

ИНЖЕНЕРНЫЕ ЗАМЕТКИ

Оригинальная статья
УДК 532.546:544.725
EDN: VJBLCE

Микрореологическое исследование изолирующих свойств буровых растворов

О.Ф. Кондрашев ✉

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа,
ул. Космонавтов, д. 1

Аннотация. *Актуальность.* Модификация антифильтрационных или изолирующих свойств буровых растворов, определяющих способность экранировать призабойную зону, является наиболее рациональным способом сохранения продуктивных свойств пластов при их вскрытии. Однако их получение ограничивается устаревшей буровой реометрией, не дающей достаточной количественной информации о системе «полимер–порода», в которой физические характеристики жидкости радикально отличаются от объемных. *Цель работы.* Исследование факторов, определяющих физическое состояние и подвижность в пористой среде фильтрата бурового раствора на основе Дк-дрилла и Сайпана. *Материалы и методы.* Объектами изучения служили водные растворы Дк-дрилла и Сайпана, образцы кернов с достаточно широким спектром проницаемости из разведочных скважин нефтяных месторождений Башкортостана и Западной Сибири. В работе применялись стандартные и авторские методики исследования растворов. *Результаты.* Анализ макро- и микроскопических исследований системы «полимер–порода» показал определяющее влияние контактного взаимодействия на физические свойства фильтрата и его гидродинамику, позволил объяснить фильтрационные аномалии полимерных растворов радикальным изменением структурно-механических свойств фильтрата в силовом поле твердой фазы. *Выводы.* Изложенное указывает на необходимость учета молекулярно-поверхностных взаимодействий на межфазных границах при разработке технологических жидкостей нового поколения, в гидродинамических расчетах, существенном обновлении методов буровой реометрии.

Ключевые слова: фильтрат, антифильтрационные или изолирующие свойства, узкий зазор, микрореология, контактное взаимодействие, надмолекулярная структура, разрыв сплошности

Финансирование: работа выполнена в рамках договора с ЗапСибБурНИПИ.

Для цитирования: Кондрашев О.Ф. Микрореологическое исследование изолирующих свойств буровых растворов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2025. Т. 16, № 3. С. 466–477. EDN: VJBLCE

✉ Кондрашев Олег Федорович, kondr_of@mail.ru

© Кондрашев О.Ф., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Сохранение продуктивных свойств пластов при их вскрытии является одной из основных задач буровой технологии, актуальность которой только возрастает в связи с усложнением объектов бурения, внедрением новых технологий и материалов.

Одним из наиболее действенных способов решения этой проблемы является модернизация эксплуатационных характеристик буровых растворов, как наиболее подвижного элемента всей технологии [1].

Применение высокомолекулярных синтетических соединений и особенно их биоразлагаемых образцов во многом решает эту проблему [2, 3]. Однако промышленные оценки результата их применения часто расходятся с ожидаемыми, базирующимися на данных лабораторных испытаний [4–6].

Одной из причин является некорректное моделирование пластовых условий еще на лабораторной стадии, применение устаревших методов буровой реометрии, лишь косвенно учитывающих многообразие поверхностных явлений в системе «раствор полимера–нефть–порода» [7, 8]. В первую очередь это относится к контактному взаимодействию полимера с породой, которое, учитывая ее огромную удельную поверхность, должно быть довольно значительным.

Влияние этого фактора на фильтрационные процессы было установлено еще в прошлом веке и связывалось с пристенными или граничными слоями нефти, выстилающими поверхность поровых каналов и уменьшающих их эффективное сечение [9].

Известны экспериментальные данные о граничных слоях некоторых полимеров толщиной до 30 мкм. Для полимерных буровых растворов размеры их гораздо меньше, но тем не менее они соизмеримы с масштабом пор и существенно влияют на гидродинамику фильтрата [10–12].

В связи с этим целью настоящей работы было изучение специфики контактного взаимодействия фильтрата с породой и возможности регулирования его изолирующих свойств.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи применялись макро- и микроскопические методы исследования пластовой системы «раствор полимера–порода».

Фильтрационные исследования проводились по стандартной методике в режиме постоянного расхода на установке УИПК-1М [1].

