

Н. А. Голиков^{1,2,3}, И. Н. Ельцов^{1,2,4}, Д. М. Евменова¹*

Результаты численного моделирования роста неоднородной глинистой корки

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

³ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

⁴ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Разработана программа моделирования роста глинистой корки с учетом изменения ее фильтрационно-емкостных свойств по толщине. Использование программы при сопоставлении с экспериментальными данными позволяет определять параметры уравнений, описывающих изменение пористости и проницаемости корки в процессе ее роста, вызванное изменением давления на корку.

Ключевые слова: глинистая корка, проницаемость, пористость

N. A. Golikov^{1,2,3}, I. N. Eltsov^{1,2,4}, D. M. Evmenova¹*

Results of numerical modeling of the growth of a heterogeneous mudcake

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

* e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

Abstract Program for modeling the growth of mud cake with taking into account its changes of filtration-capacitive by thickness parameters has been developed, taking into account its changes of filtration-capacitive by thickness. The usage of the program, when compared with experimental data, allows to determine the parameters of the equations describing the change in porosity and permeability of the mud cake during its growth caused by a change in pressure on the cake.

Keywords: mudcake, permeability, porosity

Введение

При бурении скважин в результате взаимодействия бурового раствора с проницаемой породой формируются глинистая корка на стенке скважины и зона кольматации с одновременным проникновением фильтрата бурового раствора в пласт и формированием зоны проникновения. Несмотря на относительно малую

толщину глинистой корки и зоны кольматации, их влияние на формирование зоны проникновения велико из-за низкой проницаемости по сравнению с большинством горных пород. Учет таких параметров глинистой корки как ее толщина, пористость и проницаемость проводится с использованием упрощенной модели однородной по толщине глинистой корки. Это упрощение приводит к искаженной зависимости ее толщины, пористости и проницаемости от времени, но позволяет получить аналитическое решение задачи при некоторых допущениях [1, 4]. Наиболее полно это решение изложено в [1] для случаев линейной и радиальной фильтрации. Зависимость толщины глинистой корки от времени при линейном вытеснении (случай лабораторных экспериментов) описывается следующим уравнением:

$$h(t) = \sqrt{B^2 + 2At} + B - \gamma \quad (1)$$

где $h(t)$ – толщина глинистой корки; t – время, γ – функция смыва глинистой корки потоком бурового раствора, A и B – некоторые коэффициенты, зависящие от свойств бурового раствора, пористости и проницаемости корки, проницаемости породы, зоны кольматации и их размеров.

Исследования показали несоответствие однородной модели (рис. 1) реальным экспериментальным данным [2-4]. Кроме того, недостатком этой модели является возможность неограниченного роста глинистой корки при условии, что напряжение сдвига, вызываемое потоком буровой жидкости, меньше реологической прочности корки.

