

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ / DEVELOPMENT AND OPERATION OF OIL AND GAS FIELDS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.17>

ВЛИЯНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ НА НЕФТЕОТДАЧУ

Научная статья

Набиев А.Р.^{1,*}, Исмаилов А.И.²

^{1,2} Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (almaz.nabiev.1998-2014[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы, касающиеся влияния смачиваемости на нефтеотдачу. Отдельное внимание уделено теоретическим аспектам, связанным с формированием переходной зоны. Рассмотрены результаты эксперимента смачиваемости пласта в плотных песчаниках. Установлено, что смачиваемость влияет на характеристики спонтанной имbibции, контролируя капиллярную силу. Чем более увлажнен пласт, тем выше его предельная нефтенасыщенность. Отмечено, что исследование смачиваемости в контексте вторичного и третичного извлечения нефти в обедненных месторождениях имеет высокую актуальность. Сделан вывод о том, что миграция нефти в плотных песчаниковых коллекторах характеризуется потоком не Дарси, нефть находится в несмачиваемой фазе и подвержена капиллярному сопротивлению. Смачиваемость влияет на характеристики миграции нефти, контролируя капиллярную силу. Чем более увлажнен пласт, тем более благоприятны условия для миграции и накопления нефти, и, следовательно, тем выше предельная нефтенасыщенность пласта.

Ключевые слова: смачиваемость, нефть, песчаник, вода, нефтеотдача.

EFFECT OF WETTABILITY ON OIL RECOVERY

Research article

Nabiev A.R.^{1,*}, Ismailov A.I.²

^{1,2} Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk, Russian Federation

* Corresponding author (almaz.nabiev.1998-2014[at]mail.ru)

Abstract

The article examines issues related to the influence of wettability on oil recovery. Special attention is paid to theoretical aspects associated with the formation of the transition zone. Experimental results of reservoir wettability in dense sandstones are reviewed. It is established that wettability affects the characteristics of spontaneous imbibition by controlling the capillary force. The wetter the formation is, the higher its ultimate oil saturation is. It is noted that the study of wettability in the context of secondary and tertiary oil recovery in depleted fields is highly relevant. It is concluded that oil migration in tight sandstone reservoirs is not characterized by Darcy flow, oil is in the non-wetting phase and is subject to capillary resistance. Wettability affects oil migration characteristics by controlling capillary force. The more wetted the reservoir, the more favourable the conditions for oil migration and accumulation, and therefore the higher the ultimate oil saturation of the reservoir.

Keywords: wettability, oil, sandstone, water, oil recovery.

Введение

Смачиваемость обычно считается одним из наиболее важных параметров, влияющих на насыщение, распределение и поток жидкостей в пористых средах. Минералы, присутствующие в породах-коллекторах, обычно известны как гидрофильные по своей природе, то есть преимущественно смачиваемые водой [1]. До недавнего времени многие специалисты-нефтяники считали, что все пласты являются гидрофильными. Однако проблемы, связанные с добычей нефти, обусловили необходимость проведения лабораторных исследований, которые выявили существование коллекторов с промежуточной смачиваемостью или даже явно масляной влажностью. Исследования, проведенные Q. Wu [2], E. Jafarbeigi [4], M.P. Alvarez-Berrios [5] показали, что на самом деле резервуары с промежуточной смачиваемостью или преимущественно смачиваемые нефтью гораздо более многочисленны, чем считалось до недавнего времени. Их можно разделить на три семейства сопоставимого размера: с преимущественным смачиванием водой, с преимущественным смачиванием нефтью и с промежуточной смачиваемостью [2].

