



SOCAR Proceedings

Reservoir and Petroleum Engineering

journal home page: <http://proceedings.socar.az>



ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В НЕФТЕДОБЫЧЕ

В.М.Шамилов

SOCAR, Баку, Азербайджан

Potential Applications of Carbon Nanomaterials in Oil Recovery

V.M.Shamilov

SOCAR, Baku, Azerbaijan

Abstract

Carbon nanomaterials and compositions containing them are attracting increased attention. The high variety of carbon nanomaterials structures and morphologies as well as the simplicity of its surface functionalization, make it possible to effectively select the nanomaterial properties for the target task. The presented study provides an overview of the oil industry stages and shows the main directions of using nanotechnology in them. The main attention is focused on the trends of carbon nanomaterials (nanodiamonds, carbon nanotubes and graphene-like materials) applications in the petroleum extraction stage (drilling and enhanced oil recovery processes).

Keywords:

Nanotechnology;
Oil industry;
Enhanced oil recovery;
Drilling;
Carbon nanomaterials;
Carbon nanotubes.

© 2020 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

В последние десятилетия, в области конструирования, характеристики и применения различных материалов, основной тенденцией является повсеместное внедрение нанотехнологий [1]. Термин «нанотехнологии», как правило, подразумевает совокупность технологических методов для создания и применения материалов, устройств и систем в нанодиапазоне (1-100 нм). Примерами наноматериалов являются углеродные нанотрубки, графены, квантовые точки, металлические и оксидные наночастицы. Также, к объектам исследований «нанонауки» относятся и ультрадисперсные системы – аэрозоли, мицеллярные коллоидные растворы, полимерные золи и гели [2]. Эти системы характеризуются рядом уникальных свойств, появление которых обусловлено наноразмерностью их составляющих. Так, при переходе к наночастицам происходит качественное изменение ряда физико-химических свойств, из-за сравнимости структурных единиц с радиусом действия сил межфазного взаимодействия. Широко известны такие свойства наноматериалов, как оптическая прозрачность (наночастицы меди [3]) и изменение цвета (например, наночастицы золота [4]), химический катализ (наночастицы платины [5]), более эффективное взаи-

модействие с наполнителями, что обеспечивает улучшенную теплопроводность (нанодисперсии с содержанием оксида цинка [6]) или, напротив, изоляцию [7]. Важным преимуществом использования наносистем в ряде приложений является их высокая эффективность при малом содержании вводимого нанокompонента [8].

Повсеместное внедрение нанотехнологий затронуло и нефтегазохимическую отрасль (добыча и переработка нефти) [9-15]. Однако, если применение наноразмерных катализаторов в процессах нефтепереработки началось задолго до оформления нанотехнологий в отдельную область знаний, нанотехнологии для нефтедобычи (геологоразведка, бурение и интенсификация) внедряются сравнительно недавно. Эффективность нанотехнологий в процессах бурения связана с известной закономерностью высоких реологических свойств наножидкостей (нанодисперсий) в широком диапазоне температур и давлений [16]. Благодаря этому наносистемы могут использоваться как компонент буровых жидкостей. Высокая проницаемость нанодисперсий в пористых средах позволяет эффективно изменять свойства пласта, снижая фильтрационные потери буровой жидкости и повышая стабильность скважины. Эти же свойства нанодисперсий являются основой для их внедрения в процессе интенсификации добычи нефти (Enhanced Oil Recovery - EOR) [10-13,

E-mail: Valeh.Shamilov@socar.az

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20200300450>

17]. В настоящий момент, углеводороды, добываемые посредством нефтедобычи и газодобычи, являются основным источником энергии. Несмотря на бурное развитие альтернативных источников энергии [18], именно углеводороды в ближайшие десятилетия сохранят лидерство в области энергетики [9-15]. Однако большинство разрабатываемых нефтяных месторождений уже достигло или в ближайшем будущем достигнет стадии снижения производства. При этом существенная доля нефти (до 67%) остается в пластах из-за ограничений технологий, используемых для извлечения остаточных углеводородов [19]. Предположительно с использованием нанотехнологий, можно достичь 80% извлечения нефти и газа из пластов вместо 40-50% добычи в настоящее время [20].

В последние годы в приложениях нефтедобывающей промышленности наиболее активно исследуются углеродные наноматериалы (УНМ) [15]. Особенно это касается таких приложений, как обеспечение бурения (модификация буровых жидкостей, цементирование ствола скважины) и EOR-процессы. Ранее нанометаллические и нанометаллоксидные соединения достаточно широко исследовались для решения этих задач. Однако, показано, что в ряде случаев объемная структура углеродных наноматериалов (2D-структура графена и протяженная углеродных нанотрубок (УНТ)) позволяет придать нанодисперсиям дополнительные преимущества. В частности, это позволило разработать наногибридные материалы (наноккомпозиты поверхностно-активных веществ с углеродными наноматериалами [21]) обладающие высокой стабильностью и эффективностью в EOR процессе. Важным преимуществом углеродных наноматериалов является то, что на текущем этапе развития их синтез в качестве их предшественников могут использоваться непосредственно продукты нефте- и газодобычи [22]. Представленный обзор посвящен применению нанотехнологий в совокупности мероприятий по геологоразведке месторождений углеводородов, процессов бурения, а также интенсификации нефтедобычи и сфокусирован на перспективах применения углеродных наноматериалов.

1. Перспективы применения нанотехнологий в нефтяной промышленности

Нефтяную промышленность принято разделять на три основных этапа: добыча, транспортировка и переработка нефти (рис.1). Первый этап включает в себя геологоразведку (выявление месторождений углеводородов), бурение, добычу и стимулирование добычи нефти. На каждом из этих этапов перспективно использование нанотехнологий. Наносистемы принято классифицировать по типу дисперсионной среды [1-2]. Так, следует выделить дисперсии наночастиц в объеме твердых тел или на поверхности подложек [1]. Этот тип наносистем используется для

направленной модификации свойств твердых тел (как правило, для упрочнения и износостойкости), а также для разработки высокоэффективных катализаторов, зондов и т.д. Вторым типом являются нанодисперсии частиц в газо-жидкостных средах – нано-жидкости (ультрадисперсные коллоидные системы), наноэмульсии и нанопены [23,24]. Наноэмульсии, также известные, как «Pickering Emulsions» представляют собой двухфазную дисперсию двух несмешивающихся жидкостей: капель воды в нефти или капель нефти в воде, со стабилизированными наночастицами. Нанопены – жидкости с пузырьками газа стабилизированные наночастицами. Эти наносистемы, как правило, используются для направленного воздействия на пластовую породу и эффективно используются в процессах бурения и интенсификации добычи нефти [25].

Преимущества наносистем в разнообразных процессах обусловлены несколькими базовыми свойствами наночастиц [1]:

1. Благодаря малым размерам (<100 нм) наночастицы могут легко проникать в пористые среды;
2. Нанодисперсии характеризуются высокой стабильностью, так как поверхностные силы превышают силы тяжести;
3. Размер, морфология наночастиц может быть скорректирована в процессе синтеза для придания требуемых свойств;
4. Химические свойства поверхности (содержание функциональных групп) наночастиц также легко модифицируемы для придания высокой гидрофильности, гидрофобности или других свойств.
5. Высокая суммарная удельная поверхность наночастиц и потенциально высокая концентрация функциональных групп при небольшом объеме наноматериала.

1.1. Геологоразведка месторождений

Технологии геологоразведки непрерывно совершенствуются, так как в последнее время легкодоступные залежи углеводородов практически истощены. Этот этап, зачастую, необходимо проводить на все больших глубинах, что связано с необходимостью работоспособности датчиков (сенсоров) при повышенных давлениях и температурах.

Не так давно, «наносенсоры» были предложены для определения, интерпретации и оценки сейсмических данных в геохимических исследованиях [26]. Принцип основан на введении наночастиц в толщу пласта с последующей регистрацией изменения оптических, магнитных и электрических свойств наночастиц при их распределении в породе и прохождении пласта. Так, в работе [27] предложено использование гиперполяризованных SiO₂-наночастиц в качестве наносенсоров для разведки месторождений нефти и газа. Одним из последних достижений нанотехнологий в разведке нефти и газа является использование пластовых «нанороботов».



Успешно протестированы устройства, которые включают микросистему передачи сигнала [28]. В настоящий момент, решаются задачи по улучшению защиты датчиков от загрязнений и получения датчиков для достижения глубоких пластовых жидкостей.

При проведении поисково-разведочного бурения важной областью применения наноматериалов являются задачи по каротажу скважины – детального исследования строения разреза ствола с помощью геофизических зондов. В исследовании [29] разработан метод с использованием зондов на основе нанооптических волокон и детектирования с помощью резонансной рамановской спектроскопии. Нанокompозитные материалы с содержанием изотопа лития-6 нашли применение в качестве сцинтилляционных детекторов в LWD-системах (Logging While Drilling), которые служат для обеспечения проводки скважины по проектной траектории, осуществляя оперативный контроль бурения [30].

1.2. Технологии процессов бурения скважин

Использование нанотехнологий для процессов бурения скважин активно исследовалось в течение последних лет. Эта область представляет собой совокупность задач по разработке составов буровых жидкостей, покрытий буровых долот, скважинных инструментов и допантов для цементирования ствола скважины.

При модификации буровых растворов нанодисперсиями решаются задачи:

- эффективной передачи гидравлической

энергии на забойный двигатель и долото (регулировка вязкости жидкости);

- обеспечению смазывающего и антикоррозионного действия бурового инструмента (реологические свойства нанодисперсий);
- эффективной транспортировки выбуренной породы из скважины и удерживании ее во взвешенном состоянии (антикоагуляционные свойства наночастиц);
- повышения общей теплопроводности раствора для более эффективного охлаждения бурильного инструмента.