Микрореологические измерения выполнялись на оригинальной установке УГНТУ, рабочая ячейка которой – узкий зазор представляет собой плоский капилляр из порообразующего минерала. Его конструкция позволяет варьировать размеры зазора от долей до десятков микрон и скорости течения в характерном для нефтяных коллекторов диапазоне. Термобарокамера установки поддерживает заданные условия.

Объектами изучения служили водные растворы Дк-дрилла и Сайпана, образцы породы с достаточно широким спектром проницаемости из разведочных скважин нефтяных месторождений Башкортостана и Западной Сибири (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика образцов керна и растворов**Table 1.** Characteristics of the core and solutions

№	№ керна	Состав раствора, % масс	Вязкость, мПа·с	Проницаемость для воды, мкм ²	Проницаемость для полимера, мкм ²	Давление, МПа	Коэффициент изоляции, %
1	10541	Сайпан (0,2)	14,04	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$0,11 \cdot 10^{-5}$	220	93,2
2	21751	Дк-дрилл (0,1)	1,27	$6,34 \cdot 10^{-5}$	-	22,0	100
3	105	Дк-дрилл (0,1) и Сайпан (0,2)	29,86	$8,41 \cdot 10^{-3}$	$3,99 \cdot 10^{-3}$	00,55	52,6
4	5218	Дк-дрилл (0,25) и Сайпан (0,2)	12,29	$4,37 \cdot 10^{-5}$	$0,28 \cdot 10^{-5}$	16,0	93,7

Источник: [7] / Source:[7]

Результаты и обсуждение

В [1] установлено, что:

1) кольматирующие свойства растворов усиливаются в малопроницаемых средах;

2) Дк-дрилл (загуститель-флокулянт в объемных условиях) в пористой среде превосходит антифильтрационные характеристики Сайпана, применяемого обычно в качестве регулятора структурно-механических свойств (позиции 1, 2);

3) в установившемся режиме фильтрации наблюдаются периодические скачки давления.

Для выяснения природы отмеченных аномалий были проведены параллельные микрореологические исследования на установке УГНТУ при условиях фильтрационного эксперимента.

Сопоставление полученных данных в узких зазорах (рис. 1, кривые 3, 4) и естественных образцах породы (кривые 1, 2), их синхронность однозначно указывают на поверхностную природу фильтрационных аномалий, на контактное взаимодействие фильтрата с породой, как основную причину затухания фильтрации.

С этих позиций, отмеченное в [1] усиление затухания процесса фильтрации в малопроницаемых средах является следствием увеличения в порах малого

размера интенсивности взаимодействия фильтрата с породой.

Динамика микрореологических параметров (кривые 3, 4) отражает глубокую модификацию надмолекулярной структуры фильтрата при контакте с породой, в результате которой кратно возрастает вязкость и возникает сдвиговая упругость, не фиксируемая стандартными методами, но определяющая гидродинамику фильтрата.

Такие же выводы вытекают из анализа концентрационных зависимостей микрореологических свойств (рис. 2, кривые 1, 2, 3) и поверхностного натяжения (кривые 4, 5, 6) растворов на разных межфазных границах: совпадение их точек перегиба также свидетельствует о поверхностной природе рассматриваемых явлений.

Приведенные данные во многом противоречат устоявшимся представлениям о функциях высокомолекулярных компонентов бурового раствора: видно, что 0,5% раствор Дк-дрилла (кривая 4), применяемый обычно в качестве загустителя-флокулянта, в пристенной области выступает в качестве усилителя неньютоновских аномалий, кратно увеличивая как свои структурно-механические характеристики, так и раствора с Сайпаном (кривая 3).