Тип смачиваемости пород-коллекторов и ее влияние на петрофизические свойства имеют решающее значение для определения механизмов извлечения нефти и оценки эффективности ее добычи. Смачиваемость регулирует скорость и количество самопроизвольного впитывания воды, а также эффективность вытеснения нефти нагнетаемой водой с добавками или без них [3]. Природа смачиваемости (гидрофобная или гидрофильная) влияет на поведение породы-коллектора, в частности, при заводнении месторождения и в случае использования передовых методов извлечения нефти. Например, неверное предположение о гидрофильной природе породы там, где она гидрофобна, может привести к необратимому повреждению залежи и усложнить процесс эксплуатации месторождения. Кроме того, смачиваемость является важным вопросом в проблемах многофазных потоков, начиная от миграции нефти из исходных пород и заканчивая такими процессами повышения нефтеотдачи, как щелочное заводнение или чередование закачки CO₂ и воды.

Таким образом, исследование смачиваемости в контексте вторичного и третичного извлечения нефти в обедненных месторождениях имеет высокую актуальность, а также теоретическую и практическую значимость, что и обуславливает выбор темы данной статьи.

Над разработкой и усовершенствованием методов, позволяющих получить точное определение кривой дренажного капиллярного давления, а также определить отрицательное капиллярное давление при пропитке и остаточную нефтенасыщенность трудятся такие авторы как А.Г. Рзаев [3], М.Ю. Зубков [10], О. Alomaig [1] и др.

Исследования, в которых рассматриваются возможности изменения смачиваемости карбонатной породы от смешанной до гидрофильной при высокой температуре и высокой солености проводились И.А.Гуськова, Д.Р. Хаярова, Т.Л. Гайфуллин, Р.Р. Закиров [6].

Однако, несмотря на имеющиеся труды и наработки, ряд проблемных вопросов в данной предметной плоскости остается открытым. В частности, отдельного внимания заслуживает оценка вероятности повышения нефтеотдачи за счет изменения состава жидкости для гидроразрыва, которая преобразует смачиваемость пласта в более гидрофильное состояние. Также отдельного анализа заслуживают первичные реакции, определяющие начальную смачиваемость породы в зависимости от минералогии пласта, состава пластовой воды и типа нефти.

Цель и методы исследования

Цель исследования заключается в рассмотрении теоретических и практических аспектов влияния смачиваемости на нефтеотдачу. Методами исследования послужили анализ, синтез, обобщение научных источников по проблеме исследования. Для детального изучения особенностей протекания описываемых процессов рассмотрены результаты эксперимента, который был реализован учеными из Технологического университета в г. Абадан, Иран, и проведен количественный анализ корреляции между смачиваемостью, миграцией и аккумулярованием плотной нефти.

Основные результаты и их обсуждение

Первоначальная смачиваемость пласта и измененная смачиваемость во время и после миграции углеводородов влияют на профиль начальной водонасыщенности – S_{wi} и характеристики добычи в пласте. Большинство коллекторов до миграции нефти являются обводненными и имеют протяженную переходную зону, в которой насыщенность постепенно изменяется от преимущественно нефти с неснижаемой водой в верхней части переходной зоны до воды в нижней части [9]. Это распределение определяется разницей давления между нефтяной и водной фазами, основанной на плавучести, которая называется капиллярным давлением, P_c (см. рис. 1).