Не менее важными являются задачи по предотвращению осложнений при бурении, благодаря образованию фильтрационной нанокорки [31]. Это снижение фильтрационных потерь буровой жидкости (снижение проникающей способности фильтра), уменьшения воздействия фильтра на пласт и укрепления неустойчивых отложений для повышения стабильности скважины. На следующем этапе, при благоприятной коммерческой оценке разработки, начинают процесс заканчивания скважины. Этот этап заключается в спуске обсадных колонн и цементировании приствольной зоны скважины. Известные технологические решения по повышению прочности материалов при введении в их состав наноаддитивов, применимы и для оптимизации составов цементов (повышение скорости отвердевания и снижение газо- и водопроницаемости [32]), обсадных колонн и металлоконструкций устья скважины (повышение прочности сплавов [33]) применимы и в данном случае.

1.3. Интенсификация процесса добычи нефти

Методы интенсификации добычи нефти используются для искусственного поддержания энергии пласта или изменения физико-химических свойств нефти и направлены на повышение нефтеотдачи месторождения. В результате первичных (естественная энергия пласта) или вторичных (закачка воды) методов, как правило, удается достичь 20-40% извлечения [34-35]. При использовании исключительно стандартных методов вытеснения нефти достигается высокая степень обводненности нефтяного пласта, и разработка месторождения становится коммерчески не выгодной [2]. Предполагается, что с использованием третичных методов нефтеотдачу можно повысить до 60% [36]. Следует выделить три основных типа EOR:

- Thermal EOR (TEOR): методы заключаются в стимуляции пласта тепловой энергией. В частности, разработаны, такие технологии как нагнетание пара, циклическая стимуляция паром и парогравитационный дренаж. Эти методы направлены на повышение текучести тяжелой нефти и битумов за счет изменения физических свойств (вязкость и плотность).

- Gas EOR (GEOR): В газовых методах используются углеводородные (CH_4 , C_3H_8) или не углеводородные (N_2 или CO_2) газы, которые растворяясь в нефти, уменьшают ее вязкость и расширяют объем.

- Chemical EOR (CEOR): Химические методы включают использование полимеров, для увеличения эффективности вытеснения или поверхностно-активных веществ (ПАВ), для снижения межфазного трения.

Применимость конкретных методов EOR зависит от ряда разнообразных факторов (цена нефти, литология пласта [37] и др.). В настоящий момент на долю тепловых и газовых (CO_2) методов приходится до 99% внедрений [14]. Таким образом, лишь около одного процента применений приходилось на химические технологии (полимеры, ПАВ). Следует отметить, что CEOR является достаточно эффективным методом, однако из-за экономических соображений и снижения эффективности метода при высоких температурах и давлении его применимость существенно ограничена [37]. Предполагается, что использование в качестве вытесняющих агентов композиций с содержанием наноматериалов, более эффективных и устойчивых в НРНТ-условиях, позволит решить эту задачу.

Применение нанотехнологий позволяет вести разработку таких труднодоступных ресурсов, как тяжелая, сланцевая нефть и битумные углеводороды. По оценке, в мире разведано около 5.6 триллионов тяжелой нефти (при 1.02 триллионов баррелей обычной легкой нефти). Однако, только около 434.4 миллиардов баррелей может быть извлечено в рамках разработанных технологий [38]. В основном это связано с физико-химическими свойствами и труднодоступностью. В

последнее время развитие нанотехнологий позволило эффективно добывать углеводороды из этих месторождений. Так, несколько типов нанокатализаторов, такие как наноразмерные переходные металлы (например, нано-Ni) и наночастицы оксидов металлов, использовались в процессах акватермолиза для разжижения и повышения извлечения тяжелой нефти [39,40]. Повышение достигается в результате разложения крупных углеводородных молекул – смол и асфальтенов и снижения вязкости [40].

Наноматериалы также могут быть использованы в технологиях гидроразрыва пласта при добыче нефти и газа из сланцевых и плотных горных пород. В частности, было показано, что углеродные наноматериалы перспективны для создания проппантов [41].

1.4. Транспортировка нефти и нефтепереработка

Данный этап включает в себя как транспортировку, так и хранение сырой или очищенной нефти. Нанотехнологии применимы для улучшения свойств конструкционных материалов при использовании наноаддитивов [33]. Также, принципиальной задачей является снижение гидравлического трения. В ряде исследований с целью снижения энергетических затрат и повышения пропускной способности участков успешно были протестированы противотурбулентные добавки [42]. При этом содержание аддитива не превышало 1 ppm и не оказывало существенного влияния на вязкость и иные свойства сырой нефти. Поскольку изменение параметров потока происходит на микроскопическом уровне это решение также можно классифицировать как нанотехнологическое.

К данному этапу также можно отнести ряд сопутствующих добыче и транспортировке нефти экологических задач, успешно решаемых с применением нанотехнологий. Широко известно, что использование наноструктурированных сорбентов, в том числе на основе углеродных наноматериалов, обеспечивает высокие результаты при адсорбции загрязнений [43]. Так, в ряде исследований показана эффективность УНМ в устранении загрязнений образованных в результате процессов нефтедобычи [44].

Применение нанотехнологий в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности имеет давнюю историю и, преимущественно, связано с различными каталитическими, а также сорбционными процессами гидродесульфуризации [9]. В настоящее время, помимо стандартных задач отрасли возросла необходимость сокращения выбросов SO_x и CO_2 , при одновременном увеличении производства [45-47]. Эти проблемы стимулируют отрасль к более экологичному и энергоэффективному развитию. Нанокаталитические системы более эффективны, чем обычные катализаторы, из-за более высокого отношения площади поверхности активных

центров к объему [48]. В частности, в результате ряда исследований произведена замена обычного катализатора для промышленной переработки нефти MoS_2 на наноструктурированный MoS_2 [49].

2. Применение нанотехнологий в процессах бурения и интенсификации добычи нефти

2.1. Процессы бурения

2.1.1. Оптимизация составов буровых жидкостей

Следует выделить четыре основных аспекта модификации буровых растворов наночастицами.

1) Благодаря образованию ультратонкой гидрофобной фильтрационной корки на поверхности породы, с большей эффективностью удается предотвращать процессы фильтрационных потерь и повысить стабильность поверхности пласта. Так, ряд наноконпозиций (с добавками кремнезема и графена) был использован для повышения вязкости и стабильности буровых растворов при решении задач потерь буровой жидкости [31, 50].

2) Пленка наножидкости вдоль ствола скважины и труб бурового инструмента повышает скольжение и частично нивелирует такие нежелательные процессы в ходе бурения, как повышение крутящего момента и дифференциальный прихват [51]. При этом, для достижения необходимого эффекта требуются существенно меньшие концентрации наноаддитивов, по сравнению со стандартными антифрикционными добавками. Лубриканты на основе наночастиц широко используются при горизонтальном бурении, бурении с многосторонним и гибким трубопроводом, так как уменьшают риски сальникообразования, снижая крутящий момент и сопротивление в буровых инструментах [51].

3) Не модифицированные буровые растворы обладают относительно низкой теплопроводностью и не могут эффективно охлаждать буровые инструменты. В результате существует вероятность выхода из строя бурового оборудования при высокой температуре и высоком давлении. Температуро-отводящие свойства нанодисперсий активно изучаются начиная с 2000-х годов [52]. Показано, что даже при малом содержании наночастиц (<1 вес.%) теплопроводность смеси может возрасти более чем в полтора раза, по сравнению с базовой жидкостью [53].

4) Интересным аспектом является возможность удаления токсичных и коррозионных газов H_2S высвобождающихся в ходе процесса бурения и диффундирующих в буровой раствор из пластов. В частности, для предотвращения этого процесса исследовались наночастицы оксида цинка введенные в состав бурового раствора [54].

2.1.2. Нанотехнологии для скважинных инструментов

Нанотехнологии также применяются для создания и оптимизации покрытий буровых инструментов. В процессе бурения стандартно исполь-

зуются PDC-долота (Polycrystalline Diamond Compact). В ряде исследований было показано, что срок службы бурового инструмента может быть увеличен при плазменном напылении нанокерамического порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ на поверхность долота (например, [55]). Во время бурения покрытие частично расплавляется и образует зерна разного размера, что повышает механическую прочность из-за отсутствия однородности. В работе [56] исследовалась функционализация PDC углеродными наноматериалами. Было показано, что данная технология позволяет создать буровые инструменты пригодные для работы в НРНТ-условиях.

