

УДК 622.24.063.2  
Статья / Article  
© ПНИПУ / PNRPU, 2023



### Повышение экологичности технологических жидкостей, применяемых для бурения скважин

Ю.С. Лаврентиади, Е.Л. Леушева

Санкт-Петербургский горный университет (Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, 2)

### Increasing the Environmental Friendly of Process Fluids Used for Well Drilling

Yuriy S. Lavrentiadi, Ekaterina L. Leusheva

Saint Petersburg Mining University (2 21st line, Vasilyevsky island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation)

Получена / Received: 12.09.2022. Принята / Accepted: 19.12.2022. Опубликовано / Published: 31.05.2023

#### Ключевые слова:

буровые промывочные жидкости, буровые растворы, «зеленые добавки», биоотходы, экологически чистые добавки, свойства бурового раствора, растворы на водной основе, плотность бурового раствора, фильтрация раствора, реологические параметры.

#### Keywords:

drilling washing fluids, drilling fluids, green additives, biowaste, environmentally friendly additives, drilling fluid properties, water-based fluids, drilling fluid density, fluid filtration, rheological parameters.

Важным аспектом бурения углеводородов является использование буровых растворов, которые удаляют буровой шлам и стабилизируют ствол скважины, обеспечивая лучшую фильтрацию. Свойства буровых растворов важны для успеха любой буровой операции. Жидкости изначально были разработаны для обеспечения возможности и экономичности вращательного бурения подземных пластов. Кроме того, буровые растворы предназначены для образования фильтровальной корки, которая в основном предназначена для уменьшения потерь фильтрата в пласт, является тонкой и удерживает буровой раствор в стволе скважины. Одной из наиболее важных функций буровых растворов является сведение к минимуму количества фильтрата бурового раствора, поступающего в углеводородсодержащий пласт, что может привести к повреждению пласта из-за изменения смачиваемости породы, миграции мелких частиц, закупорки бурового раствора твердыми частицами и несовместимости с пластовой водой. Для стабилизации этих свойств в буровые растворы применяют ряд добавок, обеспечивающих удовлетворительные реологические и фильтрационные свойства жидкости. Однако обычно используемые добавки опасны для окружающей среды; при утилизации буровых растворов после буровых работ они вместе с буровым шламом и добавками сбрасываются в водоёмы и вызывают нежелательное загрязнение. Следовательно, эти добавки следует заменить добавками, которые не наносят вреда окружающей среде и обеспечивают превосходные характеристики. В связи с этим биоразлагаемые добавки необходимы для будущих исследований. В обзорной статье представлено исследование роли различных биоотходов в качестве потенциальных добавок для использования в буровых растворах на водной основе. Рассмотрено использование наноматериалов, полученных из отходов, а также проведены реологические и фильтрационные исследования буровых растворов на водной основе, чтобы оценить влияние отходов в качестве добавок на характеристики буровых растворов.

An important aspect of hydrocarbon drilling is the use of drilling fluids that remove cuttings and stabilize the wellbore, providing better filtration. The properties of drilling fluids are essential to the success of any drilling operation. Fluids were originally developed to enable and cost effectively rotary drilling in subterranean formations. In addition, drilling fluids were designed to form a filter cake, which was primarily designed to reduce filtrate loss to the formation, was thin, and retained the drilling fluid in the wellbore. One of the most important functions of drilling fluids is to minimize the amount of drilling fluid filtrate entering a hydrocarbon containing formation, which can cause damage to the formation due to changes in rock wettability, fines migration, mud plugging with solids, and formation water incompatibility. To stabilize these properties, a number of additives are used in drilling fluids to ensure satisfactory rheological and filtration properties of the fluid. However, the commonly used additives are hazardous to the environment: when drilling fluids are disposed of after drilling operations, they, together with drill cuttings and additives, are discharged into water bodies and cause unwanted pollution. Therefore, these additives should be replaced with additives that are environmentally friendly and provide superior performance. In this regard, biodegradable additives are needed for future research. The review article presents an investigation into the role of various biowastes as potential additives for use in water-based drilling fluids. The use of waste-derived nanomaterial was considered, and rheological and filtration studies of water-based drilling fluids were carried out to evaluate the effect of waste additives on the performance of drilling fluids.

© Лаврентиади Юрий Семенович – студент кафедры бурения скважин (тел.: +007 (918) 051 55 75, e-mail: lavrentiadi.yury@yandex.ru).

© Леушева Екатерина Леонидовна (ORCID ID: 0000-0002-0510-7769) – доцент кафедры бурения скважин, кандидат технических наук (тел.: +007 (911) 709 71 47, e-mail: Leusheva\_EL@pers.spmi.ru). Контактное лицо для переписки.

© Yuriy S. Lavrentiadi – Student at the Well Drilling Department (tel.: +007 (918) 051 55 75, e-mail: lavrentiadi.yury@yandex.ru).

© Ekaterina L. Leusheva (Author ID in Scopus: 56609312400; ORCID ID: 0000-0002-0510-7769) – PhD in Engineering, Associate Professor at the Well Drilling Department (tel.: +007 (911) 709 71 47, e-mail: Leusheva\_EL@pers.spmi.ru). The contact person for correspondence.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лаврентиади Ю.С., Леушева Е.Л. Повышение экологичности технологических жидкостей, применяемых для бурения скважин // Недропользование. – 2023. – Т.23, №1. – С.32-43. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.5

Please cite this article in English as:

Lavrentiadi Yu.S., Leusheva E.L. Increasing the Environmental Friendly of Process Fluids Used for Well Drilling. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2023, vol.23, no.1, pp.32-43. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.5

## Введение

Буровые работы производятся для добычи нефти и газа из природных резервов глубоко под землей [1]. Для облегчения добычи углеводородов из земли бурят глубокую скважину, формируя ее ствол. Использование технологических жидкостей является важным фактором в процессе бурения, и эти жидкости играют множество ролей, например, для удаления бурового шлама и контроля пластового давления [2, 3]. Существуют химические добавки, используемые в буровом растворе, которые показали желаемые свойства. Однако эти добавки не поддаются биологическому разложению и опасны для окружающей среды [4]. В результате исследователи стали стремиться найти альтернативные добавки, которые являются экологически безопасными, биоразлагаемыми и устойчивыми, сохраняя при этом эффективные свойства буровых растворов [5].

Реологические свойства буровых растворов имеют жизненно важное значение для осуществления их правильного выбора для любой скважины. Реологические свойства буровых растворов связаны с такими процессами, как очистка скважины, сохранение эрозии, удаление режущего материала, гидравлический расчет и насосная система. Успех любой операции бурения в значительной степени зависит от производительности и экономической эффективности используемого бурового раствора.

Буровые растворы обычно классифицируются на:

1. Жидкости на основе воздуха или пены, которые используются там, где жидкий буровой раствор не является наиболее желательной циркулирующей средой.

2. Жидкость на углеводородной основе.

3. Жидкость на водной основе.

Исходя из экологических соображений и соображений стоимости, жидкости на водной основе обладают свойствами, которые обычно предпочтительнее, чем жидкости на углеводородной основе. Буровые растворы должны быть экологически чистыми и содержать минимально возможное количество загрязняющих веществ. Поэтому следует проявлять осторожность при выборе сырья. В настоящее время для регулирования потерь жидкости и вязкости буровых растворов используются различные полимеры, которые могут быть в форме природных (например, крахмал), синтетических и/или модифицированных (например, карбоксиметилцеллюлоза, или КМЦ) полимеров [6, 7].

При бурении нефтяных скважин эти полимеры уменьшают фильтрат, изменяют реологические свойства, стабилизируют сланец и уменьшают сопротивление, а также могут быть использованы в процессах повышения нефтеотдачи пластов [8]. Приток жидкой фазы, известной как фильтрат, в продуктивные зоны может привести к значительному снижению проницаемости и, следовательно, к снижению производительности скважины. Включение натуральных смол и материалов на основе крахмала в составы буровых растворов было основным решением для контроля этого явления.

Буровые растворы должны решать несколько задач, возникающих в процессе бурения. Например, буровые конструкции, возводимые в ходе этого

процесса, изготовлены из металла и, таким образом, подвержены коррозии, что, в свою очередь, влияет на общую операцию бурения. Добавка к буровому раствору, обладающая хорошими антикоррозионными свойствами, может эффективно решить эту проблему. Другой проблемой является чрезмерная потеря циркуляции жидкостей в фильтратную среду, что относительно дорого. Для решения этой проблемы добавка бурового раствора должна способствовать хорошему контролю циркуляции, а также образованию и толщине глинистой корки. Обрушение ствола скважины также может происходить из-за взаимодействия и реакции буровых растворов с пластовыми флюидами. Буровой раствор должен содержать добавку, которая образует глинистую корку подходящей толщины, чтобы предотвратить прихват трубы и сохранить стабильность ствола скважины [7].

Другие возможные сценарии бурения включают отказ оборудования при заканчивании ствола скважины как процесса подготовки ствола скважины перед стадией добычи, чтобы гарантировать выход желаемых углеводородов из пласта в ствол скважины, а затем наружу. В этой ситуации к буровому раствору требуются добавки, способные контролировать скважину и предотвращать любые существенные повреждения до тех пор, пока оборудование не будет отремонтировано. Другим важным аспектом бурового раствора является его способность контролировать pH, реологию и, в частности, пластическую вязкость, предел текучести и прочность геля. pH влияет на процесс диспергирования и может сильно повлиять на физические свойства бурового раствора, такие как свойства фильтрационной корки.