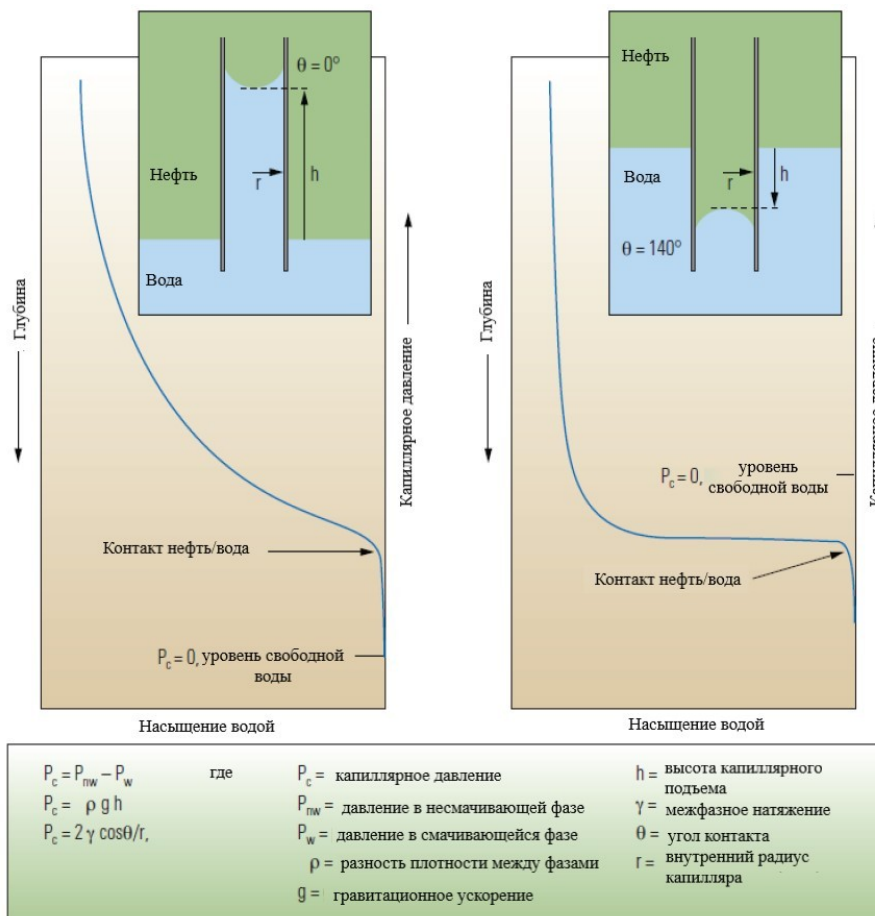


Рисунок 1 - Формирование переходной зоны
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.17.1>

Как показано на рис. 1, в однородном пласте наблюдается зона перехода от высокого насыщения нефтью в верхней части к высокому насыщению водой в нижней части (синие кривые). Этот переход насыщения обусловлен капиллярным давлением, P_c , которое представляет собой разницу между давлением воды и нефти на границе раздела фаз. В капиллярной трубке поверхностные силы смачивания водой заставляют воду подниматься вверх (левая вставка), вытесняя нефть, но, если внутренняя поверхность трубки смачивается нефтью, она будет толкать воду вниз (правая вставка).

Сила смачивания, а значит и P_c , обратно пропорциональна радиусу капилляра. Капиллярный подъем, h , она определяется балансом сил смачивания и весом жидкости, вытесненной с границы раздела объем-жидкость. Если перевести это на пористые пласты, то существует уровень свободной воды (FWL), где капиллярное давление между водой и нефтью равно нулю. Поскольку пористые породы имеют распределение размеров пор и поровых горловин, аналогичное распределению капиллярных трубок, на любой заданной высоте над FWL та часть распределения размеров, которая может поддерживать воду на этой высоте, будет водонасыщенной.

На большей высоте плавучесть нефти в воде обеспечивает большее капиллярное давление, вытесняющее воду из мелких пустот [7]. В водонасыщенном пласте (слева) контакт нефти и воды находится выше FWL , что указывает на то, что необходимо приложить давление, чтобы загнать нефть в самые крупные поры. В пласте, увлажненном нефтью (справа), контакт находится ниже FWL , это означает, что необходимо приложить давление, чтобы заставить водную фазу проникнуть в самые крупные поры. Контакт нефть/вода разделяет зону, содержащую в основном нефть, и зону, содержащую в основном воду.

Для более детального изучения особенностей протекания описываемых процессов на практике рассмотрим результаты эксперимента, который был реализован учеными из Технологического университета в г. Абадан, Иран. В ходе этого эксперимента использовались образцы плотного песчаника, для проведения количественного анализа корреляции между смачиваемостью, миграцией и аккумулярованием плотной нефти. В таблице 1 приведены данные используемых образцов.