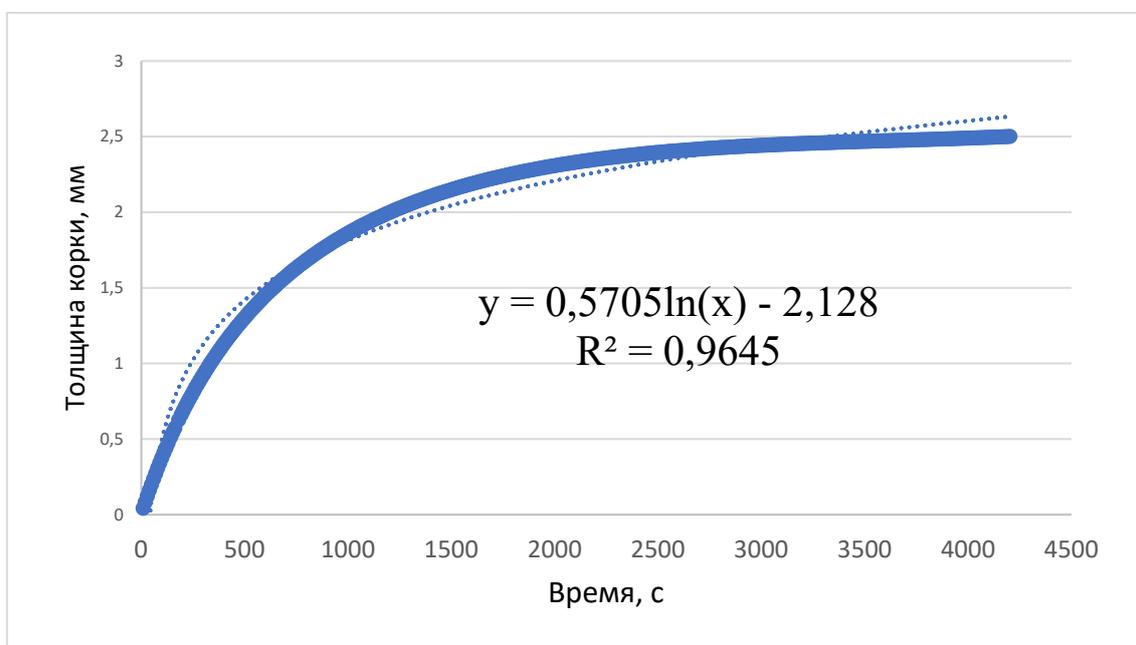


Рис. 1. Зависимость толщины глинистой корки от времени в однородной модели по экспериментальным данным

Постановка задачи

Для решения задачи о расчете роста глинистой корки и построения вычислительной схемы рассмотрим процесс образования корки в лабораторных условиях на образце керна без учета смыва корки (рис. 2).

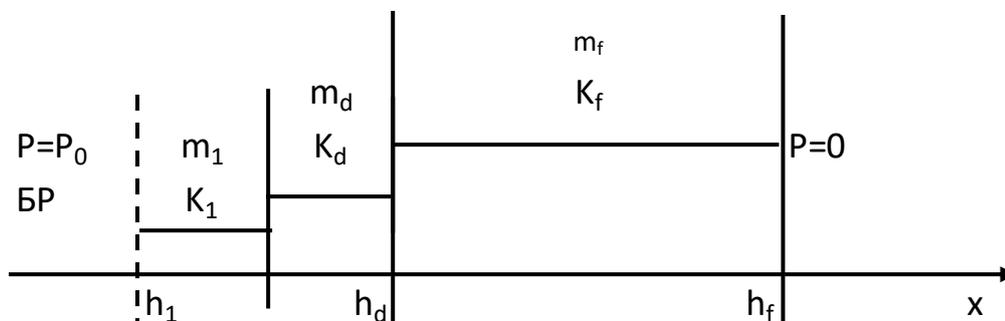


Рис. 2. Схема модельной задачи роста глинистой корки

На одном торце образца циркулирует буровой раствор с объемной плотностью δ под давлением P_0 , на другом торце давление равно нулю. Под действием перепада давления начинается образование зоны кольматации размером h_d и проницаемостью K_d и движение фильтрата бурового раствора вязкостью μ внутри образца керна длиной h_f и проницаемостью K_f . После формирования зоны кольматации начинается рост глинистой корки. Рассмотрим его послойно.

1. На первом шаге за время Δt образуется слой глинистой корки h_1 , толщину которой можно рассчитать, используя уравнение (2). Коэффициенты А и В равны:

$$A_1 = \frac{P_0 K_1 \delta}{\mu(1-\delta)(1-m_1)} \quad (2)$$

$$B_2 = K_1 \left(\frac{h_d}{K_d} + \frac{h_f}{K_f} \right) \quad (3)$$

Проницаемость первого слоя корки K_1 , пористость m_1 . При этом падение давления на каждом участке течения (на корке, в зоне кольматации и образце) равно [1]:

$$P_i = \frac{P_0 \frac{h_i}{K_i}}{\frac{h_1}{K_1} + \frac{h_d}{K_d} + \frac{h_f}{K_f}} \quad (4)$$

где индекс i соответствует участку течения. Первый член ряда соответствует падению давления в корке и, следовательно, сжимающему напряжению, действующему на корку.

2. За следующий интервал времени Δt образуется второй слой корки h_2 с проницаемостью K_2 , пористостью m_2 . Свойства второго слоя отличаются от свойств первого слоя, так как падение на этом слое меньше, чем на первом, и, следовательно, меньше сжимающее напряжение. Толщину корки получаем из уравнения (3), однако коэффициенты A_i и B_i изменятся за счет учета влияния первого слоя корки

$$A_i = \frac{P_0 K_2 \delta}{\mu(1-\delta)(1-m_0)} \quad (5)$$

$$B_i = K_2 \left(\frac{h_1}{K_1} + \frac{h_d}{K_d} + \frac{h_f}{K_f} \right) \quad (6)$$

3. Продолжая рассмотрение, получим итерационный процесс, на каждом шаге которого давление, сжимающее последующий слой корки, уменьшается, следовательно, пористость и проницаемость увеличиваются.

4. Для оценки влияния давления на проницаемость глины можно воспользоваться связью «проницаемость-давление», используемое в механике грунтов

$$K_2 = K_1 / \exp(a\beta \ln P_2 / P_1) \quad (7)$$

где K_1, K_2 – проницаемости, измеренные при давлениях P_1 и P_2 , соответственно, a и β - коэффициент уплотнения грунта и показатель интенсивности снижения проницаемости при уплотнении [5].