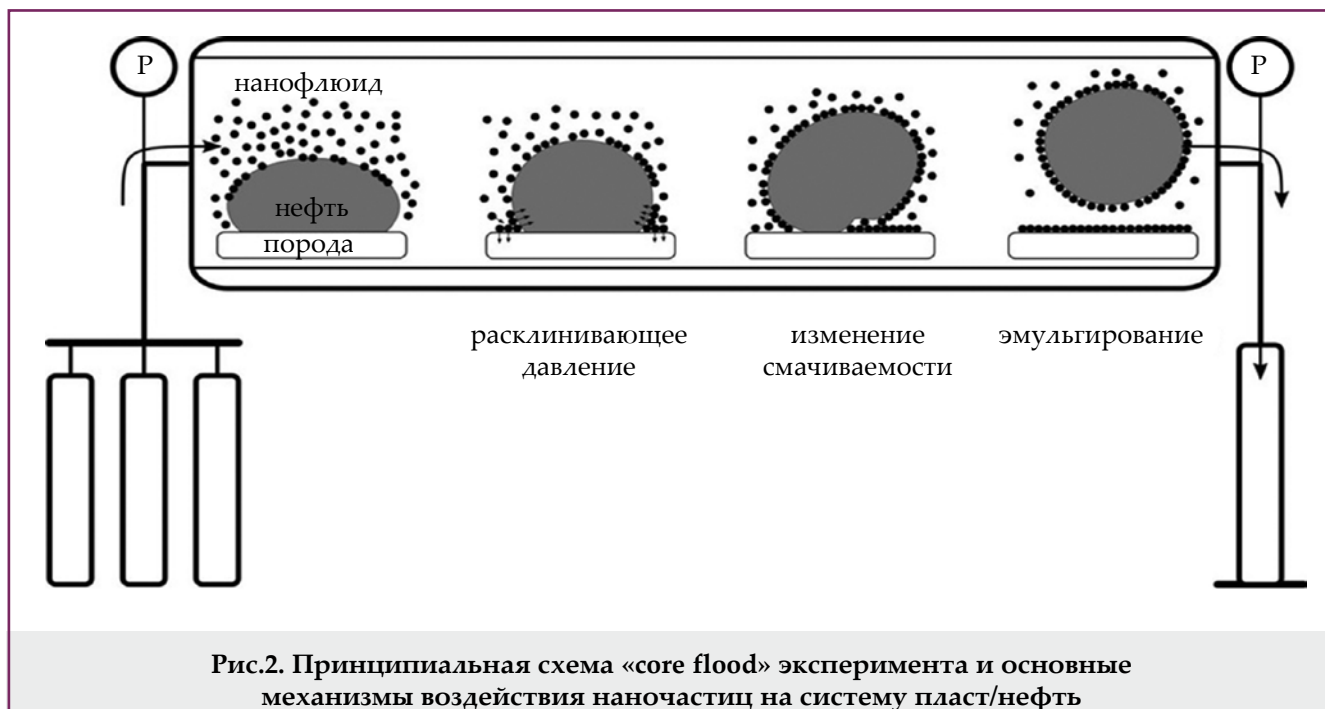
Использование нанотехнологий для других скважинных инструментов связано с известными закономерностями по увеличению термостойкости и прочности металлов и их сплавов при введении в объем наночастиц [33]. Это позволяет модифицировать материалы барьерных клапанов и конструкций устья скважины для более длительного использования в полевых условиях [57].

2.1.3. Наноаддитивы для цементных растворов

В настоящий момент наноаддитивы эффективно используются в качестве цементных добавок [32,58]. В этом случае, использование наноматериалов направлено на создание армирующего эффекта на наноразмерном уровне. В целом это способствует повышению прочности бетона на сжатие, его температурной устойчивости и модуля Юнга. Образующий композитный материал менее водонепроницаем и для него характерно предотвращение развития трещин в ранние сроки твердения. Данные свойства необходимы в задачах по укреплению ствола скважины и блокированию скважинной воды. В частности, в ряде исследований показано, что наночастицы SiO_2 [59-62] и УНТ [63] в задачах нефтедобывающей отрасли.

2.2. Интенсификация добычи нефти

С развитием нанотехнологий интерес к SEOR-методам существенно возрос [64]. Предполагается, что наночастицы в большей степени, чем ПАВ способствуют изменению смачиваемости породы, снижению межфазового трения, а также эффективно стабилизируют эмульсии и пены, которые могут использоваться для высокоэффективного вытеснения нефти. В ряде работ, была показана высокая эффективность композиций с наночастицами различного состава (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO и Fe_2O_3) [12]. Особенно эффективны композиционные составы с одновременным содержанием наночастиц и ПАВ [13]. Например, в исследованиях [65-68] показано, что жидкости, содержащие суспензию наночастиц металлов (Cu , Al ; 70-150 нм) и ПАВ, на 35% эффективнее в процессе вытеснения нефти, по сравнению со схожими составами без наночастиц. Также, высокая теплоемкость наночастиц и теплопроводность наносуспензий на их основе делает их перспективными для работы в условиях TEOR процессов [14].



2.2.1. Механизмы снижения капиллярных сил

Стандартным методом исследования эффективности вытесняющих составов с содержанием ПАВ, полимеров или наночастиц является «core flood» эксперимент. Тестирование заключается в нагнетании вытесняющей жидкости в смесь сырая нефть/порода с измерением зависимости количества вытесненной нефти от давления и температуры среды (рис.2).

Нефть в пластовой структуре удерживается за счет капиллярных сил [69]. Таким образом, их снижение является основным методом повышения нефтеотдачи. Это достигается снижением смачиваемости породы и межфазного натяжения между пластовыми жидкостями и породой [70]. Смачиваемость определяется, как способность жидкости распространяться по твердой поверхности, в присутствии других несмешивающихся жидкостей [71]. Данный параметр напрямую связан с взаимодействиями жидкость-жидкость и жидкость-твердое тело, что зависит от типа минералов, образующих породу, распределения пор и площади поверхности, а также от состава жидких фаз и температуры [11]. Хорошо известно, что поверхностно-активные вещества могут уменьшать, как смачиваемость породы, так и межфазное натяжение. Кроме того, ПАВ способствует эмульгированию и последующему вытеснению капель нефти (рис.2), что в целом приводит к повышению нефтеотдачи. Однако в ряде работ отмечается, что использование исключительно ПАВ не всегда экономически оправдано и неприменимо в месторождениях с жесткими условиями (НРПТ) (например, [72]). В результате ряда последних исследований наночастицы предложены в качестве альтернативы химическим агентам.

Действие наночастиц и ПАВ происходит по сходным механизмам [73,74]. Механизм данного процесса объясняется расклинивающим давлени-

ем, которое характеризует состояние тонкого слоя (плёнки) жидкости или газа в промежутке между поверхностями. В работе [75] исследовано распространение на твердой поверхности несмешивающихся с нефтью жидкостей с содержанием наночастиц и показано, что наночастицы образуют двумерные слоистые структуры в клиновой трехфазной области контакта (подложка-нефть-вода). Было показано, что адсорбция наночастиц на поверхности песчаника изменяет смачиваемость, что подтверждено с использованием электронной микроскопии. Для лучшего понимания механизма смачиваемости в присутствии наножидкостей в работе [76] выполнена серия экспериментов по измерению угла контакта при высоких давлениях и температурах.

В ряде исследований было показано, что использование суспензий наночастиц также позволяет уменьшить межфазное трение во время процессов EOR. Так, наночастицы оксида алюминия, диспергированные в морской воде, способны снижать межфазное натяжение с 19.2 мН/м до 12.8 мН/м [77]. Был обнаружен синергетический эффект совместного использования наносуспензий и ПАВ. Обнаружено, что наночастицы оксида цинка позволяют существенно повысить эффективность ПАВ додецилсульфата натрия в снижении межфазного трения [78]. Примеры использования наносуспензий с содержанием УНМ приведены в разделе 3.3.

2.2.2. Контроль вязкости вытесняющего агента

Подвижность вытесняющей жидкости определяется проницаемостью породы и вязкостью жидкости. В ряде исследований было показано, что необходим подбор вязкости вводимой жидкости для достижения лучшей эффективности вытеснения нефти [79]. С одной стороны высокая подвижность способствует эффективному

извлечению нефти, с другой, из-за морфологической неустойчивости границы раздела фаз между двумя жидкостями (неустойчивость Саффмана-Тейлора) может приводить к остановке процесса вытеснения в целом [79].

Ранее, для повышения эффективности извлечения, полимеры успешно использовались в качестве агента, контролирующего вязкость [9]. Однако в пластах с высокими температурами, давлениями и соленостью полимерные жидкости могут разлагаться, что снижает их вязкость и эффективность вытеснения [80]. Использование наночастиц позволяет повысить вязкость вытесняющей жидкости без снижения стабильности. В работе [81] было исследовано влияние дисперсий наночастиц кремнезема на вытеснение нефти полимерами при различной минерализации флюидов. Добавление наночастиц кремнезема в раствор позволило повысить устойчивость и показало большую эффективность, по сравнению с водным и полимерным (без наночастиц) вытеснением. Наибольшая степень извлечения была достигнута при вязкости жидкости около 35 сП.

2.2.3. Влияние адсорбции наночастиц на эффективность вытеснения

Деактивация химических веществ, используемых в процессах вытеснения, при их адсорбции на поверхности породы снижает экономические характеристики SEOR процессов [11]. Адсорбция химических веществ происходит за счет ковалентных, водородных и гидрофобных взаимодействий с породой. Таким образом, модификация поверхности породы необходима для предотвращения этих взаимодействий.

В последнее время, в ряде лабораторных экспериментов исследовано использование наночастиц для уменьшения адсорбции химических веществ на поверхности пластовой породы [82-84]. В частности, было показано, что для снижения адсорбции ПАВ перспективна их стабилизация на границах раздела жидкость-жидкость или жидкость-воздух. Добавление наночастиц в раствор ПАВ способствует этому процессу. Так, в источнике [84] изучали адсорбцию анионных, катионных и неионогенных ПАВ на карбонатной породе в присутствии наночастиц ZrO_2 . В результате исследования был сделан вывод, что добавление наночастиц ZrO_2 к лаурил-сульфату натрия повышает поверхностную активность, увеличивая адсорбцию на границе раздела жидкость/жидкость, а не твердое тело-жидкость. В недавнем исследовании [85] сообщалось, что наночастицы с полимерным покрытием также снижают адсорбцию химикатов на поверхности породы. Важным аспектом является низкая адсорбция непосредственно самих наночастиц на поверхности породы. Одним из путей решения этой проблемы является модификация поверхностных свойств наночастиц для придания им заряда аналогичного заряду породы [86].

2.2.4. Применение нанотехнологий в тепловых EOR-процессах

Нанотехнологии также перспективны в ТЕОР процессах извлечения тяжелой нефти. Закачка пара, периодическим способом или парогравитационным дренажом является стандартной технологией в тепловых EOR методах. Преимуществом применения наноматериалов в этих процессах является свойство наночастиц быстро поглощать тепло и сохранять его в течение нескольких часов. В ряде исследований (например, [87]) было показано, что наночастицы меди и никеля являются лучшими кандидатами для абсорбции тепла в этом процессе.