Таблица 1 - Характеристики образцов породы, используемых в эксперименте

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.17.2>

Образец	Идентификатор	Форма	Пористость (%)	Проницаемость (мД)	Скорость спонтанной имbibции
3	N116-16	Куб	24,46	32,907	0,62
5	S112-16	Куб	14,91	0,23	0,54
7	A5-23	Куб	2,062	0,043	0,46

Примечание: по ист. [4]

В плотных коллекторах песчаника миграция нефти — это процесс, в котором нефть постоянно замещает воду в порах и горловинах и движется под действием избыточного давления [2]. Поместив данные о градиенте давления и скорости потока в линейную координату, можно получить кривые просачивания трех образцов песчаника. Кривые просачивания показывают, что существуют две модели миграции флюидов: поток Дарси и поток не Дарси (рис. 2).

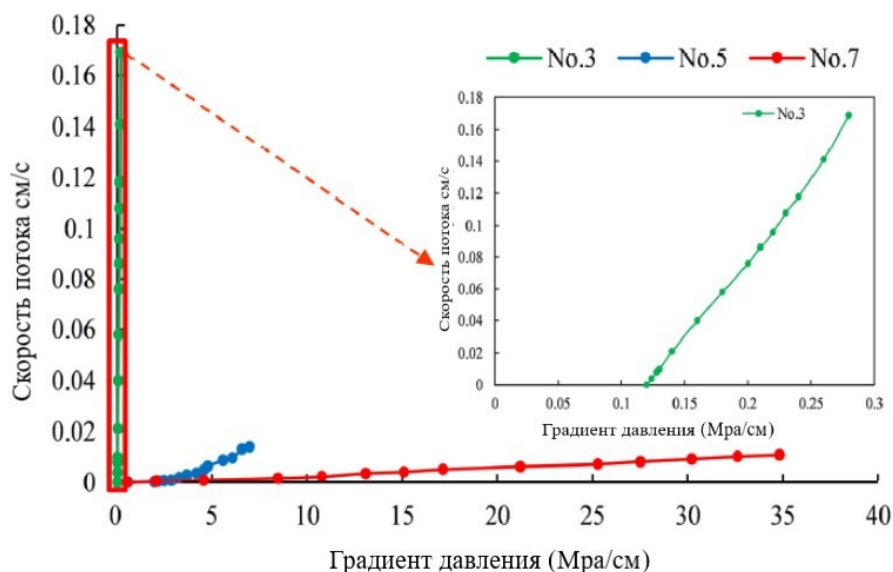


Рисунок 2 - Кривые просачивания нефти при миграции для образцов песчаника

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.17.3>

Примечание: по ист. [4]

Не Дарси поток имеет два состояния в процессе миграции нефти, включая нелинейный поток на низкоскоростной стадии и линейный поток на относительно высокоскоростной стадии. Общая кривая потока представляет собой вогнутую кривую потока, которая может быть описана сегментированной функцией. Изгибающийся участок кривой просачивания представлен силовой функцией, линейный участок – линейной функцией.

Точка пересечения кривой просачивания и оси градиента давления – это градиент давления начала просачивания, который представляет собой минимальные движущие силы, необходимые для преодоления сопротивления, такого как капиллярная сила, и начала потока жидкости. Точка пересечения нелинейного участка и линейного участка – это критический градиент давления, который представляет собой минимальные движущие силы, необходимые для стабильной миграции жидкости [5]. В целом было установлено, что поток не Дарси (образец № 5 и № 7) имеет более высокий градиент давления отталкивания и более низкую скорость просачивания, чем поток Дарси (образец №3).

В обычных и плотных песчаниках из-за различий в размерах пор и горловин песчаника смачиваемость по-разному влияет на капиллярную силу, что приводит к характеристикам потока Дарси [6]:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

где P_c – капиллярная сила (МПа);

σ – межфазное натяжение (мН/м);

θ – контактный угол (°);

r – радиус горла поры (м).

Смачиваемость в плотных песчаниках влияет на адсорбцию сырой нефти на поверхности породы, поэтому она играет важную роль в накоплении нефти в плотных пластах. Среди трех заполненных в ходе эксперимента образцов образец № 3 имел наилучшую пористость и проницаемость, но самую низкую предельную нефтенасыщенность. Поскольку образец № 3 имеет самую сильную гидрофильность (рис. 3), во время процесса загрузки сырой нефти поверхность породы характеризовалась самой слабой адсорбционной способностью для полярных молекул сырой нефти, эффект накопления сырой нефти был наихудшим, поэтому предельная нефтенасыщенность самая низкая.