Так было определено, что тамариндовая камедь и полианионная целлюлоза показали лучшие реологические свойства и эффективность контроля потерь фильтрата в нефтяной скважине, а также значительно уменьшили повреждение пласта.

Также ученые обнаружили, что экстракты кешью и манго улучшают коррозионную стойкость буровых растворов на водной основе, доказывая, что эти материалы являются хорошими ингибиторами коррозии, и пришли к выводу, что использование экстрактов листьев растений повышает эффективность добавок. Точно также определили, что волокнистые пищевые отходы безвредны для окружающей среды и улучшают характеристики буровых растворов на водной основе с точки зрения широкого спектра факторов, таких как лучший контроль pH, контроль водоотдачи, контроль толщины глинистой корки и реологические свойства. Кроме того, было обнаружено, что биоразлагаемый травяной порошок (GP) по сравнению с крахмалом, который является широко используемой добавкой, способен контролировать потерю циркуляции жидкости. Хотя крахмал показал лучшие реологические свойства, чем травяной порошок, это указывает на то, что траву можно использовать в качестве вспомогательного средства в сочетании с крахмалом для получения более экологически чистой добавки.

Кроме того, было установлено, что экстракты листьев хны и экстракт листьев гибискуса улучшают

реологические и фильтрационные свойства бурового раствора на водной основе по сравнению с обычной добавкой, используемой в промышленности. Также были проведены исследования экстракта листьев хны с точки зрения его эффективности при транспортировке черенков во время буровых работ. Выявлено, что листья хны эффективны и обладают улучшенными реологическими и фильтрующими свойствами в условиях термического старения [8].

Существует множество добавок для буровых растворов. Эти добавки к буровому раствору представляют собой химические вещества, добавляемые в буровой раствор с целью изменения свойств и состава бурового раствора. Тем не менее много усилий было уделено составлению бурового раствора, главным образом, для повышения качества и функциональности буровых растворов, а также для соблюдения более строгих законов о загрязнении окружающей среды или морской среды. Некоторые из них используются для контроля pH, то есть для контроля химических реакций (ингибирования или усиления) и смягчения коррозии буровой колонны. Поскольку сейчас используются синтетические добавки, несколько ученых ориентировали свои исследования на применение натуральных продуктов в качестве добавок к этим химическим веществам. Был исследован потенциал стручков какао, кожуры подорожника, рисовой шелухи и скорлупы арахиса в качестве ингибиторов коррозии. Экстракты стручков какао обладают высоким потенциалом ингибирования коррозии по сравнению с синтетическим гидроксидом калия (KOH). Также было обнаружено, что экстракт стручков какао более стабилен термически и очень эффективен в снижении потерь при фильтрации при высоких температурах. Однако он продемонстрировал тенденцию к разжижению, поскольку для улучшения его реологии буровому раствору потребовался дополнительный вязкофиксатор. Экспериментальное исследование использования жженого подорожника и банановой кожуры в местном буровом растворе на водной основе в качестве добавок для борьбы с коррозией показало, что, хотя кожура подорожника была более эффективной, чем банановая, для повышения pH, обе местные добавки увеличили pH бурового раствора до 9,5–12,5, что соответствует импортному гидроксиду натрия [9].

Свойства смеси, приготовленной с различными концентрациями целлюлозы, обработанной из кукурузных початков, сравнивались со свойствами стандартной смеси, приготовленной из полианионной целлюлозы. Результаты показали, что pH, плотность ила, удельный вес ила, приготовленного из целлюлозы кукурузных початков, выше, чем у стандартного ила, но реология приготовленного ила была ниже, чем у стандартного ила. Результаты показывают, что целлюлоза, полученная из кукурузы, может значительно снизить потери жидкости в буровом растворе на водной основе, что позволяет предположить, что целлюлоза является хорошим средством для контроля потерь жидкости [5]. Трава, добавленная в бентонитовый буровой раствор, улучшила реологические свойства, такие как кажущаяся и пластическая вязкость, а также прочность

геля. Фильтрационные характеристики бентонитового бурового раствора также были улучшены, поскольку для всех образцов наблюдались более низкие потери на фильтрацию. Однако проведенный тест на pH показал, что добавление травы снижает pH бурового раствора [10].

В буровой промышленности в настоящее время используется множество добавок, обеспечивающих удовлетворительные характеристики бурового раствора. Однако было обнаружено, что эти материалы опасны как для рабочей силы, работающей на объекте, так и для окружающей среды. Были проведены обширные исследования возможных альтернативных добавок к буровым растворам, отвечающих двум условиям: во-первых, добавка обеспечивает свойства, требуемые от буровых растворов; и, во-вторых, он экологически чистый, биоразлагаемый и устойчивый. В данном обзоре представлены исследования, проведенные с использованием различных экологически безопасных добавок из отходов в буровые растворы на водной основе. В частности, оценивается влияние этих добавок на реологические свойства, такие как пластическая вязкость, предел текучести, прочность геля, потеря фильтрата и толщина глинистой корки.

#### Общемировые научные достижения по выбранной теме научных исследований

Основные функции буровых растворов включают удаление бурового шлама и очистку ствола скважины, смазку и охлаждение бурового долота и колонны, поддержание пласта ствола скважины и предотвращение выброса скважины [11]. Таким образом, буровой раствор играет важную роль в нефтегазовой отрасли. В качестве основного фактора успеха процессов бурения свойства буровых растворов постоянно контролируются и регулируются в соответствии с рекомендациями Американского института нефти (API) «Рекомендуемая практика 13B-1 для WBDF» и «Рекомендуемая практика 13B-2 для OBDF». На основе рекомендуемой практики API 13B-1 Международная организация по стандартизации (ISO) подготовила и изложила стандарт ISO 101 414 под общим названием «Нефтяная и газовая промышленность – полевые испытания буровых растворов» (API, 2009). В стандарте ISO 10 414 изложены стандартные процедуры регулярного определения и мониторинга свойств бурового раствора для обеспечения максимальной производительности бурения. Эти процедуры совершенствуются и периодически пересматриваются с появлением новых исследований и разработок.

#### Плотность или вес бурового раствора

Плотность или вес бурового раствора является важным свойством буровых растворов, которое улучшает стабильность ствола скважины и поддерживает пластовое давление. Низкая плотность бурового раствора может привести к разрушению пород при сдвиге, известному как прорыв ствола скважины, который впоследствии разрушает ствол скважины. Однако есть вероятность возможной потери циркуляции,

снижения скорости проходки и повреждения пласта из-за чрезмерных значений плотности бурового раствора. Таким образом, исследователи работали над созданием надежного маршрута, т.е. модели PSO-ANN, для оценки наиболее подходящей плотности буровых растворов в условиях ствола скважины НТНР [12].

### Пластическая вязкость

Вязкость измеряет внутреннее сопротивление буровых растворов, тогда как пластическая вязкость (PV) представляет собой удельное сопротивление потоку, вызванное трением между твердыми частицами в буровых растворах и слоями жидкости. PV зависит от вязкости базовых жидкостей, т. е. воды и масла, и концентрации твердых частиц. Короче говоря, увеличение веса бурового раствора или содержания твердых частиц в буровых растворах приводит к более высокому PV, что нежелательно, поскольку снижает скорость бурения. Побочные эффекты, вызванные PV, были уменьшены добавлением воды или разбавляющей добавки [13].

### Предел текучести

Предел текучести (YP) определяется как измеренная степень разжижения при сдвиге неньютоновских буровых растворов. Это способность переносить буровой шлам во взвешенном состоянии при циркуляции в стволе скважины и вне затрубного пространства. Таким образом, можно предотвратить такие проблемы при бурении, как дифференциальный прихват. По мере того, как твердые частицы добавки уменьшаются в размерах, YP увеличивается. Это связано с увеличением сил притяжения между твердыми частицами, которые повышают несущую способность бурового шлама и очищают ствол скважины [13].

### Прочность геля

Прочность геля (GS) измеряет силы притяжения между частицами в статических условиях, в отличие от YP, который измеряет их в динамических условиях. Таким образом, прочность геля относится к способности удерживать буровой шлам во время соединений или других статических условиях. По мере того, как оно увеличивается с течением времени, требуется большее давление, чтобы преодолеть накопленную прочность геля и инициировать циркуляцию [14].

### Потери фильтрата и толщина глинистой корки

Фильтрация или водоотдача измеряют количество жидкости, которая проникает в твердую глинистую корку. Согласно предыдущим исследователям, буровые растворы проникают в пласты скважин в ответ на большее гидростатическое давление жидкостей по сравнению с поровым давлением. Это приводит к образованию глинистой корки, так как поры заполняются взвешенными твердыми частицами из бурового раствора. Следовательно, скорость потери

фильтрата и толщина глинистой корки уменьшаются по мере увеличения концентрации твердых частиц в буровых растворах. Как скорость фильтрации, так и толщина глинистой корки являются контролируемыми свойствами буровых растворов. Это связано с тем, что большие потери фильтрата и толщина глинистой корки потенциально могут привести к заеданию дифференциальной трубы. Исключительная глинистая корка обладает чрезвычайно низкой проницаемостью, будучи одинаково тонкой, прочной и сжимаемой. Контроль фильтрации является дорогостоящим из-за необходимости использования многих факторов контроля, таких как концентрация буровых растворов, размер и тип взвешенных твердых частиц, концентрация добавок для контроля водоотдачи (FLC) и термическая стабильность системы.