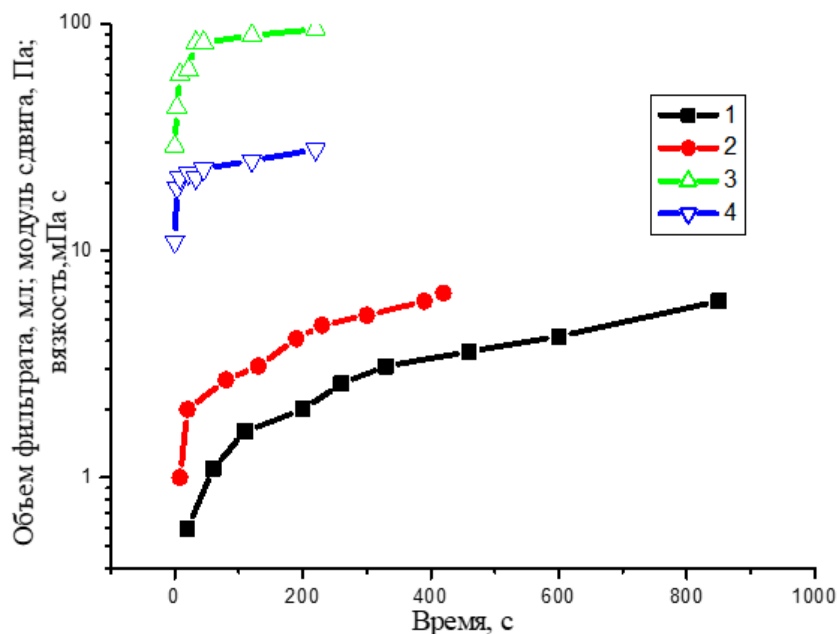


Рис. 1. Динамика фильтрации растворов Дк-дрилла в керне (кривые 1, 2) и структурообразования в зазоре 1,5 мкм (кривая 3 – модуль упругости; кривая 4 – вязкость) 0,1% (кривая 1), 0,5% (кривая 2) и 0,2% (кривые 3 и 4) концентраций

Fig. 1. Dynamics of filtration of DK-drill solutions in the core (curves 1, 2) and structure formation in the 1.5 μm gap (curve 3 – modulus of elasticity; curve 4 – viscosity) of 0.1% (curve 1), 0.5% (curve 2) and 0.2% (curves 3 and 4) concentrations

Источник: адаптировано из [7]

Source: adapted from [7]

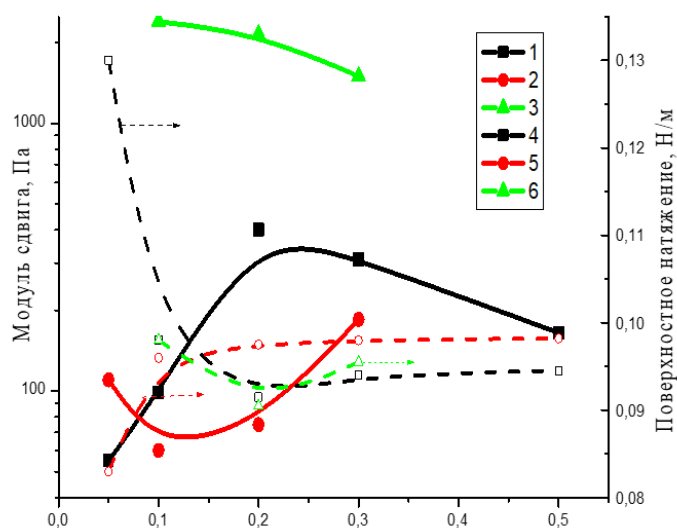


Рис. 2. Концентрационные зависимости модуля сдвига (кривые 1, 2, 3) и поверхностного натяжения (кривые 4, 5, 6) растворов Сайпана (1, 4), Дк-дрилла (2, 5) и Дк-дрилла с Сайпаном (3, 6)

Fig. 2. Concentration dependencies of the shear modulus (curves 1, 2, 3) and surface tension (curves 4, 5, 6) of solutions of Saipan (1, 4), DK-drill (2, 5) and DK-drill with Saipan (3, 6)

Количественная оценка подвижности полимерных растворов в порах разной величины проводилась по кривым течения, соответствующим в данных условиях твердообразным надмолекулярным

структурам (рис. 3). Последнее принципиально отличает состояние фильтрата полимера в пористой среде и свободном объеме, где он ведет себя как вязкопластичная жидкость.