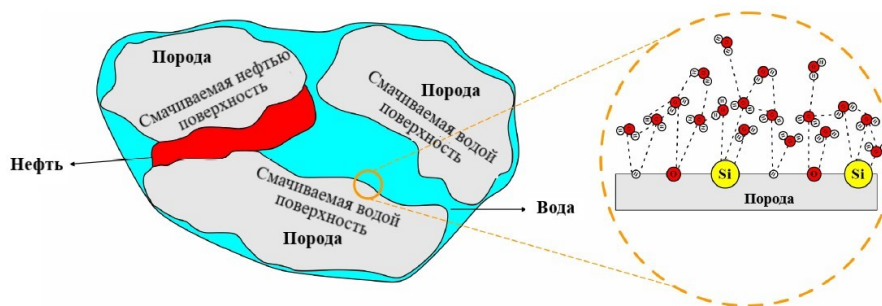


Рисунок 3 - Адсорбция воды на смоченной водой поверхности породы
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.17.4>

Примечание: по ист. [4]

Образец № 7 имел наихудшие показатели пористости и проницаемости, но при этом самую высокую нефтенасыщенность. Поскольку образец № 7 обладает самой сильной липофильностью (рис. 4), во время процесса загрузки сырой нефти поверхность породы имела самую сильную адсорбционную способность для полярных молекул сырой нефти, и эффект аккумуляции сырой нефти был наилучшим, что означает, что он имел самую высокую предельную нефтенасыщенность.

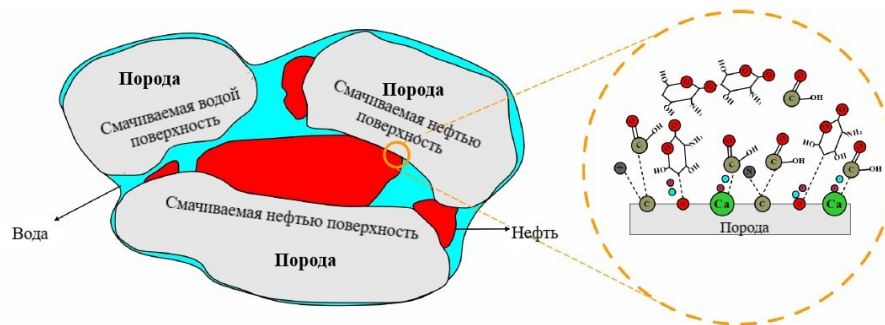


Рисунок 4 - Адсорбция нефти на смачиваемой нефтью поверхности породы
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.17.5>

Примечание: по ист. [4]

Смачиваемость образца № 5 находится между образцами № 3 и № 7, а эффект накопления сырой нефти средний. Кроме того, по сравнению с образцом № 7, который имеет такой же маленький размер горла поры, образец № 5 обладает более сильной гидрофильностью. Предельная нефтенасыщенность образца № 5 находится между образцами № 3 и № 7.

Таким образом, эффективность заводнения (количество дополнительно извлекаемой нефти) зависит от количества закачиваемой воды и типа смачиваемости пород. В случае гидрофобных пород нефтеотдача не превышает 30% от геологических ресурсов (рис. 5).