Население мира, которое в настоящее время составляет 8 млрд человек и растет на 1,1 % в год, зависит от потребления природных ресурсов Земли. Отходы – это не пригодные к использованию материалы, которые превысили срок их использования и были выброшены. К сожалению, следствием этого продолжающегося потребления является распространение отходов всех разновидностей.

Отходы включают в себя твердые бытовые отходы (ТБО), а именно обычные предметы, потребляемые и выбрасываемые населением, и представляют собой наиболее быстрорастущую форму отходов из-за их распространенности в городском обществе. Было подсчитано, что к 2025 г. объем ТБО увеличится примерно до 1,42 кг на душу населения в день (2,2 млрд тонн в год), создаваемых 4,3 млрд городских жителей. Авторы также подсчитали, что в Азии ежедневно будет образовываться 1,8 млн тонн ТБО.

Другие виды отходов образуются из различных источников, включая бытовые и коммерческие; пепел; животные; биомедицинская и строительная отрасли; и канализация. Эти отходы могут включать твердые промышленные отходы, биоразлагаемые и небiorазлагаемые отходы и опасные отходы.

Некоторые из этих видов отходов представляют серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Клинические отходы, которые производятся медицинскими клиниками, больницами и лабораториями, несут риск заражения и могут распространять заболевание, если не обращаться с ними должным образом [15].

Электрические и электронные отходы (Е-отходы) из электронного оборудования, такого как кабели, провода, шнуры и батареи, выделяют опасные вещества и, таким образом, наносят серьезный вред тем, кто с ними контактирует, особенно работникам перерабатывающей промышленности. Кроме того, обращение с отходами требует переработки опасных отходов с использованием различных подходов.

Пищевые отходы – это серьезная глобальная проблема, вызванная такими факторами, как плохая обработка и управление пищевыми продуктами, неадекватное планирование потребления пищи в домашних хозяйствах и чрезмерное приготовление пищи в пищевой

промышленности и производстве напитков. Тем не менее проблема пищевых отходов может быть эффективно решена, если отходы могут быть утилизированы и повторно использованы для различных целей. Накопление пищевых отходов на свалках приводит к образованию газа метана и дальнейшему загрязнению воздуха [16].

### Отходы в буровых растворах

Значительный объем исследований был проведен в отношении использования пищевых отходов в нефтяной и газовой буровой промышленности. Например, ряд ученых исследовали использование порошка кожуры мандарина в экологически чистой жидкой добавке в качестве альтернативы небioresлагаемым добавкам, наносящим вред окружающей среде. Они использовали порошок кожуры мандарина в качестве экологически чистой альтернативной добавки к жидкости по сравнению с эталонным полимером PAC-LV. Добавка порошка кожуры мандарина дала лучшие результаты, поскольку она смогла значительно снизить pH и уменьшить потери при циркуляции жидкости при низкой концентрации порошка. Таким образом, было показано, что порошок кожуры мандарина является хорошей добавкой для снижения pH, контроля вязкости и уменьшения потери циркуляции. Это исследование поощряло использование пищевых отходов в качестве подходящей альтернативы небioresлагаемым химическим веществам, которые в настоящее время используются в буровой промышленности [17].

Кроме того, было признано, что трава, сено и пальмовые листья также являются приемлемыми кандидатами. Исследование подтвердило, что пищевые отходы могут быть переработаны для обеспечения экологически чистой работы нефтегазовой отрасли. Трава использовалась в качестве добавки для приготовления экологически чистого бурового раствора с различными размерами частиц и концентрациями. Полученные результаты показывают, что трава, добавленная в бентонит бурового раствора (все концентрации при различных размерах частиц), улучшила реологические свойства, такие как кажущаяся и пластическая вязкость, а также прочность геля. Фильтрационные характеристики бентонитового бурового раствора также улучшились, поскольку во всех образцах наблюдались более низкие потери на фильтрацию. Тесты, проведенные на pH, показали, что добавление травы снижает pH бурового раствора.

Трава предлагается в качестве модификатора реологии, средства для контроля фильтрации, а также средства для контроля щелочности для бурового раствора. Мы также рекомендуем проводить исследования с этой добавкой при повышенных температурах для анализа ее характеристик, чтобы можно было принять обоснованное решение в пользу предлагаемой травы, которая может быть лучшим выбором для замены нынешних токсичных химикатов.

В нефтяной и газовой буровой промышленности добавки к буровым растворам используются для

различных целей, таких как регулирование pH и придание реологических свойств, таких как пластическая вязкость, прочность геля и предел текучести. Эти добавки также должны решать такие проблемы, как контроль потери циркуляции, целостность ствола скважины, заканчивание ствола скважины и ингибирование коррозии для обеспечения плавного бурения. Однако в настоящее время химические вещества, используемые для этих целей, не поддаются биологическому разложению и могут оказывать значительное негативное воздействие на окружающую среду [18]. Экологичным решением будет использование биоразлагаемых химикатов, не наносящих вреда окружающей среде и в то же время обеспечивающих желаемые свойства хорошего бурового раствора.

Недавние исследования показали влияние различных добавок, полученных из отходов, на эффективные реологические свойства буровых растворов. Например, было исследовано влияние использования порошка семян тамаринда на плотность бурового раствора. Плотность бурового раствора является одним из важных свойств буровых растворов и помогает обеспечивать и регулировать стабильность ствола скважины и контролировать пластовое давление. В ходе исследования было установлено, что плотность образца бурового раствора увеличивается при добавлении порошка семян тамаринда и комбинации бентонита. Увеличение концентрации порошка семян тамаринда привело к получению более толстого образца бурового раствора и увеличению плотности бурового раствора. Плотность бурового раствора в образцах находилась в диапазоне 8,22–8,97 фунтов на галлон, что считается подходящим диапазоном для использования в качестве добавки в состав буровых растворов [19].

Также продемонстрировано использование экологически чистой бамии в качестве жизнеспособной альтернативной добавки к буровым растворам. Эффективность бамии в качестве добавки оценивали при отсутствии и наличии глины в буровых растворах. Для сравнения: введение бамии в буровые растворы на глинистой основе показало большее улучшение реологических свойств по сравнению с буровыми растворами, не содержащими глины. В буровых растворах на глинистой основе добавление 2 и 3 г бамии привело к увеличению пластической вязкости (PV) более чем на 100 % по сравнению с добавлением 2 г крахмала, что дало прирост только на 45,7 %. Увеличение концентрации бамии также привело к увеличению предела текучести буровых растворов. Однако было замечено, что крахмал более эффективно повышает предел текучести, чем бамия. Кроме того, толщина фильтрационной корки уменьшилась при добавлении бамии, при этом дальнейшее уменьшение стало очевидным при более высоких концентрациях.

Эффективность порошка бамии в качестве регулятора потерь жидкости была исследована путем проведения испытаний на потери жидкости на буровых растворах на основе бамии. Кроме того, были проведены реологические испытания для определения влияния добавления бамии на буровые

растворы. Различные буровые растворы были приготовлены на основе различных концентраций порошка бамии и протестированы [20].

Кроме того, были предложены шафрановые пурпурные лепестки в качестве экологически чистой альтернативы добавкам в буровые растворы. Добавление порошка лепестков шафрана в буровой раствор привело к эффективному увеличению значений PV. По мере увеличения концентрации порошка лепестков пурпурного шафрана значение PV также увеличивается. Кроме того, введение данного порошка в буровой раствор также значительно повышает предел текучести по сравнению с базовым буровым раствором. Включение порошка шафрановых пурпурных лепестков в буровой раствор продемонстрировало отличные потери фильтрата, при этом объем фильтрата постепенно уменьшался с увеличением концентрации порошка. Его добавление в буровой раствор также привело к уменьшению толщины глинистой корки по сравнению с базовым раствором [21].

Наноматериалы представляют собой изготовленные вещества размером от 1 до 100 нанометров (нм) и, следовательно, используются в чрезвычайно малых дозировках. Наноматериалы широко применяются в различных областях, таких как фармацевтика, автомобилестроение, электроника, и, прежде всего, в ряде областей химической промышленности. Примером этого является буровая промышленность [22].

Для облегчения бурения скважины буровые растворы являются жизненно важным фактором для успешного бурения; то есть жидкости помогают удалить буровой шлам и фрагменты из зоны бурения и ствола скважины.

Наноматериалы имеют чрезвычайно высокое отношение площади поверхности к объему из-за их наноразмерных частиц. Следовательно, WBDF, содержащий активные агенты наноматериалов, обладает улучшенной физической и химической чувствительностью, что повышает эффективность его работы по сравнению с OBDF. В дополнение к преимуществам по сравнению с OBDF, улучшенный WBDF на основе нанотехнологий также дешевле и безопаснее для окружающей среды. Например, графитовые наноматериалы являются превосходными связующими и успешно используются для создания плотной, непроницаемой и более тонкой глинистой корки. Это позволяет физически соединять нанопоры, тем самым снижая потери воды при формировании сланцевых пород. Следовательно, использование семейства графенов повышает устойчивость ствола скважины [23].

Кроме того, наноматериалы также используются в качестве смазочных материалов для уменьшения трения между стволом скважины и бурильной колонной, что, следовательно, снижает вероятность прихвата трубы.