В целом, основными недостатками стандартных процессов ТЕОР с использованием пара являются выбросы больших количеств углекислого газа (парниковый газ) и потери тепла. В настоящий момент развиваются «зеленые технологии», основанные на электромагнитном нагреве скважин, предварительно насыщенных суспензиями наночастиц [88]. В этом случае, излучаемая частота поглощается диэлектрическим наноматериалом и, таким образом, увеличивает температуру в скважине. В работе [89] предложено использование углеродных наноматериалов в этом варианте процесса, так как УНТ является эффективным поглотителем электромагнитного излучения.

2.2.5. Стабилизация пен и эмульсий для EOR-процессов

Методы теплового извлечения и другие методы EOR на основе растворителей неприменимы в месторождениях тяжелой нефти с НРНТ-условиями. В качестве альтернативы, для разработки таких месторождений целесообразны методы вытеснения с использованием эмульсий, образующихся в результате взаимодействия щелочных ПАВ и кислой нефти. В этих процессах эффективность процесса повышается с увеличением стабильности эмульсий. В ряде исследований показано, что повышение устойчивости эмульсий может быть достигнуто с добавкой к ПАВ наночастиц [25, 90, 91].

С применением нанотехнологий также может быть повышена и стабильность пен в широком диапазоне условий [92]. В частности, было показано, что концентрация наночастиц оказывает большое влияние на стабильность пен на основе CO_2 . Оптимальные характеристики достигнуты при содержании 0.05 масс.% УНТ. Предотвращение слияния пузырьков, стабилизированных наночастицами, может происходить при повышении электростатического отталкивания в растворе даже при высоких значениях солености [93].

3. Применение углеродных наноматериалов в добыче нефти

Создание наноструктурированных углеродных материалов и сорбентов является одним

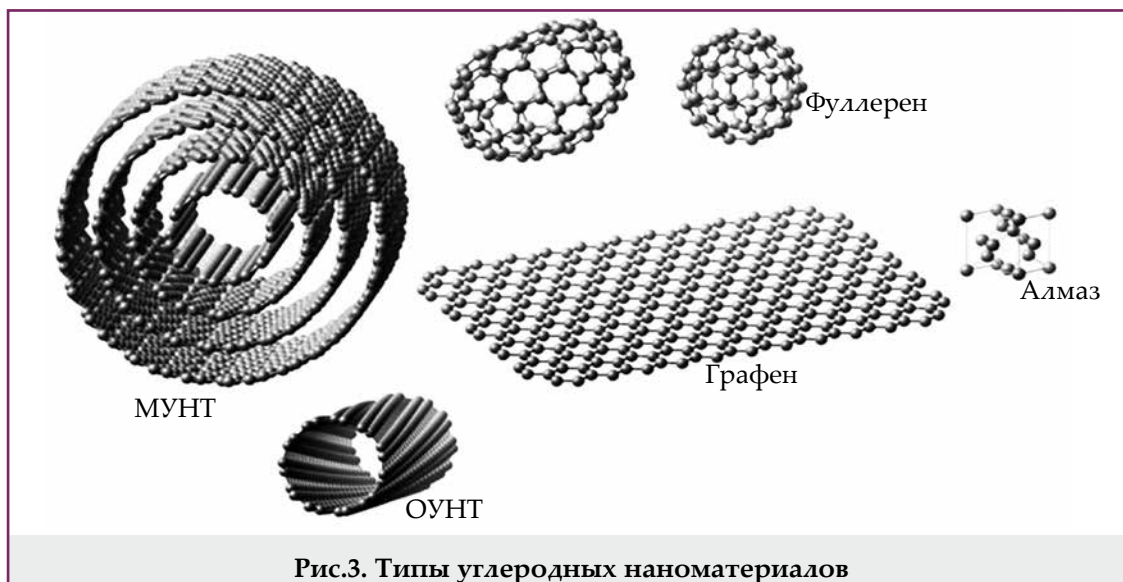


Рис.3. Типы углеродных наноматериалов

из наиболее активно развивающихся направлений нанотехнологий. Углерод характеризуется высоким разнообразием аллотропных модификаций. С развитием электронной микроскопии, к известным графиту, алмазу и аморфному углероду, добавились углеродные нановолокна (первое получение [94], доказательство морфологии [95]), фуллерен [96] и углеродные нанотрубки ([97-99]).

В различных задачах добычи нефти наибольшее распространение получили углеродные нанотрубки (ОУНТ, МУНТ), графеноподобные материалы (графен: нанолепестки, наноленты, оксид графена, многослойные графены), а также композиционные нанодисперсии с их содержанием.

3.1. Углеродные нанотрубки и методы их модификации

Одностенные углеродные нанотрубки представляют собой агрегаты из свернутых в полые цилиндры листов графена с диаметром до нескольких десятков нанометров. В случае, МУНТ агрегаты состоят из коаксиально вложенных ОУНТ трубок. За последние 20 лет, количество экспериментальных и прикладных работ, посвященных синтезу и применению углеродных нанотрубок существенно увеличилось. В результате активных исследований, себестоимость этих материалов существенно снизилась [100].

В настоящий момент подробно изучены процессы модификации УНТ, которые позволяют создавать материал с заданными поверхностными характеристиками. Наряду со стандартным окислением поверхности [101], которое повышает гидрофильность материала, хорошо отработаны методы радикальной сшивки, циклоприсоединения, карбоксилирования и создание поверхностных дефектов с помощью УЗВ обработки [102].

3.2. Графен и графеноподобные структуры

Другим примером углеродных наноматериалов перспективных для использования в нефтяной промышленности является графен. Графен обра-

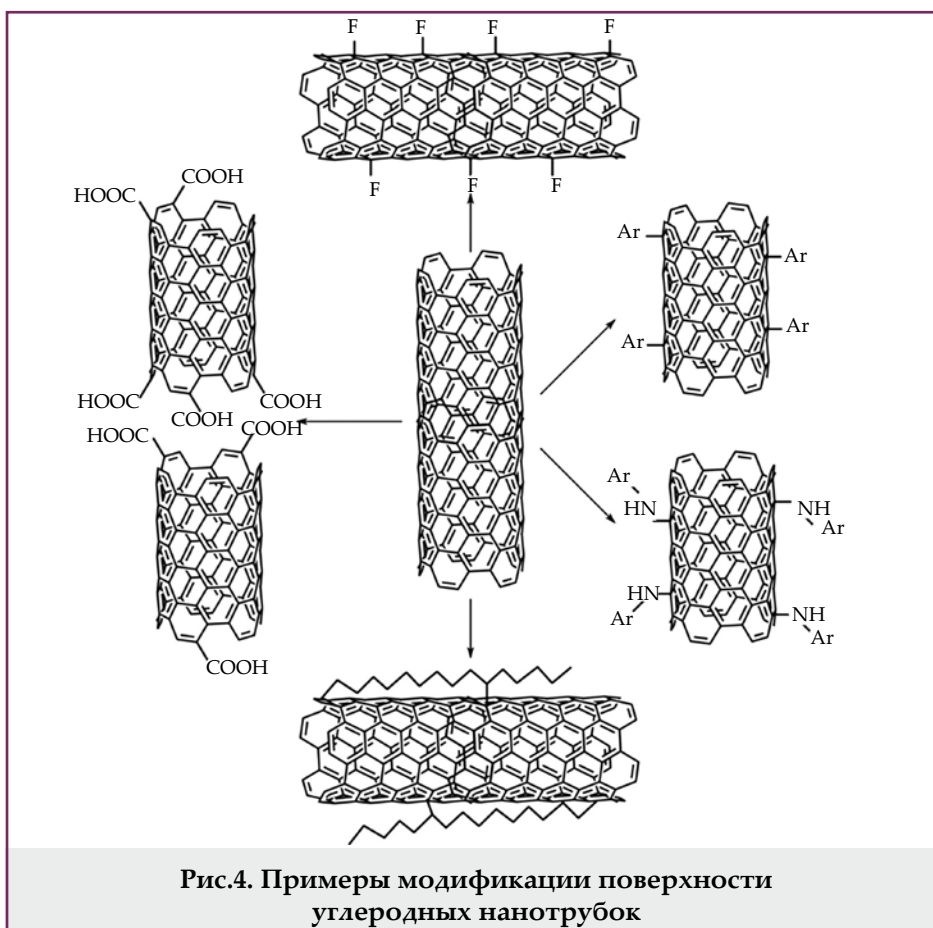
зован слоем атомов углерода в sp^2 -гибридизации, образующих гексагональную двумерную кристаллическую решётку. Структура и электронная конфигурация графена определяют ряд его уникальных свойств: удвоенная площадь поверхности, эластичность и механическая прочность, а также сверхвысокие теплопроводность и электропроводность [103]. В настоящее время из-за высокой цены, однослойный графен малоприменим в таких масштабных процессах, как интенсификация добычи нефти или бурение и его приложения преимущественно ограничиваются микроэлектроникой. Тем не менее, существует ряд родственных относительно не дорогих материалов, из которых следует отметить оксид графена и многослойные (5-10 слоев) графены [104].

3.3. Применение углеродных наноматериалов в процессах бурения и интенсификации добычи нефти

3.3.1. Процессы бурения

Основными областями добычи нефти, в которых применяются углеродные наноматериалы – процессы бурения и интенсификации вытеснения нефти.

