

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.184-192>

EDN WBAWDR

УДК 622.276.031:53

## **О неньютоновских свойствах полимерных растворов при фильтрации через пористую среду**

*Насыбуллин А.В., Хаярова Д.Р.*

*ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт»,*

*Альметьевск, Россия*

## **On non-newtonian properties of polymer solutions during filtra- tion through a porous medium**

*A.V. Nasybullin, D.R. Khayarova*

*Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia*

**E-mail: [arsval@bk.ru](mailto:arsval@bk.ru)**

**Аннотация.** Построение достоверных гидродинамических моделей является важным этапом при разработке нефтяных месторождений. Эти модели основываются на математических моделях фильтрации жидкостей и газа, которые стремятся максимально точно описать свойства реальных систем нефтедобычи.

Процессы разработки нефтегазовых месторождений неразрывно связаны с движением многофазных многокомпонентных сред. Такие системы характеризуются неравновесными и нелинейными реологическими свойствами, что осложняет их моделирование.

Оценка опыта исследования нелинейных эффектов фильтрации полимерных растворов в пористых средах показала, что было выполнено недостаточное количество исследований в присутствии остаточной нефти. Это может говорить о необходимости дальнейших исследований в данных областях и расширении базы знаний.

**Ключевые слова:** *относительные фазовые проницаемости, лабораторные исследования, нелинейные эффекты фильтрации, скорость фильтрации, градиент давления*

**Для цитирования:** Насыбуллин А.В., Хаярова Д.Р. О неньютоновских свойствах полимерных растворов при фильтрации через пористую среду // Нефтяная провинция.-2024.-№1(37).-С. 184-192. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.184-192>. - EDN WBAWDR

**Abstract.** The construction of reliable hydrodynamic models is an important step in the development of oil fields. These models are based on mathematical models of liquid and gas filtration, which strive to describe the properties of real oil production systems as accurately as possible.

The development processes of oil and gas fields are inextricably linked with the movement of multiphase multicomponent media. Such systems are characterized by nonequilibrium and nonlinear rheological properties, which complicates their modeling.

An assessment of the experience in studying the nonlinear effects of filtration of polymer solutions in porous media showed that an insufficient number of studies have been performed in the presence of residual oil. This may indicate the need for further research in these areas and expansion of the knowledge base.

**Key words:** *relative phase permeabilities, laboratory studies, nonlinear filtration effects, filtration rate, pressure gradient*

**For citation:** A.V. Nasybullin, D.R. Khayarova O nen'yutonovskikh svoystvakh polimernykh rastvorov pri fil'tratsii cherez poristuyu sredu [On non-newtonian properties of polymer solutions during filtration through a porous medium]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(37), 2024. pp. 184-192. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.184-192>. EDN WBAWDR (in Russian)

Реальное поведение пластовых систем определяется сложностью реологии движущихся жидкостей и морфологического строения пористой среды, а также многообразием процессов взаимодействия между жидкостью и пористой средой [1]. Учет этих факторов приводит к дополнению физического содержания моделей фильтрации за счет нелинейности, неравновесности и неоднородности, присущих реальным системам, что позволяет совершенствовать методы управления процессами разработки месторождений.

Значительное число работ посвящено изучению основного линейного закона фильтрации и исследованию границ его применимости. В последнее время встает вопрос о выборе способа разработки низкопроницаемой части месторождения, где содержатся более половины извлекаемых запасов. При этом нет однозначного ответа, какой закон фильтрации использовать при прогнозе технико-экономических показателей разработки низкопроницаемых зон [2].

Авторами работы [3] был проведен комплекс лабораторных исследований нелинейных эффектов при фильтрации воды и нефти в низкопроницаемой пористой среде в пластовых условиях продуктивных отложений Приобского месторождения. В исследованиях использованы изовязкозная модель пластовой нефти вязкостью 1,59 мПа·с и модель пластовой воды с минерализацией 15 г/л и вязкостью 0,37 мПа·с при пластовой температуре 89°С. Остаточную нефтенасыщенность определяли по стандартной методике, описанной в [4]. Методика заключалась в определении градиента давления  $\text{grad } P$  при различных задаваемых значениях расхода жидкости  $Q$  в диапазоне от 0,01 до 0,0001 см<sup>3</sup>/мин. Фильтрация продолжалась до достижения установившегося состояния.