Результаты расчетов

Для оценки влияния неоднородности свойств глинистой корки на скорость ее роста проведены сравнительные расчеты для однородной и неоднородной моделей. Расчеты проводились для реального образца и бурового раствора со следующими свойствами: плотность бурового раствора $\delta = 0.06$, давление $P_0 = 1.35$ атм, вязкость $\mu = 1$ сПз. Длина образца 3.96 см, проницаемость $K_f = 25$ мД, проницаемость кольматированного образца $K_c = 12$. Пористость первого слоя корки $m_1 = 0.3$, проницаемость $K_1 = 0.03$ мД. Коэффициент уплотнения грунта $a = 0.1$, показатель интенсивности снижения проницаемости при уплотнении $\beta = 5.7803$ согласно рекомендациям [5]. На этом этапе учитывалось только неоднородность проницаемости. Результаты расчетов приведены на рис. 3-5.

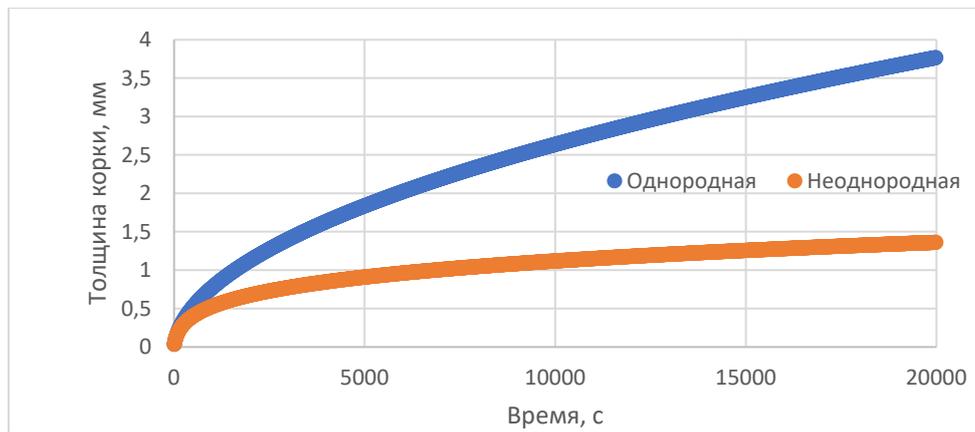


Рис. 3. Зависимость толщины глинистой корки от времени для однородной и неоднородной моделей

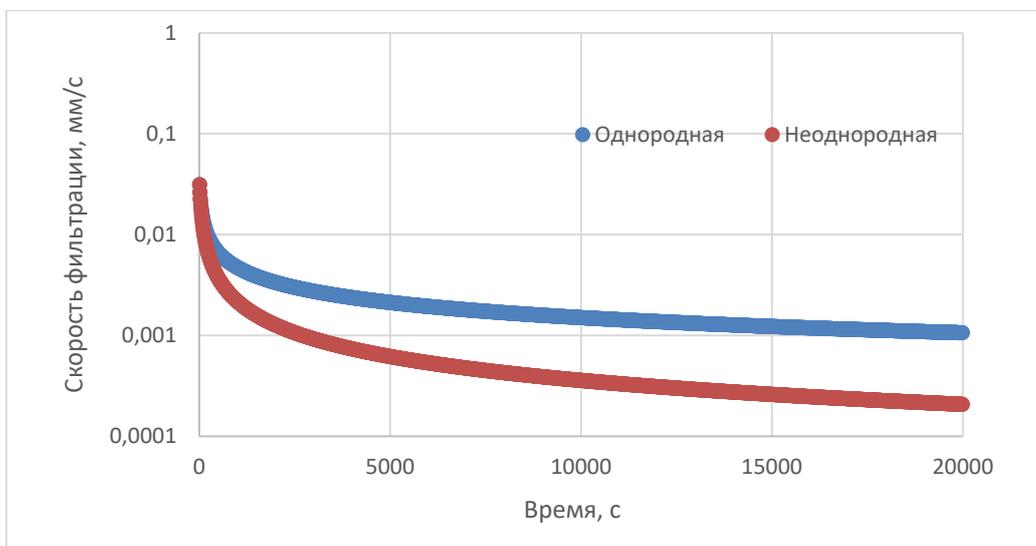


Рис. 4. Зависимость скорости движения фильтрата бурового раствора в образце от времени для однородной и неоднородной моделей