Например, было обнаружено, что добавление следов наноматериалов в буровой раствор, тем самым происходит превращение его в наножидкость, играет важную роль в улучшении качества глинистой корки и уменьшает прилипание трубы к пласту, способствует хорошей устойчивости ствола скважины и защите коллектора, а также

увеличивает нефтеотдачу продуктов как нефти, так и газа. Это стало возможным благодаря модификации жидкости, вызванной наночастицами, что способствовало ее превосходным характеристикам [24].

Еще одно отражение этого вывода получено в ряде исследований, в которых авторы установили, что наноматериалы помогли улучшить качество глинистой корки и снизить потери при циркуляции. В дополнение к этим качествам они также обнаружили, что, когда наноматериалы использовались в качестве загустителей, эмульгаторов и смазочных материалов, они улучшали качество очистки ствола скважины, устойчивость ствола скважины и защиту пласта, а также увеличивали нефте- и газоотдачу [25].

Другие исследователи проанализировали важные параметры, связанные с использованием наноматериалов. Это исследование выделяет ключевые факторы, которые необходимо учитывать для обеспечения хороших характеристик буровых растворов [26].

В дополнение к материалам, полученным из отходов, недавние исследования представили наноматериалы как многообещающую альтернативу для использования в качестве добавок в буровые растворы. Например, было оценено влияние  $Fe_3O_4$ -наноккомпозит карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) в качестве добавки для контроля водоотдачи в буровых растворах. В данном исследовании изучалось влияние на реологические свойства бурового раствора с добавлением соли и без нее. Исследование показало, что использование наноккомпозита повышает вязкость бурового раствора в обоих условиях. По результатам исследования в целом предел текучести бурового раствора дополнительно повышается с увеличением концентрации наноккомпозита. Было замечено, что добавление наноккомпозита в буровой раствор позволяет получить более тонкую фильтровальную корку по сравнению с системой бурового раствора СМС [27].

Важность добавления соответствующих концентраций добавок в буровой раствор для улучшения свойств исследовали добавлением различных концентраций оксида меди (CuO), также называемого полиакриламидным наноккомпозитом, к буровому раствору на водной основе. Было обнаружено, что повышенная концентрация значительно минимизировала потери жидкости и толщину фильтрационной корки по сравнению с отсутствием наноккомпозитов. Были замечены более высокие вязкость, теплопроводность и благоприятная пористость фильтрационной корки [28].

Еще одно важное различие было сделано путем сравнения характеристик бурового раствора в соленой и несолёной воде. Обнаружено, что оба типа показали наилучшие характеристики при определенных условиях, и что определенная концентрация соли может обеспечить наилучшие характеристики как для соленой, так и для несолёной воды. Это исследование снова показало, что добавки играют жизненно важную роль в характеристиках бурового раствора [29].

Также было изучены другие наноматериалы, такие как графен и оксид магния (MgO), в различных

концентрациях и отдельно в сочетании с коммерческим нанобентонитом, чтобы наблюдать за работой жидкости. Добавление MgO с наноматериалами привело к улучшению потерь на фильтре и предела текучести. Это свидетельствует, что широкий спектр добавок в соответствующих концентрациях может улучшить характеристики буровых растворов [30].

Графеновые материалы широко используются в буровых растворах, поскольку они улучшают реологические свойства этих растворов. Обнаружено, что использование добавки оксида графена в буровых растворах на водной основе улучшило их характеристики поглощения фильтрата, значительно снизив толщину фильтрационной корки и потери жидкости, а также оптимизировало истончение при сдвиге и термическую стабильность. Также было замечено, что графен как в виде чешуек, так и в виде порошка способствует повышению производительности. Это исследование демонстрирует, что присутствие добавки влияет на свойства бурового раствора, и показывает, как форма добавки может способствовать свойствам с добавленной стоимостью [31].

Также было замечено, что обычные водные буровые растворы, подвергающиеся воздействию чувствительного к воде сланца, вызывают поглощение сланцем воды из бурового раствора, что приводит к проблемам во время эксплуатации. Следовательно, буровые растворы на водной основе должны содержать добавки для эффективного ингибирования сланца. Солевые соединения использовались для ингибирования сланца. Однако высокие концентрации солевых соединений повлияли на окружающую экосистему. Концентрация была изменена, и сланец был успешно ингибирован. Это исследование демонстрирует важность оптимальных концентраций добавок в буровых растворах для достижения превосходных характеристик бурового раствора без побочных эффектов [32].

Точно так же был исследован полиоксипропиламин (ПОАМ) в качестве потенциальной добавки. Обнаружено, что ПОАМ улучшает свойства ингибирования сланца в буровых растворах на водной основе. Дополнительным преимуществом ПОАМ является водорастворимость, хорошая совместимость с другими добавками в буровой раствор и нетоксичность. Впоследствии наноматериалы были исследованы в качестве потенциальных добавок для использования в буровых растворах [33].

В буровой промышленности многие исследователи изучали наноматериалы и обнаружили широкий спектр химических веществ, которые могут улучшить свойства буровых растворов. Явным преимуществом использования наноматериалов является то, что их требуемое количество очень мало. Следовательно, использование наноматериалов может сохранить ресурсы. Буровая промышленность тратит миллионы долларов на устранение нестабильности ствола скважины. Использование наноматериалов в качестве добавок к буровым растворам должно быть экономически обоснованным, чтобы можно было

сохранить ресурсы. Например, наноматериалы, которые используются для снижения фильтрации, такие как загустители, эмульсии и глины, могут снизить скорость проникновения воды в сланец, потому что эти наноматериалы достаточно малы, чтобы изолировать сланец, тем самым укрепляя ствол скважины. Исследователи обнаружили, что наночастицы SiO<sub>2</sub>, добавленные к буровым растворам на водной основе, усиливают ингибирование, а также потери фильтрата и реологические свойства. Дополнительным преимуществом является то, что получение наночастиц SiO<sub>2</sub> имеет низкую стоимость из-за их общих методов получения. Было выяснено, что оптимальная концентрация наночастиц SiO<sub>2</sub> составляет менее 1 % мас./об. в сланцевом ингибировании, что составляет очень небольшую и, следовательно, экономичную концентрацию [34].

В других исследованиях предлагаются наночастицы SiO<sub>2</sub> в качестве добавки к буровым растворам на водной основе. Они обнаружили, что наночастицы SiO<sub>2</sub> повышают вязкость жидкости, что позволяет ей более эффективно уносить буровой шлам из ствола скважины. Это обеспечивает чистоту ствола скважины и, следовательно, не создает проблем, когда необходимо снять бур или провести техническое обслуживание [35].

К тому же исследовали использование наночастиц SiO<sub>2</sub> с ксантановой камедью в качестве основы в буровых растворах на водной основе и обнаружили повышенный предел текучести, превосходную способность к очистке скважины, снижение потерь фильтрата и более эффективную смазку бурового долота во время работы по сравнению с бурением жидкости без SiO<sub>2</sub> [36].

Баят и др. изучали четыре типа наночастиц, а именно оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), диоксид титана (TiO<sub>2</sub>), SiO<sub>2</sub> и CuO в бентоните, и их влияние на буровые растворы на водной основе. Они обнаружили, что комбинированные добавки улучшают общие реологические свойства и прочность геля при низких концентрациях по сравнению с базовой жидкостью без наночастиц. Это показывает, что добавки эффективно улучшают реологию при малой концентрации и, таким образом, экономят ресурсы в процессе бурения [37].

В других свежих исследованиях оценили влияние наночастиц оксида цинка (ZnO) на реологические свойства неповреждающего бурового раствора (NDDF). По сравнению с базовым NDDF, NDDF с добавлением наночастиц ZnO проявлял более высокое напряжение сдвига и вязкость. Добавление наночастиц ZnO к NDDF помогло решить проблему деградации NDDF за счет стабилизации вязкости при более высоких температурах. Измерения температурного разветвления показали, что хороший рабочий температурный диапазон базового NDDF составляет от 70 до 80 °C. NDDF, содержащий наночастицы ZnO, продемонстрировал улучшение контроля водоотдачи. Однако было замечено, что повышение давления приводило к уменьшению потери жидкости [38].

Вышеупомянутые исследования продемонстрировали эффективность пищевых отходов в добавках к буровым растворам в качестве заменителя экологически опасных материалов,

используемых в настоящее время в промышленности. В связи с этим необходимо продвигать концепцию «отходы к богатству» путем изучения возможности использования неиспользованных производных отходов в качестве добавок к буровым растворам, а также решать проблему путем изучения реологических свойств добавок, обеспечивающих их жизнеспособность и экономическую эффективность [39].

Одной из важных характеристик буровых растворов является смазывающая способность. Смазывающая способность требуется для уменьшения трения из-за постоянного контакта между стволом скважины и бурильной колонной в горизонтальных и наклонно направленных скважинах. Есть два основных аспекта, касающихся смазывающей способности буровых растворов, которые называются крутящим моментом и сопротивлением. Крутящий момент относится к фрикционному сопротивлению вращению бурильной колонны, тогда как сопротивление описывается как фрикционное сопротивление опусканию и подъему бурильной колонны. По сравнению с буровыми растворами на водной основе, очевидно, что буровые растворы на масляной основе обладают лучшими смазывающими свойствами. Тем не менее буровой раствор на водной основе предпочтительнее бурового раствора на нефтяной основе из-за использования в первом растворов безвредных добавок для окружающей среды. В результате смазочные добавки используются в буровых растворах на водной основе с целью уменьшения трения между стволом скважины и бурильной колонной, снижения вероятности дифференциального прихвата трубы и увеличения скорости бурения [40].