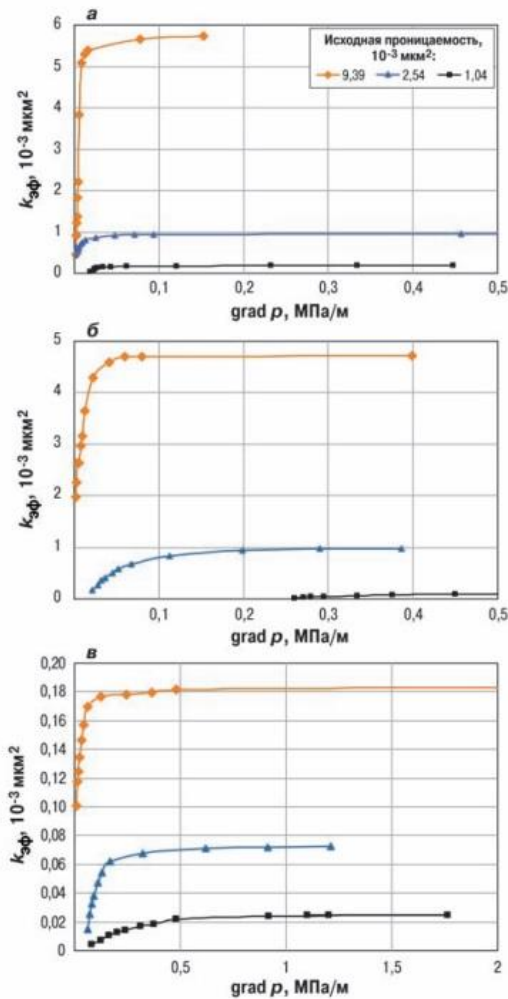
Для условий низкопроницаемой пористой среды проницаемостью 0,001 мкм<sup>2</sup> были проведены исследования по определению зависимостей фазовых проницаемостей для нефти и воды при их совместной фильтрации от водонасыщенности при изменении расхода на каждом режиме. Исследования [4] выполнялись в соответствии с ОСТ 39-235-89. Эксперименты проводились на фильтрационной установке УИК-5(2) («Гло-Бел Нефтесервис», Москва) с соблюдением термобарических условий (пластовое давление  $P_{пл} = 25$  МПа, температура  $T = 89$  °С). Рассчитана эффективная проницаемость для каждой пары экспериментальных значений скорости фильтрации и градиента давления:

$$k_{эф} = v \cdot \mu / \text{grad } P, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость фильтрации, м/с;

$\mu$  – вязкость флюида, Па·с.

В результате было выявлено, что фильтрация флюидов (нефти или воды) в низкопроницаемом коллекторе в ряде случаев не подчиняется линейному закону фильтрации Дарси. Наиболее наглядно это отражено на зависимости эффективной проницаемости  $k_{эф}$  от градиента давления  $\text{grad } P$  (Рис. 1).



**Рис. 1. Зависимость эффективной проницаемости  $k_{эф}$  при фильтрации воды в условиях 100%-ной водонасыщенности (а), при фильтрации нефти в условиях остаточной водонасыщенности (б), при фильтрации воды в условиях остаточной нефтенасыщенности (в)**

В зоне низких расходов проницаемость пористых сред уменьшается неравномерно: чем ниже проницаемость, тем сильнее снижение и тем больше значение критического перепада давления (точка перегиба), при котором это падение начинается. Авторы пришли к выводу, что фильтрация в низкопроницаемых коллекторах характеризуется отклонением от линейного закона фильтрации Дарси, также с уменьшением проницаемости коллектора величина отклонения закона фильтрации от линейного становится более значительной.

В.А. Байковым и Р.Р. Галеевым [5] были проведены три типа экспериментов по однофазной фильтрации: 1) фильтрация воды в полностью водонасыщенном керне, т.е. данный эксперимент выполнялся с ньютоновской жидкостью; 2) фильтрация воды в присутствии остаточной нефтенасыщенности; 3) фильтрация нефти в присутствии остаточной водонасыщенности. Авторами замечено, что при фильтрации воды с остаточной нефтью и нефти с остаточной водой эффекты нелинейной фильтрации более выражены по сравнению с эффектами при экспериментах по фильтрации воды в образцах со 100%-ной водонасыщенностью, причем значения эффективных градиентов на порядок выше. При абсолютных проницаемостях более  $0,01 \text{ мкм}^2$  нелинейными эффектами можно пренебречь.

Согласно А.Х. Мирзаджанзаде [6], основные особенности движения неньютоновской жидкости характеризуются законом фильтрации с предельным градиентом давления, или обобщенным законом Дарси.