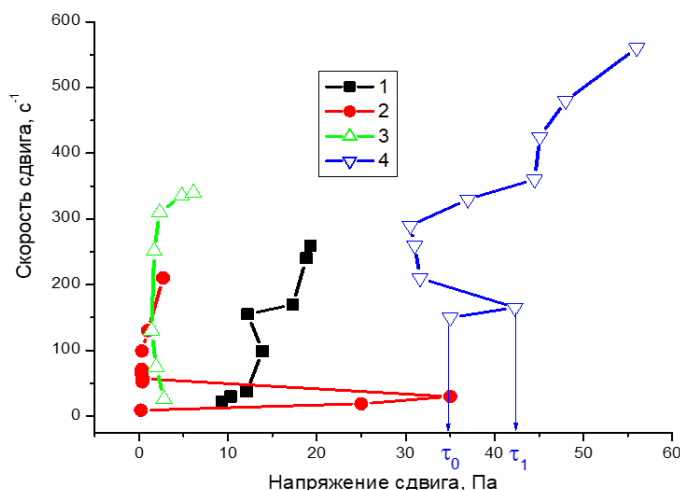


Рис. 3. Кривые течения в зазоре 1,5 мкм растворов: 1 – Дк-дрилл (0,3%) + Сайпан (0,2%); 2 – Дк-дрилл (0,1%) + Сайпан (0,2%); 3 – Сайпан (0,2%); 4 – Дк-дрилл (0,5%)

Fig. 3. Flow curves in a 1.5 μm gap of solutions: 1 – DK-drill (0.3%) + Saipan (0.2%); 2 – DK-drill (0.1%) + Saipan (0.2%); 3 – Saipan (0.2%); 4 – DK-drill (0.5%)

Из последнего следует еще один важный вывод о резком усилении антифильтрационных характеристик, поскольку разрушение такой структуры принципиально отличается от вязкопластичной.

Кроме того, наличие на приведенных графиках участков с отрицательным углом наклона указывает на разрыв сплошности фильтрата при критических напряжениях (более τ_1 , кривая 4). В соответствии с [13, 14] разрыв континуума локализуется во входной части поровых каналов и избыточное давление не распространяется далее в поровый объем, который остается в докритических условиях. Явление разрыва сплошности здесь выступает в качестве своего рода предохранительного клапана, сбрасывающего избыточное давление и тем самым фактически увеличивающего диапазон критических давлений для структурированной жидкости и соответственно ее изолирующие качества.

Разрыв сплошности в этих растворах объясняет и данные фильтрационных исследований, где этот эффект макроскопически проявлялся в виде скачков давления при установившейся фильтрации [1]. Это вызвано, исходя из приведенных выше данных, переводом в режим разрыва все более мелких пор по мере повышения давления фильтрации. Однако это не приводит к увеличению охвата фильтрацией новых каналов и соответствующего расхода, поскольку поровая жидкость остается в прежнем состоянии.

Данные микрореологических исследований позволяют объяснить рассмотренные фильтрационные и реологические аномалии эффектом структурно-механической коьматации пористой среды, которая, в отличие от обычной трактовки этого термина, обусловлена блокировкой просвета поровых каналов структурированным фильтратом.

Для конструирования растворов с требуемыми антифильтрационными свойствами

по данным микрореологических измерений было уточнено влияние высокомолекулярных добавок на модифицированную надмолекулярную структуру фильтрата.

Анализ, проведенный на основе известной модели Максвелла, показал, что по этому критерию Дк-дрилл существенно превосходит Сайпан, а их композиция дает синергетический эффект, вследствие наложения когезионного и адгезионного взаимодействий (табл. 2).

Табл. 2. Влияние упругих и вязких свойств растворов полимеров на течение в узком зазоре 1,5 мкм

Table 2. Influence of elastic and viscous properties of polymer solutions on the flow in a narrow gap 1.5 μm

Содержание полимера в растворе	$\tau/\eta, \text{c}^{-1}$	$\dot{\gamma}/G, \text{c}^{-1}$
Сайпан, 0,2%	27,8	16,8
Дк-дрилл, 0,1%	120	4,22
Дк-дрилл 0,1% + Сайпан 0,2%	135	1,28

Примечание: $\eta, \tau, \dot{\gamma}$ — соответственно вязкость в узком зазоре, напряжение сдвига и его скорость; G — модуль упругости.

Принципиально отличается и характер влияния этих полимеров на вязкие свойства фильтрата: для Дк-дрилла характерна монотонная концентрационная зависимость, а Сайпана — экстремальная. Последнее подтверждает ранее описанные особенности структурирующего действия твердого тела на жидкости с межмолекулярным взаимодействием разной интенсивности: эффект сильнее проявляется в области малых и

высоких концентраций, когда баланс когезионного и адгезионного взаимодействия смещается в сторону последнего [8, 10].