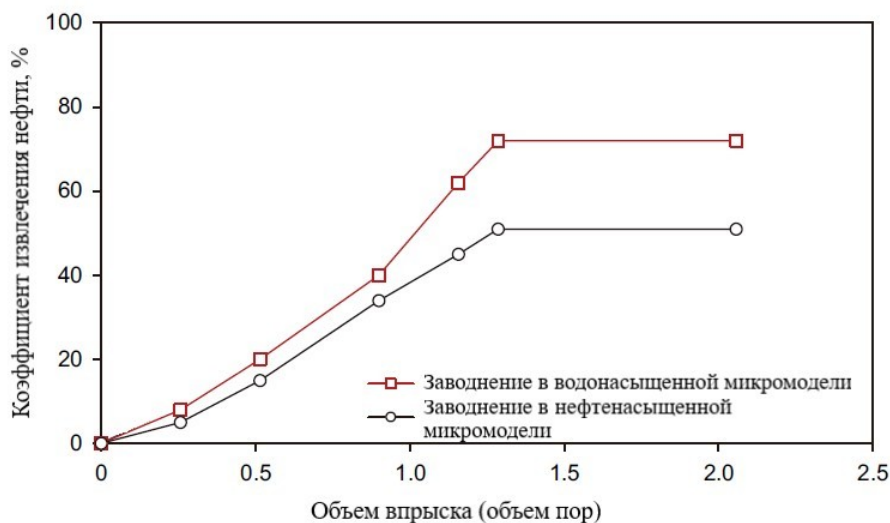


Рисунок 5 - Извлечение нефти в различных условиях смачиваемости
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.17.6>

Примечание: по ист. [8]

Заводнение гидрофильных пород позволяет получить гораздо большее количество дополнительной нефти (нефтеотдача может достигать около 70%). Количество нефти, которое можно получить при заводнении гидрофильных и гидрофобных пород, различно [10].

Подводя итоги проведенного исследования, можно отметить, что количество добываемой нефти зависит от смачиваемости породы, свойств порового пространства и пластовых жидкостей. Минеральный состав породы влияет на смачиваемость, контролирует капиллярную силу и влияет на характеристики спонтанной имbibции породы.