С другой стороны, авторы работы [7], оспаривая существенное влияние на характер фильтрации тонких пропластков различной проницаемости, основной причиной изменения параметров пласта при разных режимах работы скважин считают тот факт, что определенная часть поровых каналов всегда занята неподвижной жидкостью, причем вне зависимости от величины создаваемых градиентов давления. В работе [7] исследования проводились на искусственно цементированных образцах песчаника различной проницаемости. Результаты показали, что проницаемость пласта зависит от градиента давления. Практически эта зависимость наблюдается на образцах проницаемостью  $0,1 - 1,5 \text{ Д}$  до значений давления около  $0,03 \text{ кгс/см}^2$ . Дальнейшее увеличение градиента давления не приводит к изменению проницаемости. На основании проведенных экспериментальных исследований, Коробов К.Я., Антипин Ю.В. утверждают, что при фильтрации жидкости проницаемость образцов никогда не достигает его воздухопроницаемости при любых градиентах давления, а для образцов

песчаника с проницаемостью выше 2 Д проницаемость практически не зависит от градиента давления. Полученные результаты свидетельствуют о границах проницаемости и нарушениях линейного закона фильтрации в области низких градиентов давления.

В работе [8] проанализирована зависимость скорости фильтрации от градиента давления нелинейной вязкопластичной жидкости. Был сделан следующий вывод: существует некоторое значение - предельный градиент давления, при котором происходит изменение законов фильтрации жидкости. Этот предельный градиент зависит от свойств фильтрующейся жидкости. Неньютоновское поведение нефти, в основном, связано с повышенным содержанием в ней высокомолекулярных компонентов - асфальтенов, смол и парафинов.

Шишминой Л.В. в работе [9] из представленных математических выкладок основных процессов, происходящих в процессе фильтрации флюида в скважине, сделан вывод о том, что в случае с неньютоновскими жидкостями описание движения потока в скважине многократно усложняется. Для того, чтобы минимизировать риск ошибки, а также получить максимальную эффективность в работе как отдельной скважины, так и целого месторождения, требуется провести множество исследований и быть готовым к возможным исключениям, которые являются повсеместными для каждого отдельного участка эксплуатации.

Кутыревым Е.Ф., Кочетовым А.В. и др. [10] был проведен анализ современных позиций по вопросам фильтрации неньютоновской нефти в пористых средах. Из работы следует тот факт, что неньютоновская нефть проявляет структурные свойства (то есть образует своего рода пространственную сетку из десольватированных мицелл асфальтенов) в диапазоне высоких градиентов давлений.

Изучению нарушения закона Дарси при малых скоростях фильтрации посвящено значительное число работ. Одной из причин нарушения

линейного закона Дарси могут служить аномальные свойства нефти, характерные для неньютоновских жидкостей.

Исследования в данной области рекомендуется направить на проведение фильтрационных исследований на физических насыпных моделях пластовой системы, а также керновом материале, с целью определения условий возникновения потери устойчивости стационарного режима фильтрации.

### Список литературы

1. Булгакова, Г.Т. Неравновесные и нелинейные эффекты в процессах двухфазной фильтрации // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Уфа, 2000. – 33 с.
2. Дударева О.В. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах // Материалы II Международной научно-практической конференции. Стерлитамак, 2015. С. 21-24.
3. Байков В.А., Колонских А.В. и др. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Лабораторные фильтрационные исследования керна Приобского месторождения // Вестник ОАО НК «Роснефть». 2013. Выпуск 31. №2. С. 4–7.
4. ОСТ-39-195-86 Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях
5. Байков В.А., Галеев Р.Р., Колонских А.В. и др. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Анализ и интерпретация результатов лабораторных исследований керна Приобского месторождения // Вестник ОАО НК «Роснефть». 2013. Выпуск 31. №2. С. 8–12.
6. Мирзаджанзаде А.Х. Вопросы гидродинамики вязкопластичных и вязких жидкостей в применении к нефтедобыче / А. Х. Мирзаджанзаде, проф. д-р техн. наук. - Баку: Азнефтеиздат, 1959. - 409 с.
7. Коробов К.Я., Антипин Ю.В. О нарушении линейного закона фильтрации при низких градиентах давления // Нефтяное хозяйство. – 1968. – № 8. – С. 26-28.
8. Шевченко, О.Н. Определение значений критических градиентов давления и скорости фильтрации неньютоновской жидкости / О. Н. Шевченко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 3-2(45). – С. 120-124.
9. Шишмина, Л.В. Реологические модели фильтрации неньютоновских жидкостей в коллекторском пространстве / Л.В. Шишмина, В. Ю. Гришаев // Инновационное развитие науки и образования: сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 марта 2019 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 12-16.
10. О характере течения неньютоновской жидкости в пористой среде / Е.Ф. Кутырев, А.В. Кочетов, С.В. Козаков, А.Р. Сайфутдинов // Георесурсы. – 2008. – № 5(28). – С. 4-8.