Было представлено исследование теплофизических свойств бурового раствора, содержащего наночастицы, для изучения способности бурового раствора передавать тепло. Использование наночастиц, в том числе наночастиц диоксида титана и углеродных нанотрубок (УНТ), было предложено в связи с тем, что наночастицы обладают высокой удельной поверхностью, что может увеличить скорость теплопередачи. Исследование показало, что буровые растворы, интегрированные с УНТ, демонстрируют более высокий процент отношения конвективного тепла к кондуктивному теплу по сравнению с растворами, в которых используются наночастицы диоксида титана. Таким образом, УНТ не рекомендуются для улучшения коэффициента или уровня конвективной теплопередачи. Кроме того, в исследовании наблюдалось увеличение скорости теплопередачи и коэффициента конвективной теплопередачи при уменьшении среднего размера диоксида титана и УНТ соответственно. Это указывает на то, что размер наночастиц является важным параметром, который следует учитывать при использовании наночастиц в буровых растворах [41].

В буровых растворах смазывающая способность снижает крутящий момент и силу сопротивления. Как правило, смазывающая способность буровых растворов измеряется снижением крутящего момента, которое можно определить с помощью

коэффициента трения (CoF). CoF определяется как отношение силы трения между двумя телами к силе, прижимающей их друг к другу. В идеале хороший смазочный материал должен обладать благоприятными свойствами, включая высокую вязкость, высокую прочность смазочной пленки, низкую воспламеняемость, низкую коррозию и высокую растворимость, а также должен быть нетоксичным. Добавление минимального количества смазочных материалов достаточно для обеспечения адекватной смазывающей способности буровых растворов [42].

В исследованиях сообщалось о различных типах добавок, используемых в качестве смазки для буровых растворов, включая модифицированные растительные масла и очищенные полиолы. Комбинация полиолов и бурового раствора изменяет характеристики смачивания бурового раствора, заставляя его вести себя аналогично нефтяному буровому раствору [43]. Следовательно, смазывающая способность и стабильность бурового раствора значительно улучшаются. Однако полиолы могут также изменять смачиваемость пород-коллекторов, приводя к образованию водоблоков [44]. В настоящее время полиалкиленгликоли (ПАГ) и полиальфаолефины (ПАО) являются наиболее распространенными типами смазочных материалов, используемых в буровых растворах [45]. ПАО предпочтительнее использовать в синтетических буровых растворах из-за их замечательных смазывающих свойств, и они применяются для очистки ствола скважины, стабилизации сланца, а также для охлаждения и смазки долот [46]. Тем не менее ПАО обладают недостатками, включая небольшой диапазон вязкости и низкую полярность [47].

В последние десятилетия растет интерес к использованию наноматериалов в качестве присадок к смазочным материалам. Этот интерес был мотивирован движением в отрасли к использованию буровых растворов на водной основе из-за экологических проблем, связанных с использованием буровых растворов на нефтяной основе и синтетических буровых растворов [48, 49]. Новые свойства наночастиц предлагают множество потенциальных применений, особенно в нефтегазовой промышленности. Недавно было продемонстрировано потенциальное использование экологически чистых наночастиц для использования в буровых растворах. Этот подход значительно улучшил смазывающие и реологические свойства бурового раствора за счет асимметричной морфологии наночастиц, что облегчило вращение поверхностей «металл – металл» [50].

#### Существующие нерешенные научные проблемы по теме исследования

По результатам последних исследований использование экологически чистых добавок, таких как биоотходы, значительно улучшило характеристики и функциональность буровых растворов.

Однако необходимо решить несколько проблем, прежде чем эти биоотходы можно будет применять и

коммерциализировать в больших масштабах в нефтегазовой промышленности. Одна из ключевых проблем заключается в том, что исходные отходы и наноматериалы, полученные из отходов, могут содержать большое количество примесей, что требует дополнительного процесса очистки. Поэтому необходимо провести будущие исследования, чтобы улучшить выход и характеристики производства наноматериалов, полученных из отходов. Схематическое изображение проблем, связанных со сбором отходов и их переработкой, а также взаимосвязанной ролью потребителей в обществе [10].

Кроме того, также важно исследовать новые производные отходы, проводя тесты на старение и экспериментальные исследования в условиях НРПТ для изучения разложения экологически чистой добавки [12].

Кроме того, следует подчеркнуть воздействие наноматериалов, полученных из отходов, на окружающую среду. Эти добавки для отходов могут быть добавлены и оптимизированы в рецептурах WBDF и SBDF в дополнение к рецептурам WBDF [11].

Кроме того, можно провести тщательный всесторонний количественный анализ различных типов «зеленых» добавок и их характеристик, чтобы определить наилучшие реологические улучшения.

В дальнейшем роль экологически чистых добавок, полученных из отходов, будет играть важную роль в приготовлении новых экологически чистых добавок для буровых растворов. Рекомендуется ориентация будущих исследований на выявление зеленой добавки, которая оптимально улучшает существенные реологические и фильтрационные свойства буровых растворов. Поэтому прорыв возможен за счет повышения эффективности буровых работ при одновременном снижении любых вредных рисков для окружающей среды и здоровья персонала [15].

### Методы решения существующих научных проблем

Чтобы внедрить использование материалов, полученных из отходов, необходимы дополнительные исследования, ориентированные на их применение именно в нефтегазовой промышленности. Отходы, такие как пищевые отходы, могут быть использованы в качестве альтернативы вредным и токсичным добавкам, которые обычно используются при бурении. На сегодняшний день исследовано множество материалов, полученных из отходов, из-за их потенциального использования в качестве добавок. Эти материалы включают пищевые отходы, такие как кожура дуриана, и отходы растительного происхождения, такие как семена черного подсолнечника. Роль наноматериалов, полученных из отходов, и ключевые характеристики, способные повысить эффективность бурения, изложены в [8].

Рекомендации этого исследования следующие:

- необходимо провести всестороннее исследование взаимодействий между материалами, полученными из отходов, и содержанием буровых растворов, таких как бентонит;

- экономическая эффективность использования отходов требует большего внимания до коммерциализации, чтобы обеспечить постоянство при получении буровых растворов с улучшенными реологическими свойствами;

- для разработки обширных методологий производства добавок на основе материалов, полученных из отходов, требуется углубленный анализ;

- в будущих исследованиях следует рассмотреть анализ смазывающей способности буровых растворов с использованием материалов, полученных из отходов. Необходимо провести обширный анализ для изучения морфологических свойств буровых растворов;

- возможность преобразования отходов в наноматериалы и воспроизводимость преобразования следует учитывать для различных приложений;

- необходим комплексный количественный анализ наноматериалов, используемых в буровых работах. Особое внимание требуется для определения оптимальных концентраций для улучшения сохранения ресурсов;

- дополнительные исследования должны быть направлены на изучение механизмов взаимодействия между наноматериалами и другими добавками, присутствующими в буровых растворах;

- следует провести сравнение оптимизации буровых растворов между буровыми растворами на водной основе с использованием наноматериалов и буровыми растворами на синтетической и нефтяной основе. Сравнение следует проводить по отношению к обычным базовым жидкостям, подвергающимся воздействию высоких температур и давлений [11].

### Заключение

Увеличение производства отходов вызывает серьезную озабоченность из-за их воздействия на здоровье населения и окружающую среду. В частности, неправильное обращение с пищевыми отходами стало серьезной глобальной проблемой, что вызывает потребность в более эффективных решениях, использующих эти материалы для различных целей.

Основываясь на проведенном анализе, были сделаны следующие выводы:

1. Химические добавки к буровым растворам являются необходимыми компонентами для облегчения буровых работ за счет улучшения свойств растворов, в том числе реологических свойств и потери фильтрата.

2. Пищевые отходы можно рассматривать как устойчивую альтернативу добавкам в буровые растворы, используемые в нефтяной и газовой буровой промышленности.

3. Исследования показали, что материалы, полученные из отходов, включая пищевые отходы, могут стать экологически безопасной альтернативой токсичным обычным химическим добавкам, используемым в буровых растворах на водной основе.

4. Материалы, обобщенные в этой обзорной статье, включают пищевые отходы и отходы, образующиеся от растений.

5. Эффективность этих материалов оценивалась с точки зрения их влияния на предел текучести, пластическую вязкость, потери фильтрата и толщину глинистой корки.

6. Наноматериалы являются жизнеспособными альтернативными добавками для применения в буровых растворах.

7. Наноматериалы можно использовать экономично из-за малых концентраций, необходимых для их эффективного использования в буровых растворах.

8. Смазывающая способность буровых растворов является свойством, которое считается необходимым для обеспечения плавного бурения.

9. На основании обобщенных исследований выявлено, что количества менее 1 г достаточно для изменения смазывающей способности буровых растворов.

10. Для буровых растворов на водной основе требуются смазочные добавки для обеспечения лучшего смазывания и, таким образом, снижения трения при бурении.