В работе [105] показан потенциал технического углерода в повышении вязкости и стабильности водных растворов полиакриламида и определено оптимальное содержание 0.05-0.5 мас.% этих наночастиц. Состав был предложен для бурения неконсолидированных сланцев, где высокая стабильность является необходимой. УНТ привлекли значительное внимание благодаря повышению реологических характеристик растворов [106]. Исследовано применение УНТ для повышения стабильности буровых растворов в ultra-НРНТ условиях и представлено две рецептуры для их производства [107]. В исследованиях [108,109] изучено поведение потока буровых растворов на основе сложных эфиров и воды, с диспергированными МУНТ частицами (30 нм) и показано повышение стабильности эмульсий в случае жидкостей на основе сложных эфиров. Была предложена



на оптимальная концентрация МУНТ (0.01 ррb) для достижения наименьших фильтрационных потерь в условиях НРНТ. В работе [110] исследовано влияние гибридных наночастиц, состоящих из углеродных нанотрубок и кремнезема, на реологические свойства бурового раствора и обнаружено существенное повышение их эффективной вязкости. Исследовано влияние функционализации МУНТ на реологические свойства буровых растворов на водной основе [111] и показано, что, помимо концентрации МУНТ, увеличение концентрации поверхностных функциональных групп приводит к росту пластической вязкости и предела текучести. Позже, в 2018 году, изучено влияние ПЭГ-модифицированных МУНТ на буровые растворы [112]. Было найдено существенное изменение всех реологических параметров, а также снижение потерь бурового раствора в зависимости от концентрации наноматериалов в растворе. В исследовании [113] выявили значительное улучшение реологического поведения буровых растворов с инверсной эмульсией полиэтиленгликоль-МУНТ. Также было обнаружено, что эти углеродные наноструктуры имеют большой потенциал для устранения проблем, связанных с повреждением пласта. Обнаружено значительное увеличение стабильности водонефтяной эмульсии в присутствии наногрида нанотрубок УНТ/диоксид кремния [114]. Было обнаружено, что полученная эмульсия подходит для разделения с использованием процессов

центрифугирования или фильтрации. В работе [115] предложено использование оксида графена (ГО) в качестве высокоэффективной добавки для уменьшения фильтрационных потерь бурового раствора на водной основе. Лучшие результаты были достигнуты при 0.2 масс.% содержания ГО. Кроме того, добавка ГО повышала стабильность раствора при высоких температурах, что отличается от обычных добавок на основе глины. Также, в [116] выявлено положительное влияние добавки оксида графена на реологические свойства и фильтрационные свойства суспензии бентонита и барита. В работе [117] также показано, что смесь графена и МУНТ вызывает значительное улучшение реологических свойств и повышение стабильности образцов бурового раствора. В работе [118] изучено влияние добавок нанографита (40 нм) на свойства бурового раствора. Достигнуто 50%-ное уменьшение фильтрационных потерь. Показано значительное повышение подъемной силы буровых жидкостей модифицированных МУНТ [119,120]. Улучшение было связано с более высокой стабильностью буровых растворов с МУНТ, поскольку был найден баланс между поверхностными силами и силой тяжести.

Исследовано применение графеновых наночастиц в улучшенной смазке для буровых долот. При использовании буровых растворов, модифицированных 3 масс.% графеновыми наночастицами, наблюдалось увеличение скорости проникновения примерно в три раза и снижение значений

крутящего момента на 44%, что, в свою очередь, привело к увеличению срока службы долота в НРНТ условиях [121].

Важной характеристикой буровых растворов является высокая теплопроводность, что необходимо для эффективного охлаждения бурильного оборудования [122,123]. В последние годы был проведен ряд исследований по анализу тепловых свойств буровых растворов с содержанием углеродных наночастиц. В частности, в работах [124,125] пришли к выводу о нелинейном росте теплопроводности дисперсий с содержанием углеродных наночастиц. Наблюдалось увеличение теплопроводности образцов бурового раствора до 23.2% при добавлении 1 масс.% МУНТ [126]. В работе [127] подобран состав из углеродных нанотрубок, полимеров и ПАВ для повышения термостабильности жидкостей. Показано, что теплопроводность полимерных жидкостей повышалась при более высокой температуре. Лучшие результаты достигнуты для смеси метилового эфира полиметакриловой кислоты и УНТ. В исследовании [106] достигнуто 58% повышения теплопроводности в образцах флюидов, содержащих различные концентрации УНТ. Показан рост стабильности суспензий МУНТ, модифицированных катионным хитозаном и получен 11% рост теплопроводности образцов жидкости [128].

Хорошо известно широкое применение PDC-долот в нефтедобыче [129]. В работе [52] сообщили о существенном улучшении характеристик PDC, в частности, для работы в НРНТ условиях. Было показано что дериватизация (функционализация) наноалмаза обеспечивает уникальные характеристики поверхности [130,131].

3.3.2. Углеродные наноматериалы в EOR процессах

В последнее время, возросло количество работ, посвященных использованию углеродных наноматериалов в технологиях по интенсификации добычи нефти [15]. Общей тенденцией исследований углеродных наноматериалов (преимущественно УНТ и графен) в EOR процессах является создание сложных композиций, в которых УНТ используется наряду с ПАВ, полимерами и другими наночастицами неорганической природы (SiO_2 , Al_2O_3). Эти наножидкости, также известные как «Smart Fluids», традиционно используются в химическом вытеснении нефти (SEOR), что включает использование ПАВ, полимеров и химикатов [11,132-136]. Это связано со схожестью механизмов процесса – снижение смачиваемости пластов, снижение межфазного натяжения и, таким образом, увеличение подвижности капель нефти, удерживаемых капиллярными силами [135].

Далее представлены примеры применения УНТ и графеновых материалов, как двух наиболее распространенных наноструктур на основе углерода для улучшения нефтеотдачи. В работе [137] провели обширную серию экспериментов по определению эффективности углеродных наноматериалов для EOR карбонатного пласта ArabD, с минерализацией

пластовой воды около 120000 ppm и температурой выше 100 °C. В ходе реализации проекта были разработаны флуоресцентные углеродные наночастицы и показана их эффективность для извлечения нефти до уровня выше 96%. Данная разработка была коммерциализирована (A-Dots™). Выявлено положительное влияние ПАВ на стабильность наногрида, состоящего из диоксида кремния и одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ), за счет уменьшения межфазного натяжения [91]. В тоже время, изменение солёности не оказало существенного влияния. Интересно, что раствор наногридных частиц был стабилен в течение более одного месяца даже при большем содержании ПАВ (> 0.01 масс.%). Кроме того, исследование выявило положительное влияние повышения pH на стабильность образцов жидкости. В ряде экспериментов по вытеснению нефти [137], выявлено положительное влияние МУНТ в НРНТ условиях. В частности, исследование показало быстрое снижение вязкости нефти и повышение коэффициента извлечения в два раза при введении МУНТ в присутствии электромагнитных волн. В работе [139] исследован потенциал гидрофобных наножидкостей с содержанием МУНТ для повышения нефтеотдачи и подвижности нефти. Оптимальная концентрация наножидкости наблюдалась при 0.05 масс.% МУНТ.

Проведено исследование по применению гибридов углеродных нанотрубок (УНТ) для стабилизации пен и эмульсий [140]. Стабилизация нанодисперсий УНТ обеспечивалась высокополярными полимерами (гуммиарабик и поливинилпирролидон), а также гидроксипропилцеллюлозой в качестве вторичной добавки. Было показано успешное распространение суспензий наночастиц в образцах керна ($k = 200$ мД). В исследовании [141] сообщается о тенденции к снижению значений межфазного натяжения и изменению смачиваемости образцов карбонатов и песчаника при использовании наногрида SiO_2 -МУНТ без дополнительных ПАВ. Протестирована эффективность ОУНТ, МУНТ и активированного угля для создания эмульсий Пикеринга в химическом EOR [142]. Было отмечено, что МУНТ является наиболее эффективным EOR-агентом, который способствует изменению смачиваемости наряду со значительным снижением межфазного натяжения. Исследована эффективность МУНТ-стабилизированных композиций, синтезированных из полимеров и ПАВ, и сообщали о более значительных перепадах давления, из-за более высокой стабильности пен [143]. В работе [144] изучено влияние МУНТ на ход EOR-процесса и подобрана концентрация 0.3 масс.% углеродных нанотрубок для достижения оптимального поверхностного натяжения и высокого коэффициента извлечения.

В работах [145,146] в качестве молекулярного диспергирующего агента предложен оксид графена, который повышал устойчивость углеродных наноструктур (графит, УНТ) к осаждению

в водных средах. Оксид графена, как амфифил с гидрофильными краями и более высокой гидрофобной базальной плоскостью, играет роль ПАВ, которое адсорбируется на границе раздела и уменьшает значения межфазного натяжения. В исследовании [147] было показано увеличение извлечения нефти на 16-19% при использовании 0.5-2 мг/мл синтезированного

нанопористого сульфированного графена. Это увеличение было связано с тенденцией наночастиц мигрировать к границе раздела нефть-вода и создавать стабильные эмульсии. Кроме того, эти наночастицы привели к снижению межфазного натяжения на 11% и снижению смачиваемости образцов песчаника.

Заключение

- Проведен анализ литературных источников, посвященных применению углеродных наноматериалов (УНМ) в нефтедобывающей отрасли. Показано, что наносистемы с содержанием УНМ (нанодисперсии, наноэмульсии, нанопены, а также твердые композиционные материалы) перспективны на всех этапах нефтедобывающей отрасли (геологоразведка, задачи бурения и интенсификация добычи нефти). Наибольшее число работ посвящено применению УНМ в процессах бурения и интенсификации добычи нефти.
- Эффективность УНМ в качестве компонентов буровых растворов связана, как с повышением реологических свойств в широком диапазоне температур и давлений (возможность применения в НРНТ-условиях), так и для создания фильтрационной нанокорки на поверхности породы с целью снижения потерь буровой жидкости и повышения стабильности скважины. Важным аспектом является повышенная теплопроводность нанодисперсий с содержанием углеродных наноматериалов (УНТ, Графен), что позволяет более эффективно охлаждать буровые инструменты.
- При использовании УНМ в SEOR процессе, как и в случае неуглеродных наночастиц, основным механизмом вытеснения нефти является снижение капиллярных сил. Это достигается за счет снижения смачиваемости породы и межфазного трения. В ряде исследований УНМ (углеродные нанотрубки или модифицированный графен) играют роль компонента стабилизирующей наноэмульсии, CO₂-нанопены, а также жидкости с содержанием ПАВ и (или) полимеров. В этом случае, объемная структура углеродных наноматериалов (2D-структура графена и протяженная углеродных нанотрубок) дает методу дополнительные преимущества.