## References

1. Bulgakova G.T. *Neravnovesnye i nelinejnye efekty v protsessakh dvukhfaznoy filtratsii* [Non-equilibrium and nonlinear effects in two-phase flow processes]. Dr.Sc. theses. Ufa, 2000. P. 33 (in Russian)
2. Dudareva O.V. *Nelineynaya filtratsiya v nizkopronitsaemykh kollektorakh* [Nonlinear fluid flow in low permeability reservoirs]. Conference Proceedings. Sterkitamak, 2015, pp. 21-24 (in Russian)
3. Baykov V.A., Kolonskikh A.V. et al. *Nelineynaya filtratsiya v nizkopronitsaemykh kollektorakh. Laboratornye filtratsionnye issledovaniya kerna* [Nonlinear fluid flow in tight reservoirs. Laboratory coreflood experiments]. Bulletin of OOO NK Rosneft. 2013, Vol. 31, No. 2., pp. 4–7. (in Russian)
4. OCT-39-195-86 Standard. *Neft. Metod opredeleniya koiffitsienta vytesneniya nefti vodoy v laboratornykh usloviyakh* [Petroleum. Method for determination of water oil displacement efficiency in laboratory conditions]. (in Russian)
5. Baykov V.A., Galeev R.R., Kolonskikh A.V. et al. *Nelineynaya filtratsiya v nizkopronitsaemykh kollektorakh. Analiz i interpretatsiya rezultatov laboratornykh issledovaniy kerna Priobskogo mestorozhdeniya* [Nonlinear flow in low-permeability reservoirs. Analysis and interpretation of the results of laboratory core studies at Priobskoye field]. Bulletin of OOO NK Rosneft. 2013, Vol. 31, No. 2, pp. 8–12. (in Russian)
6. Mirzadzhanzade A.Kh. *Voprosy gidrodinamiki vyazkoplachichnykh i vyazkikh zhidkostey v primenenii k neftedobyche* [Fluid dynamics of viscoplastic and viscous fluids as applied to oil production. Baku: Azneftizdat Publ., 1959. 409 P. (in Russian)
7. Korobov K.Ya., Antipin Yu.V. *O narushenii lineynogo zakona filtratsii pri nizkikh gradientakh davleniya* [Deviation from Darcy law at low pressure gradients]. Neftyanoe Khozaistvo [Oil Industry]. 1968, No. 8, pp. 26-28. (in Russian)
8. Shevchenko, O.N. *Opredelenie znacheniy kriticheskikh gradientov davleniya i skorosti filtratsii nenyutonovskoy zhidkosti* [Determination of critical pressure gradients and flow velocity of non-Newtonian fluid]. Mezhdunarodny Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal [International Research Journal]. 2016, No. 3-2(45), pp. 120-124. (in Russian)
9. Shishmina L.V., Grishaev V.Yu. *Reologicheskie modeli filtratsii nenyutonovskikh zhidkostey v kollektorskom prostranstve* [Rheological flow models for non-Newtonian fluids in reservoir space]. International Conference thesis. Penza: Nauka I Prosvescheniye. 2019, pp. 12-16. (in Russian)
10. Koutyrev E.F., Kochetov A.V., Kozakov S.V., Saifutdinov A.R. On the non-Newtonian fluid behaviour in porous media. Georesursy [Georesources]. 2008, No. 5(28), pp. 4-8. (in Russian)

## Сведения об авторах

*Насыбуллин Арслан Валерьевич*, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ГБОУ ВО Альметьевский государственный нефтяной институт (АГНИ)

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина 2

E-mail: arsva1@bk.ru

*Хаярова Динара Рафаэлевна*, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ГБОУ ВО Альметьевский государственный нефтяной институт (АГНИ)

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина 2

E-mail: gildinara14@mail.ru



**Authors**

*A.V. Nasybullin*, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department "Development and Operation of oil and gas fields", Almeteyevsk State Oil Institute (AGNI)  
2, Lenina st., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation  
E-mail: arsva1@bk.ru

*D.R. Khayarova*, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor "Development and Operation of oil and gas fields", Almeteyevsk State Oil Institute (AGNI)  
2, Lenina st., Almeteyevsk, 423450, Russian Federation  
E-mail: gildinara14@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15.01.2024*

*Принята к публикации 21.03.2024*

*Опубликована 30.03.2024*