



УДК 622.24.063, 622.244.5

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАКОНОВ ФИЛЬТРАЦИИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОНИКНОВЕНИЯ ФИЛЬТРАТА В ПЛАСТ

### PROSPECTS OF APPLYING NON-LINEAR FILTERING LAWS TO SIMULATE THE PENETRATION OF FILTRATION OF FILTRATION INTO THE RESERVOIR

**Никитин Василий Игоревич**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры бурение нефтяных и газовых скважин,  
Самарский государственный технический университет  
nikitin@list.ru

**Коновалова Анастасия Евгеньевна**

студент  
кафедры бурение нефтяных и газовых скважин,  
Самарский государственный технический университет  
a.e.konovalova17@gmail.com

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются законы фильтрации, которые применяются для моделирования проникновения фильтрата в пласт. В зависимости от месторождения нефть может иметь различные свойства, использование подходящего закона фильтрации является актуальной задачей. При моделировании можно рассчитать насыщенность и глубину проникновения фильтрата в пласт. Имея эти данные можно оптимизировать процесс вскрытия продуктивного пласта. Наиболее подходящими для моделирования проникновения фильтрата в пласт с высоковязкой нефтью являются нелинейные законы фильтрации.

**Ключевые слова:** буровые промывочные жидкости, буровой раствор, вскрытие продуктивных пластов, проникновение фильтрата, математическое моделирование.

**Nikitin Vasilii Igorevich**

Ph. D., Associate Professor,  
Department Drilling Oil and Gas Wells,  
Samara State Technical University  
nikitin@list.ru

**Konovalova Anastasia Evgenevna**

Student,  
Department Drilling of Oil and Gas Wells,  
Samara State Technical University  
a.e.konovalova17@gmail.com

**Annotation.** This article examines the filtering laws that are used to simulate the penetration of filtration into the reservoir. Depending on the field, oil may have different properties, the use of a suitable filtration law is an urgent task. In modeling, you can calculate the depth of penetration of the filter into the reservoir and thus improve the quality of filtration. Non-linear filtration laws are the most appropriate for modeling the penetration of a filter into a layer of high viscosity oil.

**Keywords:** drilling fluid, mud, rheological models, drilling in, filtrate ingress, mathematical modeling.

Проникновение фильтрата буровых промывочных жидкостей в продуктивный пласт изменяет его фильтрационные характеристики. В поровом пространстве пласта возникает физико-химическое взаимодействие фильтрата и нефти, что может значительно сказываться на дальнейшей добыче. В то время как фильтрат промывочной жидкости представляет собой ньютоновскую среду, то в зависимости от месторождения нефти, реологические характеристики могут иметь различные свойства. Известны работы по математическому моделированию проникновения фильтрата в пласт, использующие двухфазный закон фильтрации ньютоновских сред [3].

На месторождениях высоковязкой нефти при моделировании проникновения фильтрата в пласт необходимо учитывать возможность проявления у нефти неньютоновских свойств. Одной из главных составляющих моделирования является применение законов фильтрации, благодаря которым удается рассчитать насыщенность призабойной зоны пласта фильтратом и глубину его проникновения [2]. На основании данных расчетов возможно оптимизировать процесс бурения с использованием наиболее подходящей жидкости вскрытия пласта, что способствует сохранению коллекторских свойства. Выбор промывочной жидкости с учётом свойств пласта и пластового флюида является актуальной задачей, которую, в том числе, возможно решать с использованием методов математического моделирования.

Существует несколько подходов к моделированию процессов фильтрации, традиционно нефть рассматривается, как ньютоновская жидкость. Двухфазные законы фильтрации выводятся из законов однофазной фильтрации, соответствующим взаимодействующим жидкостям. При этом ньютоновские среды характеризуются постоянной вязкостью и подчиняются линейному закону Дарси. Закон фильтрации Дарси устанавливает линейную зависимость между объемным расходом несжимаемой жидкости и потерей напора, приходящейся на единицу длины, и имеет вид:



$$Q = k F \frac{\Delta P}{\mu L}, \tag{1}$$

где  $Q$  – объёмный расход жидкости,  $k$  – проницаемость породы,  $F$  – площадь фильтрации,  $L$  – длина фильтрационного участка  $\Delta P$  – перепад давлений,  $\mu$  – динамическая вязкость ньютоновской среды.

При взаимодействии фильтрата с высоковязкой нефтью, закон фильтрации (1) применим только для описания движения фильтрата, но не подходит для описания движения нефтяной фазы, так как не учитывает некоторые важные характеристики. Модель ньютоновской жидкости позволяет учесть только динамическую вязкость. Но на некоторых месторождениях установлены нарушения линейной связи между напряжением сдвига и скоростью сдвига, такими свойствами обладает вязкопластичная жидкость, внутри которой образуется структура и при её разрушении увеличивается напряжение [5]. Поэтому одной динамической вязкости недостаточно, для моделирования проникновения фильтрата в пласт.