### Библиографический список

- Нудкова М.В., Рудяева Е.Ю. Обоснование и разработка технико-технологических решений для повышения эффективности бурения скважин в условиях поглощения промывочной жидкости // Недропользование. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 104–114. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.1
- Литвиненко В.С., Николаев Н.И. Технологические жидкости для повышения эффективности строительства и эксплуатации нефтяных и газовых скважин // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – С. 84.
- Малышкин М.М. Экологизация технологии бурения скважин // Записки Горного института. – 2013. – Т. 203. – С. 63.
- Малышкин М.М. Снижение экологической опасности при ведении буровых работ // Записки Горного института. – 2014. – Т. 207. – С. 186.
- Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Разработка составов промывочных жидкостей для повышения эффективности бурения твердых горных пород // Записки Горного института. – 2016. – Т. 219. – С. 412. DOI: 10.18454/pmi.2016.3.412
- Яковлев А.М. Значение смазывающих добавок при алмазном бурении // Записки Горного института. – 1976. – Т. 71(2). – С. 80.
- Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS / C. Chen, C. Li, G. Reniers, F. Yang // J. Clean. Prod. – 2021. – Vol. 279. – P. 123583. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123583
- Effect of a novel clay/silica nanocomposite on water-based drilling fluids: Improvements in rheological and filtration properties / G. Cheraghian, Q. Wu, M. Mostofi, M.-C. Li, M. Afrand, J.S. Sangwai // Colloids Surf. A. – 2018. – Vol. 555. – P. 339–350. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.06.072
- An investigation on the effects of silica and copper oxide nanoparticles on rheological and fluid loss property of drilling fluids / S. Medhi, S. Chowdhury, D.K. Gupta, A. Mazumdar // J. Pet. Explor. Prod. Technol. – 2020. – Vol. 10. – P. 91–101. DOI: 10.1007/s13202-019-0721-y
- Zheng Y., Amiri A., Polycarpou A.A. Enhancements in the tribological performance of environmentally friendly water-based drilling fluids using additives // Appl. Surf. Sci. – 2020. – Vol. 527. – P. 146822. DOI: 10.1007/s13202-019-0721-y
- Effects of carbon ash on rheological properties of water-based drilling fluids / X. Meng, Y. Zhang, F. Zhou, P.K. Chu // J. Pet. Sci. Eng. – 2012. – Vol. 100. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.petrol.2012.11.011
- Synthesis of a novel environment-friendly filtration reducer and its application in water-based drilling fluids / X. Chang, J. Sun, Z. Xu, K. Lv, Z. Dai, F. Zhang, X. Huang, J. Liu // Colloids Surf. A. – 2019. – Vol. 568. – P. 284–293. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.01.055
- Improvement of rheological and filtration characteristics of water-based drilling fluids using naturally derived henna leaf and hibiscus leaf extracts / A.R. Ismail, N.M. Mohd, N.F. Basir, J.O. Oseh, I. Ismail, S.O. Blkooor // J. Pet. Explor. Prod. Technol. – 2020. – Vol. 10. – P. 3541–3556. DOI: 10.1007/s13202-020-01007-y
- Testing carrageenans with different chemical structures for water-based drilling fluid application / V. de Oliveira, K. dos Santos Alves, A. da Silva-Junior, R. Araújo, R. Balaban, L. Hilliou // J. Mol. Liq. – 2020. – Vol. 299. – P. 112139. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.112139
- Establishing a practical method to accurately determine and manage wellbore thermal behavior in high-temperature drilling / M. Yang, D. Luo, Y. Chen, G. Li, D. Tang, Y. Meng // Appl. Energy. – 2019. – Vol. 238. – P. 1471–1483. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.164
- Ahmad H.M., Kamal M.S., Al-Harathi M.A. High molecular weight copolymers as rheology modifier and fluid loss additive for water-based drilling fluids // J. Mol. Liq. – 2018. – Vol. 252. – P. 133–143. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.12.135
- An accurate model to predict drilling fluid density at wellbore conditions / M.A. Ahmadi, S.R. Shadizadeh, K. Shah, A. Bahadori // Egypt. J. Pet. – 2018. – Vol. 27. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.ejpe.2016.12.002
- Elkatatny S. Enhancing the rheological properties of water-based drilling fluid using micronized starch // Arab. J. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 44. – P. 5433–5442. DOI: 10.1007/s13369-019-03720-1
- A Combined Barite–Ilmenite Weighting Material to Prevent Barite Sag in Water-Based Drilling Fluid / S. Basfar, A. Mohamed, S. Elkatatny, A. Al-Majed // Materials. – 2019. – Vol. 12. – P. 1945. DOI: 10.3390/ma12121945
- Experimental investigation of the effect of henna leaf extracts on cuttings transportation in highly deviated and horizontal wells / J.O. Oseh, M.M. Norrdin, F. Farooqi, R.A. Ismail, I. Ismail, A.O. Gbadamosi, A.J. Agi // J. Pet. Explor. Prod. Technol. – 2019. – Vol. 9. – P. 2387–2404. DOI: 10.1007/s13202-019-0631-z
- Optimizing the gel strength of water-based drilling fluid using clays for drilling horizontal and multi-lateral wells / F. Alakbari, S. Elkatatny, M.S. Kamal, M. Mahmoud // SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition; OnePetro: Kuala Lumpur, Malaysia. – 2018. DOI: 10.3933/apprheol-28-43606
- Prevention of barite sag in water-based drilling fluids by a urea-based additive for drilling deep formations / A. Mohamed, S. Al-Afnan, S. Elkatatny, I. Hussein // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – P. 2719. DOI: 10.3390/su12072719
- Novriansyah A. Experimental analysis of cassava starch as a fluid loss control agent on drilling mud // Mater. Today Proc. – 2021. – Vol. 39. – P. 1094–1098. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.189
- Impact of ZnO and CuO nanoparticles on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluid / P. Dejtardon, H. Hamidi, M.H. Chuks, D. Wilkinson, R. Rafati // Colloids Surf. A. – 2019. – Vol. 570. – P. 354–367. DOI: 10.3390/en13133417
- Nanomaterial-based drilling fluids for exploitation of unconventional reservoirs: A review / M. Ali, H.H. Jarni, A. Aftab, A.R. Ismail, N.M.C. Saady, M.F. Sahito, A. Keshavarz, S. Iglauer, M. Sarmadivaleh // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 3417. DOI: 10.3390/en13133417
- Bologna M., Aquino G. Deforestation and world population sustainability: A quantitative analysis // Sci. Rep. – 2020. – Vol. 10. – P. 7631. DOI: 10.1038/s41598-020-63657-6
- E-waste management and its effects on the environment and human health / R. Rautela, S. Arya, S. Vishwakarma, J. Lee, K.-H. Kim, S. Kumar // Sci. Total Environ. – 2021. – Vol. 773. – P. 145623. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145623
- Castillo-Giménez J., Montañés A., Picazo-Tadeo A.J. Performance and convergence in municipal waste treatment in the European Union // Waste Manag. – 2019. – Vol. 85. – P. 222–231. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.025
- Demirbas A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes // Energy Convers. Manag. – 2011. – Vol. 52. – P. 1280–1287. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.09.025
- Environmental friendly drilling fluid additives: Can food waste products be used as thinners and fluid loss control agents for drilling fluid? / A.T.T. Al-Hameedi, H.H. Alkinani, S. Dunn-Norman, N.A. Alashwak, A.F. Alshammari, M.M. Alkhamis, H.W. Albazzaz, R.A. Mutar, M.T. Alsaba // SPE Symposium: Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility; OnePetro: Kuala Lumpur, Malaysia, 2019. DOI: 10.2118/195410-MS
- A comprehensive investigation on the performance of durian rind as a lost circulation material in water-based drilling mud / N.F.F. Majid, A. Katende, I. Ismail, F. Sagala, N.M. Sharif, M.A.C. Yunus // Petroleum. – 2019. – Vol. 5. – P. 285–294. DOI: 10.1016/j.petlm.2018.10.004
- Ghayedi A., Khosravi A. Laboratory investigation of the effect of GO-ZnO nanocomposite on drilling fluid properties and its potential on H<sub>2</sub>S removal in oil reservoirs // J. Pet. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 184. – P. 106684. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106684
- A novel field applicable mud formula with enhanced fluid loss properties in high pressure-high temperature well condition containing pistachio shell powder / S. Davoodi, A.R. SA, S. Jamshidi, A.F. Jahromi // J. Pet. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 162. – P. 378–385. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.059
- Hossain M.E., Wajheuddin M. The use of grass as an environmentally friendly additive in water-based drilling fluids // Pet. Sci. – 2016. – Vol. 13. – P. 292–303. DOI: 10.1007/s12182-016-0083-8
- Agarwood waste as a new fluid loss control agent in water-based drilling fluid / A. Azizi, M.S.N. Ibrahim, K.H.K. Hamid, A. Sauki, N.A. Ghazali, T.A.T. Mohd // Int. J. Sci. Eng. – 2013. – Vol. 5. – P. 101–105. DOI: 10.12777/ijse.5.2.101-105