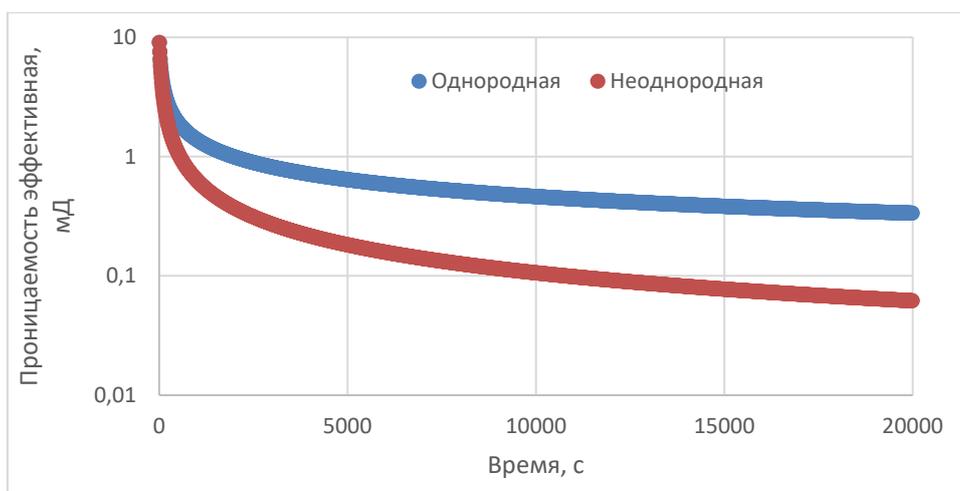


Рис. 5. Изменение эффективной проницаемости системы «глинистая корка-образец» во процессе эксперимента

Обсуждение

Результаты расчетов показывают, что неоднородность свойств глинистой корки по толщине влияет на ее итоговые фильтрационно-емкостные свойства и их изменение в процессе эксперимента.

На рис. 3 приведены результаты расчетов роста глинистой корки для случаев однородности и неоднородности свойств глинистой корки по толщине. Из сравнения результатов следует, что для неоднородного случая, рост толщины глинистой корки происходит в 2.4 раза медленнее однородного случая. Соответственно уменьшается скорость движения фильтрата бурового раствора (рис. 4) и, следовательно, скорость образования зоны проникновения.

Эффективная проницаемость системы «глинистая корка-образец» также уменьшается со временем быстрее, причем к 20000 секунде различие достигает 500%

Заключение

При линейной фильтрации в образце конечного размера задача о росте однородной глинистой корки имеет аналитическое решение. На основе этого решения составлена вычислительная схема и разработана программа моделирования роста глинистой корки с учетом неоднородности ее фильтрационно-емкостных свойств по толщине. Аналитическое решение используется на каждом шаге вычисления толщины глинистой корки. Данные, полученные на предыдущих шагах, используются для учета изменения проницаемости корки на основе уравнений, используемых в механике грунтов. Результаты расчетов подтверждают влияние неоднородности свойств глинистой корки по толщине на эффективную проницаемость системы «глинистая корка-образец», скорость движения фильтрата бурового раствора и скорость роста глинистой корки. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными позволит определить коэффициенты, входящие в уравнения связи «проницаемость-давление» и использовать их при моделировании формирования зоны проникновения в скважине.

Закон роста глинистой корки с допущением об ее однородности используется при интерпретации данных ГИС, и, соответственно, вносит погрешность в результаты интерпретации. В дальнейшем планируется использование модели неоднородной корки для интерпретации данных ГИС с учетом гидродинамических и геомеханических параметров.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта FWZZ-2022-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бочаров О. Б., Кушнир Д.Ю., Аналитическое решение задачи о росте глинистой корки на стенке скважины с учетом смыва // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2012. – т. 15. – №1. – С.14–21.
2. Евменова Д.М., Голиков Н.А., Юркевич Н.В., Ельцов И.Н. Экспериментальное исследование глинистой корки в условиях циркуляции бурового раствора // Каротажник. – 2021. – т. 3 – № 309. – С.100-108.

3. Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А. Моделирование зоны проникновения при использовании буровых растворов на водной и нефтяной основе // ПМТФ. – 2012. – Т. 53. – № 4. – С. 97-104.
4. A. Jaffal, C.S. El Mohtar, K.E. Gray. Modeling of filtration and mudcake buildup: An experimental investigation // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – т 38. – Р. 1-11.
5. П 12-83. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. – Ленинград: ВНИИГ, 1983. – 64 с.

© Н. А. Голиков, И. Н. Ельцов, Д. М. Евменова, 2023