Полученные микрореологические данные позволили далее количественно оценить влияние компонентов бурового раствора на гидродинамику фильтрата и его антифильтрационные качества без проведения трудоемких фильтрационных экспериментов (табл. 3).

Табл. 3. Влияние компонентов на вязкость растворов полимеров в узких зазорах

Table 3. Effect of components on the viscosity of polymer solutions in narrow gaps

Приведенная вязкость	Содержание компонента, %			Узкий зазор, мкм
	0,1	0,2	0,3	
η_d/η	0,25	0,53	1,11	1,5
η_d/η	0,2	0,23	1,0	6,0
η_c/η	1,25	5	7	1,5
η_c/η	10	2,5	10	6,0

Примечание: η_d, η_c и η_t — соответственно вязкости компонентов и их смеси.

Рассматривая вязкость, модуль сдвига, критическое напряжение в виде функций размеров поровых каналов, градиента давления и температуры в известном уравнении фильтрации

$$\frac{\partial P}{\partial t} = G_k U(|\vartheta|) \frac{\vartheta}{|\vartheta|},$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{k(\Delta P - G_k)}{m\eta(l + r_0) \ln \frac{l + r_0}{r_0}},$$

Анализ полученных данных (табл. 4) показывает, что пренебрежение молекулярно-поверхностными эффектами (аномалии вязкости, сдвиговой упругости, разрыв сплошности) может приводить к неадекватным гидродинамическим оценкам, где время продвижения фронта занижается в пределах порядка, а

где $U(\vartheta) = \frac{\eta}{kG_k} \left(\vartheta + \frac{kG_k}{\eta} \right)$ – функция фильтрации с предельным градиентом G_k , ϑ – скорость фильтрации, k – проницаемость, можно далее рассчитать скорость продвижения фронта для разных образцов раствора в случае плоскорадиального притока [15]:

$$t = \frac{m\eta}{k} \int_0^l \frac{(l + r_0) \ln \frac{l + r_0}{r_0}}{\Delta P - G_k l}.$$

погрешность в определении скорости фронта превышает 100%.

Следует подчеркнуть, что динамика рассматриваемых данных также подтверждает поверхностную природу эффекта, проявляющуюся в усилении неньютоновских аномалий в процессе структурообразования при контактном взаимодействии.

Табл. 4. Зависимость безразмерного времени (t_0) и скорости (v_0) от глубины проникновения (L) для растворов полимеров

Table 4. Dependence of dimensionless time (t_0) and velocity (v_0) on penetration depth (L) for polymer solutions

Состав раствора, % масс	L = 0,05 м		L = 0,01 м		L = 0,4 м	
	t_0	v_0	t_0	v_0	t_0	v_0
0,015% Дк-дрилл + 0,1% Сайпан	2,40	$0,46 \cdot 10^{-1}$	2,64	$0,40 \cdot 10^{-1}$	7,62	$0,08 \cdot 10^{-1}$
0,1% Дк-дрилл + 0,2% Сайпан	2,30	0,39	2,46	0,38	3,75	0,19
0,3% Дк-дрилл + 0,3% Сайпан	2,40	0,15	2,77	0,13	12,9	0,12

Заключение

Проведенные исследования показали:

1. Применение микрореологического метода позволило однозначно установить, что фильтрационные аномалии растворов полимеров обусловлены контактными взаимодействиями фильтрата с породой.

2. В пористой среде вязкопластичная структура флюида преобразуется в твердообразную с соответствующим усилением изолирующих свойств.

3. Критические напряжения не ухудшают антифильтрационные показатели растворов.

4. Прочность структурно-механических пробок фильтра определяется балансом адгезионного и когезионного взаимодействия.

5. В пристенной области имеет место инверсия функциональных свойств полимеров.

6. Продемонстрирована возможность разработки буровых растворов с заданными изолирующими свойствами на основе новых методов исследования контактного взаимодействия.