36. Iscan A., Kok M. Effects of walnut shells on the rheological properties of water-based drilling fluids // *Energy Sources Part A*. – 2007. – Vol. 29. – P. 1061–1068. DOI: 10.1080/00908310600713982
37. Alcheikh I., Ghosh B. A comprehensive review on the advancement of non-damaging drilling fluids // *Int. J. Petrochem. Res.* – 2017. – Vol. 1. – P. 61–72. DOI: 10.18689/ijpr-1000111
38. Thermo-thickening Drilling Fluids Containing Bentonite and Dual-Functionalized Cellulose Nanocrystals / M.-C. Li, Q. Wu, T. Lei, C. Mei, X. Xu, S. Lee, J. Gwon // *Energy Fuels*. – 2020. – Vol. 34. – P. 8206–8215. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c01192
39. Evaluation of polymer/bentonite synergy on the properties of aqueous drilling fluids for high-temperature and high-pressure oil wells / P.C. da Câmara, L.Y. Madruga, N.d.N. Marques, R.C. Balaban // *J. Mol. Liq.* – 2021. – Vol. 327. – P. 114808. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114808
40. Thermoresponsive bentonite for water-based drilling fluids / W. Dong, X. Pu, Y. Ren, Y. Zhai, F. Gao, W. Xie // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – P. 2115. DOI: 10.3390/ma12132115
41. Impact of barite and ilmenite mixture on enhancing the drilling mud weight / M. Abdou, A. Al-Sabagh, H.E.-S. Ahmed, A. Fadl // *Egypt. J. Pet.* – 2018. – Vol. 27. – P. 955–967. DOI: 10.1016/j.ejpe.2018.02.004
42. Thermochemical upgrading of calcium bentonite for drilling fluid applications / M. Magzoub, M. Mahmoud, M. Nasser, I. Hussein, S. Elkhatny, A. Sultan // *J. Energy Res. Technol.* – 2019. – Vol. 141. – P. 042902. DOI: 10.1115/1.4041843
43. Activation of (Na, Ca)-bentonites with soda and MgO and their utilization as drilling mud / C. Karagüzel, T. Çetinel, F. Boylu, K. Cinku, M. Çelik // *Appl. Clay Sci.* – 2010. – Vol. 48. – P. 398–404. DOI: 10.1016/j.clay.2010.01.013
44. Overcoming Salt Contamination of Bentonite Water-Based Drilling Fluids with Blended Dual-Functionalized Cellulose Nanocrystals / M.-C. Li, Q. Wu, J. Han, C. Mei, T. Lei, S.-Y. Lee, J. Gwon // *ACS Sustain. Chem. Eng.* – 2020. – Vol. 8. – P. 11569–11578. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c02774
45. A novel thermo-associating polymer as rheological control additive for bentonite drilling fluid in deep offshore drilling / B. Xie, A.P. Tchameni, M. Luo, J. Wen // *Mater. Lett.* – 2021. – Vol. 284. – P. 128914. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128914
46. Ikram R., Jan B.M., Ahmad W. An overview of industrial scalable production of graphene oxide and analytical approaches for synthesis and characterization // *J. Mater. Res. Technol.* – 2020. – Vol. 9. – P. 11587–11610. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.08.050
47. Study of graphene oxide to stabilize shale in water-based drilling fluids / K. Wang, G. Jiang, X. Li, P.F. Luckham // *Colloids Surf. A*. – 2020. – Vol. 606. – P. 125457. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125457
48. Aramendiz J., Imqam A. Water-based drilling fluid formulation using silica and graphene nanoparticles for unconventional shale applications // *J. Pet. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 179. – P. 742–749. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.04.085
49. Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud / A.O. Gbadamosi, R. Junin, Y. Abdalla, A. Agi, J.O. Oseh // *J. Pet. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 172. – P. 1226–1234. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.097
50. Influence of silica nanoparticles on the functionality of water-based drilling fluids / M. Al-Yasiri, A. Awad, S. Pervaiz, D. Wen // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 179. – P. 504–512. DOI: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.081
51. Medhi S., Gupta D., Sangwai J.S. Impact of zinc oxide nanoparticles on the rheological and fluid-loss properties, and the hydraulic performance of non-damaging drilling fluid // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 88. – P. 103834. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103834
52. Fluid filtration and rheological properties of nanoparticle additive and intercalated clay hybrid bentonite drilling fluids / M.M. Barry, Y. Jung, J.-K. Lee, T.X. Phuoc, M.K. Chyu // *J. Pet. Sci. Eng.* – 2015. – Vol. 127. – P. 338–346. DOI: 10.1016/j.petrol.2015.01.012
53. Data on experimental investigation of Methyl Ester Sulphonate and nanopolystyrene for rheology improvement and filtration loss control of water-based drilling fluid / H. Elochukwu, L.K.S. Sia, R. Gholami, M.A. Hamid // *Data Brief*. – 2018. – Vol. 21. – P. 972–979. DOI: 10.1016/j.dib.2018.10.055
54. Abdo J., Al-Sharji H., Hassan E. Effects of nano-sepiolite on rheological properties and filtration loss of water-based drilling fluids // *Surf. Interface Anal.* – 2016. – Vol. 48. – P. 522–526. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.053
55. Analysis of high performing graphene oxide nanosheets based non-damaging drilling fluids through rheological measurements and CFD studies / S. Medhi, S. Chowdhury, N. Bhatt, D.K. Gupta, S. Rana, J.S. Sangwai // *Powder Technol.* – 2021. – Vol. 377. – P. 379–395. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.053

## References

1. Nutskova M.V., Rudiaeva E.Iu. Obosnovanie i razrabotka tekhniko-tekhnologicheskikh reshenii dlia povysheniia effektivnosti bureniia skvazhin v usloviiaxh pogloshcheniia promyvochnoi zhidkosti [The effect of water-swellaible polymer on well drilling with mud loss]. *Nedropol'zovanie*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 104–114. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.1
2. Litvinenko V.S., Nikolaev N.I. Tekhnologicheskii zhidkosti dlia povysheniia effektivnosti stroitel'stva i ekspluatatsii nef'tian'nykh i gazovykh skvazhin [Technological fluids for increasing effectivity of construction and exploitation oil and gas wells]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2011, vol. 194, 84 p.
3. Malyshekin M.M. Ekologizatsiia tekhnologii bureniia skvazhin [Well drilling technologies ecologization]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2013, vol. 203, 63 p.
4. Malyshekin M.M. Snizhenie ekologicheskoi opasnosti pri vedenii burovnykh rabot [Reducing environmental hazard drilling works]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2014, vol. 207, 186 p.
5. Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Razrabotka sostavov promyvochnykh zhidkosti dlia povysheniia effektivnosti bureniia tverdykh gornykh porod [Development of drilling fluids composition for efficiency increase of hard rocks drilling]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 219, 412 p. DOI: 10.18454/pmi.2016.3.412
6. Iakovlev A.M. Znachenie smazyvaushchikh dobavok pri al'maznom burenii [The importance of lubricants in diamond drilling]. *Zapiski Gornogo instituta*, 1976, vol. 71(2), 80 p.
7. Chen C., Li C., Reniers G., Yang F. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS. *J. Clean. Prod.*, 2021, vol. 279, 123583 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123583
8. Cheraghian G., Wu Q., Mostofi M., Li M.-C., Afrand M., Sangwai J.S. Effect of a novel clay/silica nanocomposite on water-based drilling fluids: Improvements in rheological and filtration properties. *Colloids Surf. A*, 2018, vol. 555, pp. 339–350. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.06.072
9. Medhi S., Chowdhury S., Gupta D.K., Mazumdar A. An investigation on the effects of silica and copper oxide nanoparticles on rheological and fluid loss property of drilling fluids. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, 2020, vol. 10, pp. 91–101. DOI: 10.1007/s13202-019-0721-y
10. Zheng Y., Amiri A., Polycarpou A.A. Enhancements in the tribological performance of environmentally friendly water-based drilling fluids using additives. *Appl. Surf. Sci.*, 2020, vol. 527, 146822 p. DOI: 10.1007/s13202-019-0721-y
11. Meng X., Zhang Y., Zhou F., Chu P.K. Effects of carbon ash on rheological properties of water-based drilling fluids. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2012, vol. 100, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.petrol.2012.11.011
12. Chang X., Sun J., Xu Z., Lv K., Dai Z., Zhang F., Huang X., Liu J. Synthesis of a novel environment-friendly filtration reducer and its application in water-based drilling fluids. *Colloids Surf. A*, 2019, vol. 568, pp. 284–293. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.01.055
13. Ismail A.R., Mohd N.M., Basir N.F., Oseh J.O., Ismail I., Bkooor S.O. Improvement of rheological and filtration characteristics of water-based drilling fluids using naturally derived henna leaf and hibiscus leaf extracts. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, 2020, vol. 10, pp. 3541–3556. DOI: 10.1007/s13202-020-01007-y
14. V. de Oliveira, K. dos Santos Alves, A. da Silva-Junior, R. Araújo, R. Balaban Testing carrageenans with different chemical structures for water-based drilling fluid application / L. Hilliou. *J. Mol. Liq.*, 2020, vol. 299, 112139 p. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.112139
15. Yang M., Luo D., Chen Y., Li G., Tang D., Meng Y. Establishing a practical method to accurately determine and manage wellbore thermal behavior in high-temperature drilling. *Appl. Energy*, 2019, vol. 238, pp. 1471–1483. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.164
16. Ahmad H.M., Kamal M.S., Al-Harhi M.A. High molecular weight copolymers as rheology modifier and fluid loss additive for water-based drilling fluids. *J. Mol. Liq.*, 2018, vol. 252, pp. 133–143. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.12.135
17. Ahmadi M.A., Shadizadeh S.R., Shah K., Bahadori A. An accurate model to predict drilling fluid density at wellbore conditions. *Egypt. J. Pet.*, 2018, vol. 27, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ejpe.2016.12.002
18. Elkhatny S. Enhancing the rheological properties of water-based drilling fluid using micronized starch. *Arab. J. Sci. Eng.*, 2019, vol. 44, pp. 5433–5442. DOI: 10.1007/s13369-019-03720-1
19. Basfar S., Mohamed A., Elkhatny S., Al-Majed A. A Combined Barite-Ilmenite Weighting Material to Prevent Barite Sag in Water-Based Drilling Fluid. *Materials*, 2019, vol. 12, 1945 p. DOI: 10.3390/ma12121945
20. Oseh J.O., Norrdin M.M., Farooqi F., Ismail R.A., Ismail I., Gbadamosi A.O., Agi A.J. Experimental investigation of the effect of henna leaf extracts on cuttings transportation in highly deviated and horizontal wells. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, 2019, vol. 9, pp. 2387–2404. DOI: 10.1007/s13202-019-0631-z
21. Alakbari F., Elkhatny S., Kamal M.S., Mahmoud M. Optimizing the gel strength of water-based drilling fluid using clays for drilling horizontal and multi-lateral wells. *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition; OnePetro: Kuala Lumpur, Malaysia*, 2018. DOI: 10.3933/applrheol-28-43606
22. Mohamed A., Al-Afnan S., Elkhatny S., Hussein I. Prevention of barite sag in water-based drilling fluids by a urea-based additive for drilling deep formations. *Sustainability*, 2020, vol. 12, 2719 p. DOI: 10.3390/su12072719
23. Novriansyah A. Experimental analysis of cassava starch as a fluid loss control agent on drilling mud. *Mater. Today Proc.*, 2021, vol. 39, pp. 1094–1098. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.189