References

1. Serrano, E., Rus, G., García-Martínez, J. (2009). Nanotechnology for sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2373-2384.
2. Khavkin, A. Ya. (2016). Nanotechnologies in oil and gas production. *Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas*.
3. Mohindroo, J. J., Garg, U. K., Sharma, A. K. (2016). Optical properties of stabilized copper nanoparticles. *AIP Conference Proceedings*, 1728, 020534.
4. Jazayeri, M. H., Aghaie, T., Avan, A., et al. (2018). Colorimetric detection based on gold nanoparticles (GNPs): An easy, fast, inexpensive, low-cost and short time method in detection of analytes (protein, DNA, and ion). *Sensing and Bio-Sensing Research*, 20, 1-8.
5. An, K., Alayoglu, S., Musselwhite, N., et al. (2014). Designed catalysts from Pt nanoparticles supported on macroporous oxides for selective isomerization of n-hexane. *Journal of the American Chemical Society*, 136(19), 6830-6833.
6. Koskin, A. P., Popov, S. A., Shcherbашina, A. V. (2019). The composition development and the heat transfer investigation of zinc oxide nanofluids. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2(43), 7-15.
7. Hao, Q., Li, M., Coleman, G. J., et al. (2013). Glass-oxide nanocomposites as effective thermal insulation materials. *MRS Proceedings*, 1558, Mrss13-1558-z09-07.
8. Yu, W., Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-17.
9. Saleh, T. A. (2018). Nanotechnology in oil and gas industries: principles and applications. *Springer*.

10. Agista, M., Guo K., Yu, Z. (2018). A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery. *Applied Sciences*, 8(871), 1-29.
11. Bera, A., Belhaj, H. (2016). Application of nanotechnology by means of nanoparticles and nanodispersions in oil recovery – A comprehensive review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 1284-1309.
12. Kazemzadeh, Y., Shojaei, S., Riazi, M., Sharifi, M. (2018). Review on application of nanoparticles for EOR purposes; a critical of the opportunities and challenges. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(2), 237-246.
13. Gbadamosi, A. O., Junin, R., Manan, M. A., et al. (2018). Recent advances and prospects in polymeric nanofluids application for enhanced oil recovery. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 66, 1-19.
14. Khalil, M., Jan, B. M., Tong, C. W., Berawi, M. A. (2017). Advanced nanomaterials in oil and gas industry: Design, application and challenges. *Applied Energy*, 191, 287-310.
15. Hajiabadi, S. H., Aghaei, H., Kalateh-Aghamohammadi, M., Shorgasthi, M. (2020). An overview on the significance of carbon-based nanomaterials in upstream oil and gas industry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 186, 106783.
16. Khodakov, G.S. (2003). Rheology of suspensions. Phase flow theory and its experimental justification. *Russian Journal of General Chemistry*, 47(2), 33-44.
17. Agi, A., Junin, R., Gbadamosi, A. (2018). Mechanism governing nanoparticle flow behaviour in porous media: insight for enhanced oil recovery applications. *International Nano Letters*, 8(2), 49-77.
18. Koskin, A. P., Zibareva, I. V., Vedyagin, A. A. (2020) Conversion of rice husk and nutshells into gaseous, liquid, and solid biofuels. In: Nanda, S., Vo, N. D. V., Sarangi, P. (eds) *Biorefinery of alternative resources: targeting green fuels and platform chemicals*. Singapore: Springer.
19. Kong, X., Ohadi, M. Applications of micro and nano technologies in the oil and gas industry-an overview of the recent progress. (2010, November) SPE-138241-MS. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Society of Petroleum Engineers.
20. Peng, B., Zhang, L., Luo, J., et al. (2017). A review of nanomaterials for nanofluid enhanced oil recovery. *RSC Advances*, 7(51), 32246-32254.
21. Hamza, M. F., Sinnathambi, C. M., Merican, Z. M. (2017). Recent advancement of hybrid materials used in chemical enhanced oil recovery (CEOR): A review. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 206, 012007.
22. Raman, N. S., Mohanasundaram, P., Seshubabu, N., et al. (2015). Process for simultaneous production of carbon nanotube and a product gas from crude oil and its products. *WO Patent* 2015101917.
23. Gupta, A., Eral, B. H., Hatton, A. T., Patrick S. Doyle, P. S. (2016). Nanoemulsions: formation, properties and applications. *Soft Matter*, 12, 2826-2841.
24. Delmas, T., Piraux, H., Couffin, A.-C., et al. (2011) How to prepare and stabilize very small nanoemulsions. *Langmuir*, 27(5), 1683-1692.
25. Zhang, T., Roberts, M., Bryant, S. L., Huh, C. (2009, April). Foams and emulsions stabilized with nanoparticles for potential conformance control applications. SPE-121744-MS. In *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Society of Petroleum Engineers.
26. Rahmani, A. R., Athey, A. E., Chen, J., Wilt, M. J. (2014). Sensitivity of dipole magnetic tomography to magnetic nanoparticle injectates. *Journal of Applied Geophysics*, 103, 199-214.
27. Song, Y., Marcus, C. (2007, January) Hyperpolarized silicon nanoparticles: reinventing oil exploration. In: *International presentation presented at the Schlumberger seminar, Schlumberger, College Station, TX, USA*.
28. Pratyush, S., Sumit, B. (2010). Nano-robots system and methods for well logging and borehole measurements. *US Patent* 20100242585.
29. Jahagirdar, S. R. (2008, September). Bypassed oil detection using spectroscopy and nano technology. SPE-120200-MS. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
30. Badruzzaman, A., Nguyen, P. T., Stonard, S. W., Logan, J. P. (1997, March). Nuclear logging-while-drilling measurement: an assessment. SPE-37745-MS. In *Middle East Oil Show and Conference*. Society of Petroleum Engineers.
31. Sharma, M.M., Chenevert, M.E., Guo, Q., et al. (2012, October). A new family of nanoparticle based drilling fluids. SPE-160045-MS. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
32. Pang, X., Boul, P. J., Cuello Jimenez, W. (2014). Nanosilicas as accelerators in oilwell cementing at low temperatures. *SPE Drilling & Completion*, 29(01), 98-105.
33. Agarwal, A., Bakshi, S. R., Lahir, D. (2011). Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites. *Taylor & Francis*.
34. Sun, X., Zhang, Y., Chen, G., Gai, Z. (2017). Application of nanoparticles in enhanced oil recovery: a critical review of recent progress. *Energies*, 10(345), 1-33.
35. Shamilov, V. M. (2018). Development of nano-technologies in oil industry. *Oil. Gas. Novations*, 1, 16-24.

36. Shamilov, V. M., Babayev, E. R., Aliyeva, N.F., et al. (2017). The rheological properties changes of oil under the influence of polymer nanocomposites. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 3, 23-26.
37. Alvarado, V., Manrique, E. (2010). Enhanced oil recovery: an update review. *Energies*, 3(9), 1529-1575.
38. Chun, H., Daigle, H., Prodanović, M., Prigiobbe, V. (2019). Practical nanotechnology for petroleum engineers. *Taylor & Francis*.
39. Medina, O. E., Olmos, C., Lopera, S. H., et al. (2019). Nanotechnology applied to thermal enhanced oil recovery processes: a review. *Energies*, 12(24), 1-36.
40. Iskandar, F., Dwinanto, E., Abdullah, M., et al. (2016). Viscosity reduction of heavy oil using nanocatalyst in aquathermolysis reaction. *KONA Powder and Particle Journal*, 33, 3-16.
41. Gomez, V., Alexander, S., Barron, A. R. (2017). Proppant immobilization facilitated by carbon nanotube mediated microwave treatment of polymer-proppant structures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 513, 297-305.
42. Lurie, M. V., Arbuzov, N. S., Oksengendler, S. M. (2012). Transmission of liquids with anti-turbulent additives. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies*, 2, 56-60.
43. Wan, S., Bi, H., Sun, L. (2016). Graphene and carbon-based nanomaterials as highly efficient adsorbents for oils and organic solvents. *Nanotechnology Reviews*, 5(1), 3-22.
44. Gupta, S., Tai, N.-H. (2016). Carbon materials as oil sorbents: a review on the synthesis and performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(5), 1550-1565.
45. Saleh, T. A., Abdullahi, I. M. (2018). Insights into the fundamentals and principles of the oil and gas industry: the impact of nanotechnology. In: *Nanotechnology in oil and gas industries: principles and applications*, Saleh, T. A. (Ed.). Springer.
46. Iruretagoyena, D., Montesán, R. (2018). Selective sulfur removal from liquid fuels using nanostructured adsorbents. In: *Nanotechnology in oil and gas industries: principles and applications*, T.A. Saleh (Ed.). Springer.
47. Rashidi, A., Mohammadzadeh, F., Hassani, S. S. (2018). Hydrodesulfurization (HDS) process based on nano-catalysts: the role of supports. In: *Nanotechnology in oil and gas industries: principles and applications*, Saleh, T. A. (Ed.). Springer.
48. Saleh, T. A., Abdullahi, I. M. (2018). Advances in nanocatalyzed hydrodesulfurization of gasoline and diesel fuels. In: *Nanotechnology in oil and gas industries: principles and applications*, Saleh, T. A. (Ed.). Springer.
49. Hansen, L. P., Ramasse, Q. M., Kisielowski, C., et al. (2011). Atomic-scale edge structures on industrial-style MoS₂ nanocatalysts. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(43), 10153-10156.
50. Ho, C. Y., Yusup, S., Soon, C. V., Arpin, M. T. (2016). Rheological behaviour of graphene nano-sheets in hydrogenated oil-based drilling fluid. *Procedia Engineering*, 148, 49-56.
51. Sedaghatzadeh, M., Khodadadi, A. A., Birgani, M. (2012). An improvement in thermal and rheological properties of water-based drilling fluids using multiwall carbon nanotube (MWCNT). *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 1, 55-65.
52. Amanullah, M., Al-Tahini, A. M. (2009, May). Nano-Technology - Its significance in smart fluid development for oil and gas field application. SPE-126102-MS. In *SPE Saudi Arabia Section Technical. Society of Petroleum Engineers*.
53. Huang, T., Crews, J. B. (2008). Nanotechnology applications in viscoelastic surfactant stimulation fluids. *SPE Production & Operations*, 23(04), 512-517.
54. Sayyadnejad, M. A., Ghaffarian, H. R., Saeidi, M. (2008). Removal of hydrogen sulfide by zinc oxide nanoparticles in drilling fluid. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5(4), 565-569.
55. Sengupta, S., Kumar, A. (2013, March). Nano-ceramic coatings - a means for enhancing bit life and reducing drill string trips. IPTC-16474-MS. In *International Petroleum Technology Conference. Society of Petroleum Engineers*.
56. Chakraborty, S., Agrawal, G., DiGiovanni, A., Scott, D. E. (2012, June). The trick is the surface-Functionalized nanodiamond PDC technology. SPE-157039-MS. In *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
57. Zhang, Z., Xu, Z., Salinas, B. J. (2012, June). High strength nanostructured materials and their oil field applications. SPE-157092-MS. In *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
58. Shamilov, V. M., Safarov, Ya. O., Shamilov, F. V. (2017). Isolation of extraneous water using nanostructured foam cement mortar. *Oil and Gas Territory*, 1-2, 52-56.
59. Quercia, G., Brouwers, H. J. H., Garnier, A., Luke, K. (2016). Influence of olivine nano-silica on hydration and performance of oil-well cement slurries. *Materials & Design*, 96, 162-170.