Вклад автора

О.Ф. Кондрашев – концептуализация, администрирование данных, методология, проведение исследования, формальный анализ, программное обеспечение, верификация данных, визуализация, создание рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список источников

1. Шарипов А.У. Проектирование и регулирование основных показателей бурения глубоких скважин. М.: ВНИИОЭНГ, 1995. 280 с.
2. Четвертнева И.А., Каримов О.Х., Тентерева Г.А., Акчурин Х.И. Практические аспекты применения буровых реагентов на основе природных полимеров на месторождениях Башкортостана // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 1. С. 42–47. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2020-10109>
3. Adewole J. K., Muritala K. B. Some applications of natural polymeric materials in oilfield operations: a review // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2019. Т. 9. №. 3. P. 2297–2307. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0626-9>
4. Mahmoud A., Gajbhiye R., Elkhatny S. Advances in drilling fluid technology: Recent innovations, performance enhancements, and future trends in high-performance and eco-friendly formulations // Journal of Molecular Liquids. 2025. Vol. 434. P. 128004. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.128004>
5. Yang L., Ou Z., Jiang G. Research progress of elastomer materials and application of elastomers in drilling fluid // Polymers. 2023. Т. 15, № 4. P. 918. <https://doi.org/10.3390/polym15040918>
6. Абусал Юсеф А.Ю., Яхин А.Р., Горохов Г.М., Алабае С.С. Мировые тенденции в разработке и внедрении нанотехнологий при бурении нефтяных и газовых скважин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2025. Вып. 2(154). С. 25–39. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2025-2-25-39>
7. Кондрашев О.Ф., Шарипов А.У. Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. М.: Геоинформак, 2000. 56 с.
8. Кондрашев О.Ф. Фильтрационные и микрореологические аномалии в полимерных буровых растворах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. № 6(132). С. 65–70. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-6-65-70>
9. Кусаков М.М., Ребиндер П.А., Зинченко Е.А. Поверхностные явления в процессах фильтрации нефтей // Доклады АН СССР. 1940. Т. 28, № 5. С. 432–436.

10. *Кондрашев О.Ф.* Граничные слои полимерных растворов // Инженерная физика. 2019. № 10. С. 9–13. <https://doi.org/10.25791/infizik.10.2019.914>
11. *Исмаков Р.А., Конесев В.Г., Янгиров Ф.Н.* и др. Исследование кинетики изменения толщины граничных слоев смазочных материалов применительно к буровой технологии // SOCAR Proceedings. 2021. № 2. С. 115–120. <https://doi.org/10.5510/OGP20210200502>
12. *Гракович П.Н., Шелестова В.А., Иванов Л.Ф.* и др. Исследование структуры и свойств граничных слоев в композиционных материалах на основе ПТФЭ // Полимерные материалы и технологии. 2017. Т. 3, № 3. С. 14–26. EDN: ZHEZPX
13. *Виноградов В.Г., Малкин А.Я.* Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 440 с.
14. *Урьев Н.Б.* Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.
15. *Мирзаджанзаде А.Х., Ентов В.М.* Гидродинамика в бурении. М.: Недра, 1985. 196 с.

Информация об авторе

Олег Федорович Кондрашев – д-р техн. наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия; SPIN-код:1669-8196, <https://orcid.org/0009-0003-3091-6458>; e-mail: kondr_of@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2025

Принята к публикации 30.09.2025

NOTES IN ENGINEERING

Original article

Microrheological study of insulating properties of drilling fluids

Oleg F. Kondrashev ✉

Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russia

Abstract. *Background.* Modification of the antifiltration or isolating properties of drilling fluids, which determine their ability to screen the near-wellbore zone, is the most rational way to preserve the productive properties of reservoirs during their opening. However, their acquisition is limited by outdated drilling rheometry, which does not provide sufficient quantitative information about the polymer–rock system, where the physical characteristics of the fluid are radically different from the volumetric ones. *Objective.* To study the factors determining the physical state and mobility in the porous medium of the drilling mud filtrate based on DK-drill and Saipan. *Materials and methods.* The objects of study were aqueous solutions of DK-drill and Saipan and the core samples with a sufficiently wide range of permeability from exploration wells of oil fields of Bashkortostan and Western Siberia. The work used standard and the author's methods of solution research. *Results.* The analysis of macro- and microscopic studies of the polymer–rock system revealed the decisive influence of contact interaction on the physical properties of the filtrate and its hydrodynamics, allowing us to explain the filtration anomalies of polymer solutions by a radical change in the structural and mechanical properties of the filtrate in the force field of the solid phase. *Conclusions.* The above indicates the need to take into account molecule–surface interactions at interfacial boundaries in the development of new generation process fluids, in hydrodynamic calculations, a significant update of drilling rheometry methods.