Для неньютоновских жидкостей, в том характерно, следующее:

- не подчиняются закону вязкого трения Ньютона
- течение некоторых из них характеризуется критическим напряжением сдвига, и критическим градиентом давления
- эти жидкости обладают переменной вязкостью, которая зависит от условий течения и называется эффективной при течении таких жидкостей в пористой среде нарушается линейный закон фильтрации Дарси.

Проявление этих свойств описывается реологической моделью Бингама и Шведова [4, 6], имеющей вид:

$$\tau = \tau_d + \eta \dot{\gamma} \tag{2}$$

где  $\tau_d$  – динамическое напряжение сдвига,  $\eta$  – пластическая вязкость,  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига.

Скорость сдвига – величина характеризующая, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении, перпендикулярном направлению движения слоев, и соответствует градиенту скорости в соответствующем направлении. Так как одним из свойств вязкопластичных жидкостей является наличие начального нелинейного участка, следовательно, присутствует динамическое напряжение сдвига, поэтому уравнение 2 позволяет более точно определить характеристики течения неньютоновской нефти.

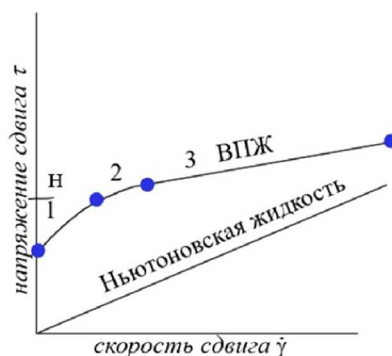


Рисунок 1 – График зависимости напряжения сдвига от скорости

Важной особенностью фильтрации нефти, как вязкопластичной жидкости, является переменная вязкость, которая, в свою очередь, зависит от напряжения сдвига. На рисунке 1 представлен график, на котором видны характерные отличия ньютоновской жидкости и вязкопластичной. У первой жидкости вязкость не изменяется, а также отсутствует начальное напряжение сдвига. На графике вязкопластичной жидкости выделяют три участка: 1 – движение жидкости с наибольшей вязкостью и маленькой скоростью; 2 – движение с переменной вязкостью, при росте скорости сдвига; 3 – движение с наименьшей вязкостью, характер течения подобен движению ньютоновской жидкости.

Так как высоковязкие нефти не подчиняются линейному закону фильтрации, в этом случае необходимо применять нелинейный закон фильтрации для вязкопластичных жидкостей. Известно несколько законов фильтрации, с использованием которых моделируют движение высоковязкой нефти в поровом пространстве пласта [1, 4]. Следует отметить, что при моделировании фильтрации неньютоновских сред зависимость напряжений сдвига от скорости сдвига заменяют на зависимость скорости фильтрации от градиента давлений. Математическая запись нелинейного закона фильтра-



ции зависит от способа упрощения нелинейных участков, графика движения вязко-пластичной жидкости рисунка 1. Известны следующие законы фильтрации:

– Закон фильтрации с начальным статическим градиентом давления,  $\gamma$ . В этом случае считается, что движение происходит только в областях, где градиент давления превышает  $\gamma$ . Этот закон идеализирует течение нефти в пластовых условиях. При уменьшении перепада давления в пористой породе рассматривается постепенное закупоривание от мелких капилляров до крупных каналов. График представлен на рисунке 2 синего цвета.

$$|v| = \begin{cases} \frac{k}{\mu} \left(1 - \frac{H\mu}{|\nabla P|}\right) \cdot \nabla P & \text{при } |\nabla P| \geq \gamma \\ 0 & \text{при } |\nabla P| \leq \gamma \end{cases} \quad (3)$$

– Полигональный закон. В данном законе начальный участок аппроксимируется двумя прямолинейными отрезками, граница между которыми характеризуется величиной  $H$ .  $H$  – градиент динамического давления сдвига. График представлен на рисунке 2 зеленого цвета.  $\mu_m$  – вязкость при разрушении структуры.

$$|v| = \begin{cases} \frac{k}{\mu_m} \left(1 - \frac{H\mu}{|\nabla P|}\right) \cdot \nabla P & \text{при } |\nabla P| \geq H \\ \frac{k}{\mu_0} & \text{при } |\nabla P| \leq H \end{cases} \quad (4)$$

– Гиперболический закон. Начальный участок реологической кривой аппроксимируется гиперболой, асимптотой которой будет прямая пересекающая ось в точке  $H$ . График представлен на рисунке 2 красного цвета.

$$|v| = \frac{k}{\mu_m} \cdot \frac{|\nabla P|}{H + \sqrt{H^2 + (\nabla P)^2}} \cdot |\nabla P| \quad (5)$$

– Криволинейный закон. Начало кривой аппроксимируется гиперболой и отрезком прямой линии, граница между ними определяется величиной  $H$ . График представлен на рисунке 2 желтого цвета.