Заключение

Представленные в статье результаты эксперимента свидетельствуют о том, что миграция нефти в плотных песчаных коллекторах характеризуется потоком не Дарси, нефть находится в несмачиваемой фазе и подвержена капиллярному сопротивлению. Смачиваемость влияет на характеристики миграции нефти, контролируя капиллярную силу. Чем более увлажнен пласт, тем более благоприятны условия для миграции и накопления нефти, и, следовательно, тем выше предельная нефтенасыщенность пласта.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Alomair O. Evaluation of the Impact of Low-salinity Water on Wettability Alteration and Oil Recovery in Berea Sandstones / O. Alomair // Fuel. — 2023. — 337. — P. 89-94.
2. Wu Q. Polymer Enhanced Foam for Improving Oil Recovery in Oil-wet Carbonate Reservoirs: A Proof of Concept and Insights into the Polymer-surfactant Interactions / Q. Wu // Energy: the International Journal. — 2023. — Vol. 264. — P. 90-98.
3. Рзаев А.Г.О. Системный анализ поверхностно-молекулярных и ионообменных процессов смачивания поровых каналов фильтрации пластовых флюидов / А.Г.О. Рзаев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2022. — 5(365). — С. 50-57.
4. Jafarbeigi E. Identification of novel applications of chemical compounds to change the wettability of reservoir rock: A critical review / E. Jafarbeigi // Journal of molecular liquids. — 2023. — Vol. 371. — P. 112-114.
5. Alvarez-Berrios M.P. Effect of the Surface Charge of Silica Nanoparticles on Oil Recovery: Wettability Alteration of Sandstone Cores and Imbibition Experiments / M.P. Alvarez-Berrios // International Nano Letters. — 2018. — 3. — P. 181-188.
6. Гуськова И.А. Экспериментальные исследования гидрофобизирующих свойств составов, используемых в технологиях гидроразрыва пласта / И.А. Гуськова, Д.Р. Хаярова, Т.Л. Гайфуллин и др. // Нефтепромысловое дело. — 2022. — 8(644). — С. 21-26.
7. Дорфман М.Б. Оценка возможности оптимизации освоения месторождений баженовской свиты с помощью гидрофобизирующих составов / М.Б. Дорфман, А.Н. Проценко // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2021. — 4(124). — С. 45-48.
8. Свалов А.М. Аналитические исследования особенностей фильтрационных процессов в пластах при малой насыщенности вытесняемой фазы / А.М. Свалов // Инженерно-физический журнал. — 2023. — Т. 96. — 1. — С. 51-56.
9. Мустафаева Г.Р.К. Определение водонасыщенности нефтяных пластов / Г.Р.К. Мустафаева, С.Р.К. Мустафаева // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2022. — 3(129). — С. 40-44.
10. Зубков М.Ю. Экспериментальное моделирование процессов гидрофобизации пород различного состава в термоградиентном поле / М.Ю. Зубков // Каротажник. — 2021. — 3(309). — С. 76-99.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Alomair O. Evaluation of the Impact of Low-salinity Water on Wettability Alteration and Oil Recovery in Berea Sandstones / O. Alomair // Fuel. — 2023. — 337. — P. 89-94.
2. Wu Q. Polymer Enhanced Foam for Improving Oil Recovery in Oil-wet Carbonate Reservoirs: A Proof of Concept and Insights into the Polymer-surfactant Interactions / Q. Wu // Energy: the International Journal. — 2023. — Vol. 264. — P. 90-98.
3. Rzaev A.G.O. Sistemnyj analiz poverhnostno-molekulyarnyh i ionoobmennyh processov smachivaniya porovyh kanalov fil'tracii plastovyh flyuidov [System Analysis of Surface-molecular and Ion-exchange Processes of Wetting of Pore Channels of Formation Fluids Filtration] / A.G.O. Rzaev // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij [Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields]. — 2022. — 5(365). — P. 50-57. [in Russian]
4. Jafarbeigi E. Identification of novel applications of chemical compounds to change the wettability of reservoir rock: A critical review / E. Jafarbeigi // Journal of molecular liquids. — 2023. — Vol. 371. — P. 112-114.
5. Alvarez-Berrios M.P. Effect of the Surface Charge of Silica Nanoparticles on Oil Recovery: Wettability Alteration of Sandstone Cores and Imbibition Experiments / M.P. Alvarez-Berrios // International Nano Letters. — 2018. — 3. — P. 181-188.
6. Guskova I.A. Eksperimental'nye issledovaniya gidrofobiziruyushchih svoystv sostavov, ispol'zuemyh v tekhnologiyah gidrorazryva plasta [Experimental Studies of Hydrophobic Properties of Compositions Used in Hydraulic Fracturing Technologies] / I.A. Guskova, D.R. Khayarova, T.L. Gaifullin et al. // Neftepromyslovoye delo [Oilfield Engineering]. — 2022. — 8(644). — P. 21-26. [in Russian]
7. Dorfman M.B. Ocenka vozmozhnosti optimizacii osvoeniya mestorozhdenij bazhenovskoj svity s pomoshch'yu gidrofobiziruyushchih sostavov [Estimation of the Possibility of Optimizing the Development of Deposits of the Bazhenov Formation with the Help of Water-repellent Compositions] / M.B. Dorfman, A.N. Protsenko // Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa [Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex]. — 2021. — 4(124). — P. 45-48. [in Russian]
8. Svalov A.M. Analiticheskie issledovaniya osobennostej fil'tracionnyh processov v plastah pri maloj nasyshchennosti vytesnyajemoj fazy [Analytical Studies of the Features of Filtration Processes in Reservoirs with Low Saturation of the

Displaced Phase] / A.M. Svalov // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Engineering and Physical Journal]. — 2023. — Vol. 96. — 1. — P. 51-56. [in Russian]

9. Mustafayeva G.R.K. Opredelenie vodonasyshchennosti neftyanyh plastov [Determination of Water Saturation of Oil Reservoirs] / G.R.K. Mustafaeva, S.R.K. Mustafaeva // Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa [Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex]. — 2022. — 3(129). — P. 40-44. [in Russian]

10. Zubkov M.Yu. Eksperimental'noe modelirovanie processov gidrofobizacii porod razlichnogo sostava v termogradientnom pole [Experimental Modeling of Processes of Hydrophobization of Rocks of Different Composition in a Thermogradient Field] / M.Yu. Zubkov // Karotazhnik [Logger]. — 2021. — 3 (309). — P. 76-99. [in Russian]