60. Murtaza, M., Rahman, M. K., Al-Majed, A. A. (2016, November). Mechanical and microstructural studies of nanoclay based oil well cement mix under high pressure and temperature application. IPTC-18991-MS. In *International Petroleum Technology Conference. Society of Petroleum Engineers*.
61. Stefanidou, M., Papayianni, I. (2012). Influence of nano-SiO₂ on the portland cement pastes. *Composites Part B: Engineering*, 43(6), 2706-2710.
62. De la Roi, R., Egyed, C., Lips, J.-P. (2012, June). Nano-engineered oil well cement improves flexibility and increases compressive strength: A laboratory study. SPE-156501-MS. In *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
63. Y. Feng, Y., Liu, s., Liu, H., et al. (2018). Study on mechanical performance of set cement modified with CNT. *Drilling Fluid and Completion Fluid*, 35(6), 93-97.
64. Sheng, J. (2010). Modern chemical enhanced oil recovery: theory and practice. *Gulf Professional Publishing*.
65. Shamilov, V., Babayev, E., Kalbaliyeva, E., Shamilov, F. (2017). Polymer nanocomposites for enhanced oil recovery. *Materials Today: Proceedings*, 4, 70-74.
66. Shamilov, V. M., Babayev, E. R. (2016). Development of multifunctional composite mixtures based on watersoluble surfactant, polymer and metallic nanopowder as agents of oil displacement. *Oil and Gas Territory*, 6, 60-63.
67. Shamilov, V. M., Babayev, E. R., Aliyeva, N. F. (2017). Polymer nanocomposites based on carboxymethylcellulose and nanoparticles (Al and Cu) for enhanced oil recovery. *Oil and Gas Territory*, 3, 34-39.
68. Shamilov, V. M., Gadzhieva, N. M., Babayev, E. R., Ismayilova, M. K. (2014). Investigation of the effect of nanoparticles on nanosystems' rheological parameters. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 11-12, 24-27.
69. Towler, B. F., Lehr, H. L., Austin, S. W., et al. (2017). Spontaneous imbibition experiments of enhanced oil recovery with surfactants and complex nano-fluids. *Journal of Surfactants and Detergents*, 20(2), 367-377.
70. Melrose, J. C. (1974). Role of capillary forces in detennining microscopic displacement efficiency for oil recovery by waterflooding. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 13(04), 1-9.
71. Bera, A., S, K., Ojha, K., Kumar, T., Mandal, A. (2012). Mechanistic study of wettability alteration of quartz surface induced by nonionic surfactants and interaction between crude oil and quartz in the presence of sodium chloride salt. *Energy & Fuels*, 26(6), 3634-3643.
72. Maerker, J. M., Gale, W. W. (1992). Surfactant flood process design for Loudon. *SPE Reservoir Engineering*, 7(01), 36-44.
73. Giraldo, J., Benjumea, P., Lopera, S., et al. (2013). Wettability alteration of sandstone cores by alumina-based nanofluids. *Energy & Fuels*, 27(7), 3659-3665.
74. Hammond, P. S., Unsal, E. (2011). Spontaneous imbibition of surfactant solution into an oil-wet capillary: wettability restoration by surfactant-contaminant complexation. *Langmuir*, 27(8), 4412-4429.
75. Wasan, D., Nikolov, A., Kondiparty, K. (2011). The wetting and spreading of nanofluids on solids: Role of the structural disjoining pressure. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 16(4), 344-349.
76. Cao, N., Mohammed, A., Babadagli, T. (2015, October). Wettability alteration of heavy-oil/bitumen containing carbonates using solvents, high pH solution and nano/ionic liquids. OTC-26068-MS. In *Offshore Technology Conference. Society of Petroleum Engineers*.
77. Ju, B., Fan, T., Ma, M. (2006). Enhanced oil recovery by flooding with hydrophilic nanoparticles. *China Particuology*, 4(1), 41-46.
78. Moghadam, T. F., Azizian, S. (2014). Effect of ZnO nanoparticles on the interfacial behavior of anionic surfactant at liquid/liquid interfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 457, 333-339.
79. Wang, J., Dong, M. (2009). Optimum effective viscosity of polymer solution for improving heavy oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 67(3-4), 155-158.
80. Ramsden, D. K., McKay, K. (1986). Degradation of polyacrylamide in aqueous solution induced by chemically generated hydroxyl radicals: Part I-Fenton's reagent. *Polymer Degradation and Stability*, 14(3), 217-229.
81. Maghzi, A., Kharrat, R., Mohebbi, A., Ghazanfari, M. H. (2014). The impact of silica nanoparticles on the performance of polymer solution in presence of salts in polymer flooding for heavy oil recovery. *Fuel*, 123, 123-132.
82. Ma, H., Luo, M., Dai, L. L. (2008). Influences of surfactant and nanoparticle assembly on effective interfacial tensions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10(16), 2207-2213.

83. Sharma, K. P., Aswal, V. K., Kumaraswamy, G. (2010). Adsorption of nonionic surfactant on silica nanoparticles: structure and resultant interparticle interactions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 114(34), 10986-10994.
84. Esmailzadeh, P., Bahramian, A., Fakhroueian, Z. (2011). Adsorption of anionic, cationic and nonionic surfactants on carbonate rock in presence of ZrO₂ nanoparticles. *Physics Procedia*, 22, 63-67.
85. Shamsi Jazeyi, H., Miller, C. A., Wong, M. S., et al. (2014). Polymer-coated nanoparticles for enhanced oil recovery. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(15), 1-13.
86. Yu, J., An, C., Mo, D., et al. (2012, April). Study of adsorption and transportation behavior of nanoparticles in three different porous media. SPE-153337-MS. In *SPE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers*.
87. Shokrlu, Y. H., Babadagli, T. (2014). Viscosity reduction of heavy oil/bitumen using micro- and nano-metal particles during aqueous and non-aqueous thermal applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 119, 210-220.
88. Bera, A., Babadagli, T. (2015). Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review. *Applied Energy*, 151, 206-226.
89. Li, K., Hou, B., Wang, L., Cui, Y. (2014). Application of carbon nanocatalysts in upgrading heavy crude oil assisted with microwave heating. *Nano Letters*, 14(6), 3002-3008.
90. Aminzadeh-Goharrizi, B., DiCarlo, D. A., Chung, D. H., et al. (2012, October). Effect of nanoparticles on flow alteration during CO₂ injection. SPE-160052-MS. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
91. Villamizar, L. C., Lohateeraparp, P., Harwell, J. H., et al. (2010, April). Interfacially active SWNT/silica nanohybrid used in enhanced oil recovery. SPE-129901-MS. In *SPE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers*.
92. Espinoza, D. A., Caldelas, F. M., Johnston, K. P., et al. (2010, April). Nanoparticle-Stabilized Supercritical CO₂ Foams for Potential Mobility Control Applications. SPE-129925-MS. In *SPE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers*.
93. Aminzadeh, B., Chung, D. H., Zhang, X., et al. (2013, September). Influence of surface-treated nanoparticles on displacement patterns during CO₂ injection. SPE-0166302-MS, In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition Held. Society of Petroleum Engineers*.
94. Hughes, T. V., Chambers, C. R. (1889). Manufacture of Carbon Filaments. *US Patent* 405480
95. Radushkevich, L. V., Lukyanovich, V.M. (1952). The structure of carbon forming in thermal decomposition of carbon monoxide on an iron catalyst. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 26, 88-95.
96. Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., et al. (1985). C₆₀: Buckminsterfullerene. *Nature*, 318(6042), 162-163.
97. Gibson, J. A. E. (1992). Early nanotubes? *Nature*, 359(6394), 369-369.
98. Endo, M., Oberlin, A., Koyama, T. (1977). High Resolution electron microscopy of graphitizable carbon fiber prepared by benzene decomposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 16(9), 1519-1523.
99. Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56-58.
100. Prasek, J., Drbohlavova, J., Chomoucka, J., et al. (2011). Methods for carbon nanotubes synthesis - review. *Journal of Materials Chemistry*, 21(40), 15872-15884.
101. Rosca, I. D., Watari, F., Uo, M., Akasaka, T. (2005). Oxidation of multiwalled carbon nanotubes by nitric acid. *Carbon*, 43(15), 3124-3131.
102. Wu, H.-C., Chang, X., Liu, L., et al. (2010). Chemistry of carbon nanotubes in biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry*, 20(6), 1036-1052.
103. Novoselov, K. S., Jiang, D., Schedin, F., et al. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451-10453.
104. Torres, D., Pinilla, J. L., Moliner, R., Suelves, I. (2015). On the oxidation degree of few-layer graphene oxide sheets obtained from chemically oxidized multiwall carbon nanotubes. *Carbon*, 81, 405-417.
105. Silva, G. G., Oliveira, A. L. D., Caliman, V., et al. (2013, October). Improvement of viscosity and stability of polyacrylamide aqueous solution using carbon black as a nano-additive. OTC-24443-MS. In *OTC Brasil. Offshore Technology Conference*.
106. Rafati, R., Smith, S. R., Sharifi Haddad, A., et al. (2018). Effect of nanoparticles on the modifications of drilling fluids properties: A review of recent advances. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 161, 61-76.
107. Friedheim, J. E., Young, S., De Stefano, G., et al. (2012, June). Nanotechnology for oilfield applications - hype or reality? SPE-157032-MS. In *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
108. Ismail, A. R., Rashid, N. M., Jaafar, M. Z., et al. (2014). Effect of nanomaterial on the rheology of drilling fluids. *Journal of Applied Sciences*, 14, 1192-1197.