$$|v| = \begin{cases} \frac{k}{\mu_m} \left(1 - \frac{H\mu}{|\nabla P|}\right) \cdot \nabla P & \text{при } |\nabla P| \geq H \\ \frac{k}{\mu_0} \cdot \frac{|\nabla P|}{H + \sqrt{H^2 + (\nabla P)^2}} & \text{при } |\nabla P| \leq H \end{cases} \quad (6)$$

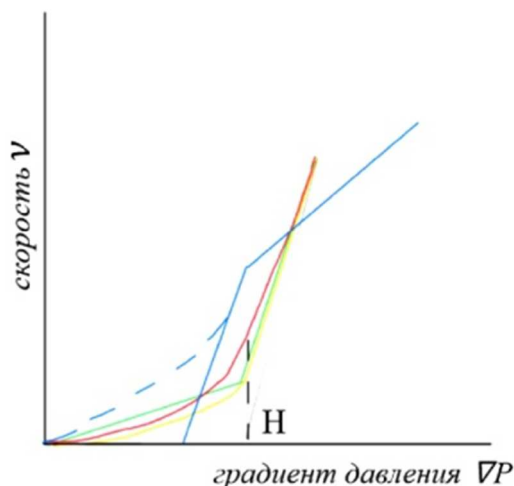


Рисунок 2 – График зависимости скорости сдвига от градиента давления

Применение формул нелинейной фильтрации при моделировании проникновения фильтрата в пласт позволяет учесть большее количество свойств веществ, входящих в состав нефти. При взаимодействии фильтрата с высоковязкой нефтью физико-химическое взаимодействие будет отличаться от случая фильтрации с ньютоновской нефти. Учёт новых параметров при моделировании процесса вскрытия продуктивного пласта может способствовать повышению качества фильтрации нефти. На основании нелинейных законов фильтрации для нефти (3)–(6) и закона Дарси для фильтрата (1) могут быть выведены законы двухфазных фильтрации, по которым можно вычислить насыщенность и глубину проникновения фильтрата в пласт с учётом неньютоновских свойств пластового флюида. Результаты моделирования могут использоваться для выбора подходящей рецептуры промывочной жидкости на месторождениях с высоковязкой нефтью.

**Литература:**

1. Динамика неустойчивых процессов заводнения нефтяных пластов и фильтрация при наличии трещин в поровом объеме: моногр. / В. И. Астафьев [и др.] // Самар.гос.техн.ун-т. – Самара : Изд-во СНЦ, 2019. – 191 с.
2. Никитин В.И., Цивинский Д.Н. Определение насыщенности фильтратом буровой промывочной жидкости при-забойной зоны пласта расчетным путем // Нефть Газ Новации, 2021. – № 1. – С. 37–39.
3. Никитин В.И., Камаев Д.Р. Моделирование относительных фазовых проницаемостей фильтрата буровой промывочной жидкости и нефти // Нефть Газ Новации, 2020. – № 6. – С. 46–48.
4. Ольховская В.А. Подземная гидромеханика. Фильтрация неньютоновской нефти: Учеб. пособ. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 2011. – 224 с.
5. Савенок О.В., Ладенко А.А. Разработка нефтяных и газовых месторождений: учеб. пособ. – Краснодар : Изд. ФГБОУ «КубГТУ», 2019. – 275 с.
6. Цивинский Д.Н. Расчет динамики течения жидкости и гидравлического сопротивления при проведении спускоподъемных операций в скважине: учеб. пособие // Самар.гос.техн.ун-т, бурение нефтяных и газовых скважин. – Самара, 2015. – 216 с.

**References:**

1. Dynamics of unstable processes of oil reservoir flooding and filtration in the presence of cracks in the pore volume: monograph / V.I. Astaf'ev [et al.] // Samara State Technical University. – Samara : Publishing house SSC, 2019. – 191 p.
2. Nikitin V.I., Tsvinskii D.N. Determination of the saturation of the drilling flushing fluid filtrate in the near-bottom zone of the formation by calculation // Oil Gas Novations, 2021. – № 1. – P. 37–39.
3. Nikitin V.I., Kamaev D.R. Modeling of Relative Phase Permeability of Drilling Wash Fluid and Oil Filtrate // Oil Gas Novations, 2020. – № 6. – P. 46–48.
4. Olkhovskaya V.A. Underground Hydromechanics. Filtration of non-Newtonian oil: Textbook. – M. : JSC VNIIOENG, 2011. – 224 p.
5. Savenok O.V., Ladenko A.A. Development of oil and gas fields: manual. – Krasnodar : Publishing house. FSBEU «KubGTU», 2019. – 275 p.
6. Tsvinsky D.N. Calculation of fluid flow dynamics and hydraulic resistance during round-trip operations in the well: tutorial // Samara State Technical University, Drilling of oil and gas wells. – Samara, 2015. – 216 p.