24. Dejtaran P., Hamidi H., Chuks M.H., Wilkinson D., Rafati R. Impact of ZnO and CuO nanoparticles on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluid. *Colloids Surf. A*, 2019, vol. 570, pp. 354-367. DOI: 10.3390/en13133417
25. Ali M., Jarni H.H., Aftab A., Ismail A.R., Saady N.M.C., Sahito M.F., Keshavarz A., Iglauer S., Sarmadivaleh M. Nanomaterial-based drilling fluids for exploitation of unconventional reservoirs: A review. *Energies*, 2020, vol. 13, 3417 p. DOI: 10.3390/en13133417
26. Bologna M., Aquino G. Deforestation and world population sustainability: A quantitative analysis. *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, 7631 p. DOI: 10.1038/s41598-020-63657-6
27. Rautela R., Arya S., Vishwakarma S., Lee J., Kim K.-H., Kumar S. E-waste management and its effects on the environment and human health. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 773, 145623 p. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145623
28. Castillo-Giménez J., Montañés A., Picazo-Tadeo A.J. Performance and convergence in municipal waste treatment in the European Union. *Waste Manag.*, 2019, vol. 85, pp. 222-231. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.025
29. Demirbas A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Convers. Manag.*, 2011, vol. 52, pp. 1280-1287. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.09.025
30. Al-Hameedi A.T.T., Alkinani H.H., Dunn-Norman S., Alashwak N.A., Alshammari A.F., Alkhamis M.M., Albazzaz H.W., Mutar R.A., Alsaba M.T. Environmental friendly drilling fluid additives: Can food waste products be used as thinners and fluid loss control agents for drilling fluid? *SPE Symposium: Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility; OnePetro: Kuala Lumpur, Malaysia*, 2019. DOI: 10.2118/195410-MS
31. Majid N.F.F., Katende A., Ismail I., Sagala F., Sharif N.M., Yunus M.A.C. A comprehensive investigation on the performance of durian rind as a lost circulation material in water-based drilling mud. *Petroleum*, 2019, vol. 5, pp. 285-294. DOI: 10.1016/j.petlm.2018.10.004
32. Ghayedi A., Khosravi A. Laboratory investigation of the effect of GO-ZnO nanocomposite on drilling fluid properties and its potential on H<sub>2</sub>S removal in oil reservoirs. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2020, vol. 184, 106684 p. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106684
33. Davoodi S., SA A.R., Jamshidi S., Jahromi A.F. A novel field applicable mud formula with enhanced fluid loss properties in high pressure-high temperature well condition containing pistachio shell powder. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2018, vol. 162, pp. 378-385. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.059
34. Hossain M.E., Wajheuddin M. The use of grass as an environmentally friendly additive in water-based drilling fluids. *Pet. Sci.*, 2016, vol. 13, pp. 292-303. DOI: 10.1007/s12182-016-0083-8
35. Azizi A., Ibrahim M.S.N., Hamid K.H.K., Sauki A., Ghazali N.A., Mohd T.A.T. Agarwood waste as a new fluid loss control agent in water-based drilling fluid. *Int. J. Sci. Eng.*, 2013, vol. 5, pp. 101-105. DOI: 10.12777/ijse.5.2.101-105
36. Iscan A., Kok M. Effects of walnut shells on the rheological properties of water-based drilling fluids. *Energy Sources Part A*, 2007, vol. 29, pp. 1061-1068. DOI: 10.1080/00908310600713982
37. Alcheikh I., Ghosh B. A comprehensive review on the advancement of non-damaging drilling fluids. *Int. J. Petrochem. Res.*, 2017, vol. 1, pp. 61-72. DOI: 10.18689/ijpr-1000111
38. Li M.-C., Wu Q., Lei T., Mei C., Xu X., Lee S., Gwon J. Thermo-thickening Drilling Fluids Containing Bentonite and Dual-Functionalized Cellulose Nanocrystals. *Energy Fuels*, 2020, vol. 34, pp. 8206-8215. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c01192
39. Câmara da P.C., Madruga L.Y., Marques N.d.N., Balaban R.C. Evaluation of polymer/bentonite synergy on the properties of aqueous drilling fluids for high-temperature and high-pressure oil wells. *J. Mol. Liq.*, 2021, vol. 327, 114808 p. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114808
40. Dong W., Pu X., Ren Y., Zhai Y., Gao F., Xie W. Thermoresponsive bentonite for water-based drilling fluids. *Materials*, 2019, vol. 12, 2115 p. DOI: 10.3390/ma12132115
41. Abdou M., Al-Sabagh A., Ahmed H.E.-S., Fadl A. Impact of barite and ilmenite mixture on enhancing the drilling mud weight. *Egypt. J. Pet.*, 2018, vol. 27, pp. 955-967. DOI: 10.1016/j.ejpe.2018.02.004
42. Magzoub M., Mahmoud M., Nasser M., Hussein I., Elkhatny S., Sultan A. Thermochemical upgrading of calcium bentonite for drilling fluid applications. *J. Energy Res. Technol.*, 2019, vol. 141, 042902 p. DOI: 10.1115/1.4041843
43. Karagüzel C., Çetinel T., Boylu F., Cinku K., Çelik M. Activation of (Na, Ca)-bentonites with soda and MgO and their utilization as drilling mud. *Appl. Clay Sci.*, 2010, vol. 48, pp. 398-404. DOI: 10.1016/j.clay.2010.01.013
44. Li M.-C., Wu Q., Han J., Mei C., Lei T., Lee S.-Y., Gwon J. Overcoming Salt Contamination of Bentonite Water-Based Drilling Fluids with Blended Dual-Functionalized Cellulose Nanocrystals. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 2020, vol. 8, pp. 11569-11578. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c02774
45. Xie B., Tchameni A.P., Luo M., Wen J. A novel thermo-associating polymer as rheological control additive for bentonite drilling fluid in deep offshore drilling. *Mater. Lett.*, 2021, vol. 284, 128914 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128914
46. Ikram R., Jan B.M., Ahmad W. An overview of industrial scalable production of graphene oxide and analytical approaches for synthesis and characterization. *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, vol. 9, pp. 11587-11610. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.08.050
47. Wang K., Jiang G., Li X., Luckham P.F. Study of graphene oxide to stabilize shale in water-based drilling fluids. *Colloids Surf. A*, 2020, vol. 606, 125457 p. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125457
48. Aramendiz J., Imqam A. Water-based drilling fluid formulation using silica and graphene nanoparticles for unconventional shale applications. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, vol. 179, pp. 742-749. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.04.085
49. Gbadamosi A.O., Junin R., Abdalla Y., Agi A., Oseh J.O. Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, vol. 172, pp. 1226-1234. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.097
50. Al-Yasiri M., Awad A., Pervaiz S., Wen D. Influence of silica nanoparticles on the functionality of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 504-512. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.04.081
51. Medhi S., Gupta D., Sangwai J.S. Impact of zinc oxide nanoparticles on the rheological and fluid-loss properties, and the hydraulic performance of non-damaging drilling fluid. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2021, vol. 88, 103834 p. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103834
52. Barry M.M., Jung Y., Lee J.-K., Phuoc T.X., Chyu M.K. Fluid filtration and rheological properties of nanoparticle additive and intercalated clay hybrid bentonite drilling fluids. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2015, vol. 127, pp. 338-346. DOI: 10.1016/j.petrol.2015.01.012
53. Elochukwu H., Sia L.K.S., Gholami R., Hamid M.A. Data on experimental investigation of Methyl Ester Sulphonate and nanopolystyrene for rheology improvement and filtration loss control of water-based drilling fluid. *Data Brief*. 2018. vol. 21, pp. 972-979. DOI: 10.1016/j.dib.2018.10.055
54. Abdo J., AL-Sharji H., Hassan E. Effects of nano-sepiolite on rheological properties and filtration loss of water-based drilling fluids. *Surf. Interface Anal.*, 2016, vol. 48, pp. 522-526. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.053
55. Medhi S., Chowdhury S., Bhatt N., Gupta D.K., Rana S., Sangwai J.S. Analysis of high performing graphene oxide nanosheets based non-damaging drilling fluids through rheological measurements and CFD studies. *Powder Technol.*, 2021, vol. 377, pp. 379-395. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.053

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.