Keywords: filtrate, antifiltration or insulating properties, narrow gap, microrheology, contact interaction, supramolecular structure, discontinuity

Funding: the work was carried out under the contract with ZapSibBurNIPI.

For citation: Kondrashev O.F. Microrheological study of insulating properties of drilling fluids. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2025. Vol. 16, No. 3. P. 466–477. (In Russ.).

✉ Oleg F. Kondrashev, kondr_of@mail.ru

© Kondrashev O.F., 2025



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Author contributions

Oleg F. Kondrashev – conceptualization, data curation, methodology, investigation, formal analysis, software, validation, visualization, writing – review & editing.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

References

1. Sharipov A.U. *Design and Regulation of the Main Indicators of Deep Well Drilling*. Moscow: VNIIOENG, 1995. 280 p. (In Russ.).
2. Chetvertneva I.A., Karimov O.Kh., Teptereva G.A., Akchurin H.I. Practical aspects of application of drilling reagents based on natural polymers in the fields of Bashkortostan. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2020. No. 1. P. 42–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2020-10109>
3. Adewole J.K., Muritala K.B. Some applications of natural polymeric materials in oilfield operations: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019. Vol. 9, No. 3. P. 2297–2307. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0626-9>
4. Mahmoud A., Gajbhiye R., Elkattatny S. Advances in drilling fluid technology: Recent innovations, performance enhancements, and future trends in high-performance and eco-friendly formulations. *Journal of Molecular Liquids*. 2025. Vol. 434. P. 128004. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.128004>
5. Yang L., Ou Z., Jiang G. Research progress of elastomer materials and application of elastomers in drilling fluid. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 4. P. 918. <https://doi.org/10.3390/polym15040918>
6. Abusal Yusef A.Yu., Yakhin A.R., Gorokhov G.M., Alrabae S.S. Global trends in the development and implementation of nanotechnology when drilling of oil and gas wells. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2025. No. 2(154). P. 25–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2025-2-25-39>
7. Kondrashev O.F., Sharipov A.U. *Modification of the Structural and Mechanical Properties of Polymers in a Porous Medium*. Moscow: Geoinformak, 2000. 56 p. (In Russ.).
8. Kondrashev O.F. Filtration and micro-rheological anomalies of polymer drilling solutions. *Oil and Gas Studies*. 2018. No. 6(132). P. 65–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-6-65-70>
9. Kusakov M.M., Rebinder P.A., Zinchenko E.A. Surface phenomena in the filtration processes of oils. *Doklady AN SSSR*. 1940. Vol. 28, No. 5. P. 432–436. (In Russ.).
10. Kondrashev O.F. Boundary layers of polymeric solutions. *Engineering Physics*. 2019. No. 10. P. 9–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/infizik.10.2019.914>
11. Ismakov R.A., Konesev V.G., Yangirov F.N. et al. Research of the kinetics of thickness of the boundary layers of lubricating materials applied to drilling technology. *SOCAR Proceedings*. 2021. No. 2. P. 115–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP20210200502>
12. Grakovich P.N., Shelestova V.A., Ivanov L.F. et al. Investigation of structure and properties of boundary layers in composite materials with PTFE matrix. *Polymer Materials and Technologies*. 2017. Vol. 3, No. 3. P. 14–26. (In Russ.).

13. Vinogradov V.G., Malkin A.Ya. *Rheology of Polymers*. Moscow: Khimiya, 1977. 440 p. (In Russ.).
14. Uriev N.B. *Highly Concentrated Dispersed Systems*. Moscow: Khimiya, 1980. 320 p. (In Russ.).
15. Mirzajanzade A.Kh., Entov V.M. *Hydrodynamics in Drilling*. Moscow: Nedra, 1985. 196 p. (In Russ.).

Information about the author

Oleg F. Kondrashev – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-3091-6458>; e-mail: kondr_of@mail

Received 16 January 2025

Accepted 30 September 2025