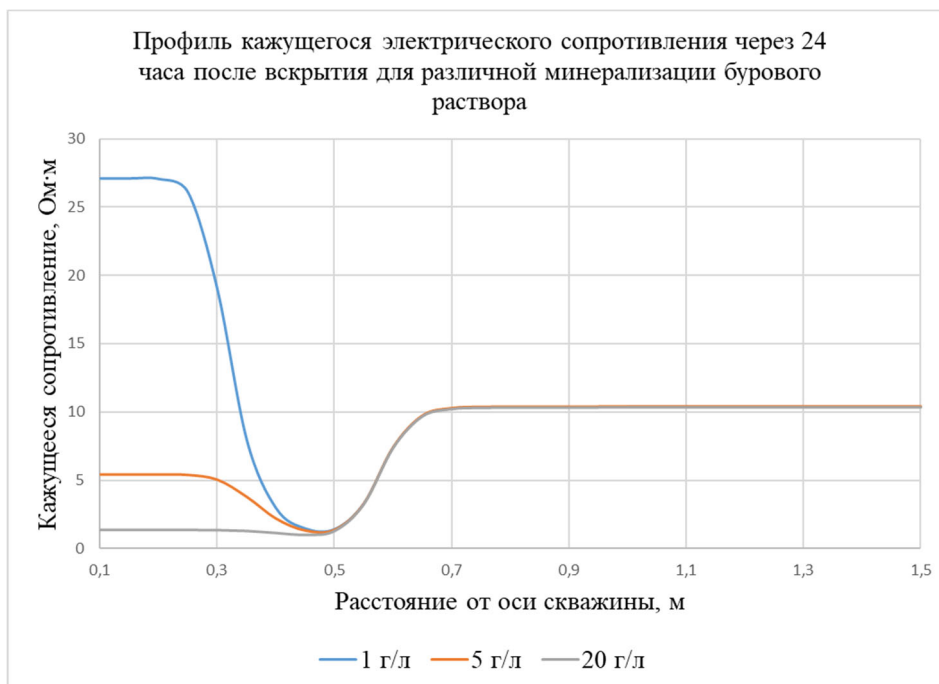


Рис. 3. Профиль кажущегося электрического сопротивления через 24 часа после вскрытия пласта для различной минерализации бурового раствора

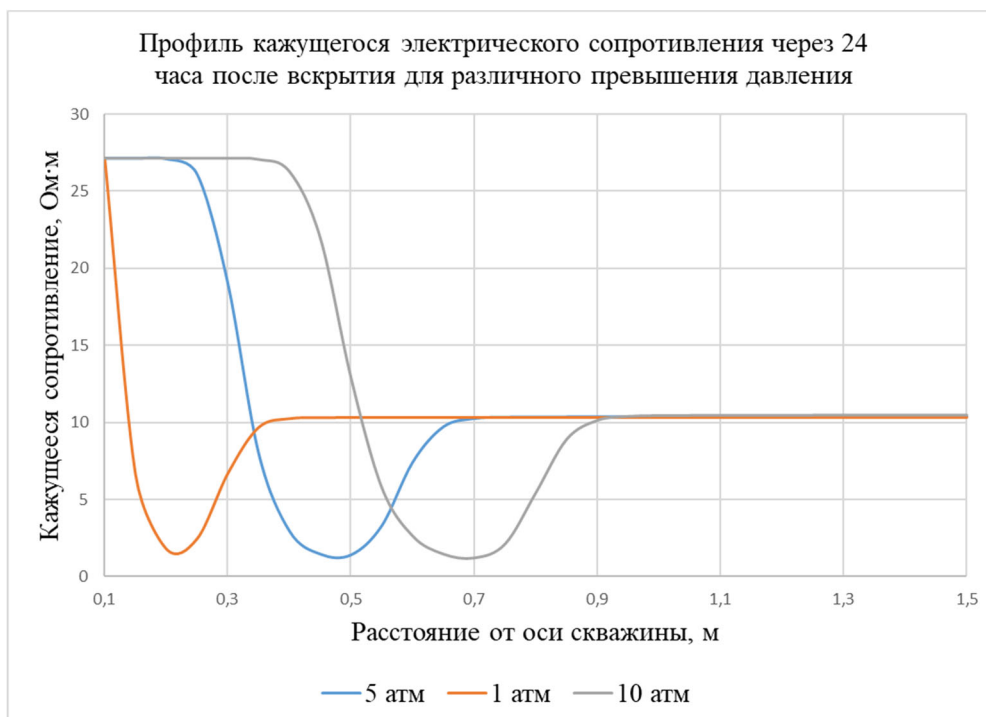


Рис. 4. Профиль кажущегося электрического сопротивления через 24 часа после вскрытия пласта при различных превышениях давления на границе скважины над пластовым давлением

Заключение

Такой подход в дальнейшем позволит подбирать параметры трещиноватых пластов так, чтобы гидродинамическая модель соответствовала результатам интерпретации практических данных измерений реальных коллекторов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0025 «Геоэлектрика многомасштабных гетерогенных геологических сред: модели, программы, технические средства».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // ПММ. – 1960. – Т. 24. – вып.5. – С. 852-864.
2. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
3. Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Губайдуллин И.М. Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа // Сборник трудов IV международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018). – Самара: Новая техника, 2018. – С. 1775-1780.
4. Куштанова Г. Г. Некоторые особенности нестационарной фильтрации в трещиновато-пористых коллекторах // Нефтегазовое дело. – 2007. – №1. – С. 1-9.
5. Черепанов С.С. Комплексное изучение трещиноватости карбонатных залежей методом Уоррена-Рута с использованием данных сейсмофациального анализа (на примере Турне-Фаменской залежи озерного месторождения) // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 6-12.
6. Щипанов А.А. Модель двухфазной фильтрации в деформируемом трещиновато-пористом пласте // Вестник ПНИПУ. – Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2004. – Т. 5. – С. 92-98.
7. Jing Lu, Jinbao Qu. A new dual-permeability model for naturally fractured reservoirs // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 13-16 November, Abu Dhabi, UAE. – 2017. – P. 20. – SPE-188553-MS.
8. Presho M., Wo S., Ginting V. Calibrated dual porosity, dual permeability modeling of fractured reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – № 77. – P. 326–337.
9. Назаров Л.А., Назарова Л.А. Эволюция напряжений и проницаемости трещиновато-пористого породного массива в окрестности добычной скважины // ФТПРПИ. – 2016. – № 3. – С. 11-20.
10. Петров М.Н., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Назарова Л.А. Численное моделирование расходных характеристик добывающей скважины в трещиновато-пористом пласте с учетом деформационных процессов // Каротажник. – 2019. – № 2 (296). – С. 34-44.
11. Петров М.Н., Ельцов И.Н., Нестерова Г.В. Численное моделирование фильтрации в трещиновато-пористом нефтенасыщенном коллекторе вскрытым бурением на репрессии при различных сценариях разработки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: Материалы XVIII международной научной конференции (г. Новосибирск, 18-20 мая 2022 г.): – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2022. – Т. 2. – № 2. – С. 38-44.
12. Некрасов А.С., Костицын В.И. Геолого-геофизические и гидродинамические исследования карбонатных коллекторов нефтяных месторождений // Вестник Пермского Университета. – 2010. – В. 1(9). – С. 14-23.

© М. Н. Петров, 2023