109. Ismail, A. R., Aftab, A., Ibupoto, Z. H., Zolkifile, N. (2016). The novel approach for the enhancement of rheological properties of water-based drilling fluids by using multi-walled carbon nanotube, nanosilica and glass beads. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139, 264-275.
110. Hassani, S. S., Amrollahi, A., Rashidi, A., et al. (2016). The effect of nanoparticles on the heat transfer properties of drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146, 183–190.
111. Kazemi-Beydokhti, A., Hajiabadi, S. H. (2018). Rheological investigation of smart polymer/carbon nanotube complex on properties of water-based drilling fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 556, 23-29.
112. Kazemi-Beydokhti, A., Hajiabadi, S. A., Sanati, A. (2017). Surface modification of carbon nanotubes as a key factor on rheological characteristics of water based drilling muds. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 37(4), 1-14.
113. Hajiabadi, S. H., Aghaei, H., Kalateh-Aghamohammadi, M., et al. (2019). A comprehensive empirical, analytical and tomographic investigation on rheology and formation damage behavior of a novel nano-modified invert emulsion drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181, 106257.
114. Shen, M., Resasco, D. E. (2009). Emulsions stabilized by carbon nanotube–silica nanohybrids. *Langmuir*, 25(18), 10843-10851.
115. Kosynkin, D. V., Cериotti, G., Wilson, K. C., et al. (2011). Graphene oxide as a high-performance fluid-loss-control additive in water-based drilling fluids. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(1), 222-227.
116. Hoelscher, K. P., De Stefano, G., Riley, M., Young, S. (2012, June). Application of nanotechnology in drilling fluids. SPE-157031-MS. In *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
117. Madkour, T. M., Fadl, S., Dardir, M. M., Mekewi, M. A. (2016). High performance nature of biodegradable polymeric nanocomposites for oil-well drilling fluids. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(2), 281-291.
118. Nasser, J., Jesil, A., Mohiuddin, T., et al. (2013). Experimental investigation of drilling fluid performance as nanoparticles. *World Journal of Nano Science and Engineering*, 3, 57-61.
119. Samsuri, A., Hamzah, A. (2011). Water based mud lifting capacity improvement by multiwall carbon nanotubes additive. *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 2(5), 99-107.
120. Vryzas, Z., Kelessidis, V. C. (2017). Nano-based drilling fluids: A review. *Energies*, 10(4), 540, 1-34.
121. Taha, N. M., Lee, S. (2015, December). Nano graphene application improving drilling fluids performance. IPTC-18539-MS. In *International Petroleum Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers.
122. Caenn, R. (2011). Composition and properties of drilling and completion fluids. *Gulf professional publishing*.
123. Farbod, M., Ahangarpour, A., Etemad, S. G. (2015). Stability and thermal conductivity of water-based carbon nanotube nanofluids. *Particuology*, 22, 59-65.
124. Angayarkanni, S. A., Philip, J. (2015). Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 225, 146-176.
125. Chai, Y. H., Yusup, S., Chok, V. S. (2015). Study on the effect of nanoparticle loadings in base fluids for improvement of drilling fluid properties. *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 4(3), 1-5.
126. Fazelabdolabadi, B., Khodadadi, A. A., Sedaghatzadeh, M. (2014). Thermal and rheological properties improvement of drilling fluids using functionalized carbon nanotubes. *Applied Nanoscience*, 5(6), 651-659.
127. Halali, M. A., Ghotbi, C., Tahmasbi, K., Ghazanfari, M. H. (2016). The role of carbon nanotubes in improving thermal stability of polymeric fluids: experimental and modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(27), 7514-7534.
128. Phuoc, T. X., Massoudi, M., Chen, R.-H. (2011). Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(1), 12-18.
129. Ma, Y., Huang, Z., Li, Q., et al. (2018). Cutter layout optimization for reduction of lateral force on PDC bit using Kriging and particle swarm optimization methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163, 359-370.
130. Lake, L., Robert, F. (2006). Petroleum engineering handbook–drilling engineering. Volume II. *Society of Petroleum Engineering Textbook series*.
131. Guo, B., Liu, G. (2011). Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. *Gulf Professional Publishing*.
132. Alomair, O. A., Matar, K. M., Alsaeed, Y. H. (2015). Experimental study of enhanced-heavy-oil recovery in berea sandstone cores by use of nanofluids applications. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 18(03), 387-399.

133. Ogolo, N. A., Olafuyi, O. A., Onyekonwu, M. O. (2013, August). Impact of Hydrocarbon on the performance of nanoparticles in control of fines migration. SPE-167503-MS. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
134. Suleimanov, B. A., Ismayilov, F. S., Veliyev, F. E. (2011). nanofluid for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78, 431-437
135. Mirzadzandeh, A. H., Yusifzadeh, H. B., Shahbazov, E. K., et al. (2011) Scientific bases of development and implementation of nanotechnologies in the oil industry. In book: *Nanoscience and nanotechnologies: Encyclopedia of life support systems. Oxford, United Kingdom: EOLSS Publishers*.
136. Ogolo, N. C., Olafuyi, O. A., Onyekonwu, M. (2012, June). Effect of nanoparticles on migrating fines in formations. SPE-155213-MS. In *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*.
137. Cheraghian, G., Khalili Nezhad, S. S., Kamari, M., et al. (2014). Adsorption polymer on reservoir rock and role of the nanoparticles, clay and SiO₂. *International Nano Letters*, 4, 1-8.
138. Kanj, M. Y., Rashid, M. H., Giannelis, E. (2011, September). Industry first field trial of reservoir nanoagents. SPE-142592-MS. In *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers*.
139. Chandran, K. (2013). Multiwall carbon nanotubes (MWNT) fluid in EOR using core flooding method under the presence of electromagnetic waves. *Malaysia: Petronas University of Technology*.
140. Alnarabiji, M. S., Yahya, N., Shafie, A., et al. (2016). The influence of hydrophobic multiwall carbon nanotubes concentration on enhanced oil recovery. *Procedia Engineering*, 148, 1137-1140.
141. Kadhum, M. J., Swatske, D. P., Chen, C., et al. (2015, April). Propagation of carbon nanotube hybrids through porous media for advancing oilfield technology. SPE-173781-MS. In *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Society of Petroleum Engineers*.
142. Ershadi, M., Alaei, M., Rashidi, A., et al. (2015). Carbonate and sandstone reservoirs wettability improvement without using surfactants for chemical enhanced oil recovery (C-EOR). *Fuel*, 153, 408-415.
143. Afzali Tabar, M., Alaei, M., Ranjineh Khojasteh, R., et al. (2017). Preference of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) to single-walled carbon nanotube (SWCNT) and activated carbon for preparing silica nanohybrid pickering emulsion for chemical enhanced oil recovery (C-EOR). *Journal of Solid State Chemistry*, 245, 164-173.
144. Wang, S., Chen, C., Kadum, M. J., et al. (2017). Enhancing foam stability in porous media by applying nanoparticles. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(5), 734-743.
145. Soleimani, H., Baig, M. K., Yahya, N., et al. (2018). Impact of carbon nanotubes based nanofluid on oil recovery efficiency using core flooding. *Results in Physics*, 9, 39-48.
146. Kim, J., Cote, L. J., Kim, F., et al. (2010). Graphene oxide sheets at interfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 132(23), 8180-8186.
147. Mejia, A. F., Diaz, A., Pullela, S., et al. (2012). Pickering emulsions stabilized by amphiphilic nano-sheets. *Soft Matter*, 8(40), 10245-10253.
148. Radnia, H., Rashidi, A., Nazar, A. R. S., et al. (2018). A novel nanofluid based on sulfonated graphene for enhanced oil recovery. *Journal of Molecular Liquids*, 271, 795-806.

Перспективы применения углеродных наноматериалов в нефтедобыче

В.М. Шамилов
SOCAR, Баку, Азербайджан

Реферат

Углеродные наноматериалы и композиции с их содержанием привлекают повышенное внимание. Высокое разнообразие структур и морфологий углерода, а также простота его функционализации, позволяют эффективно подбирать свойства материала под целевую задачу. Повсеместное внедрение углеродных наноматериалов затронуло и нефтегазовую промышленность. В представленной работе дан обзор этапов нефтегазовой промышленности и показаны основные направления использования в них нанотехнологий. Основное внимание сфокусировано на тенденциях применения углеродных наноматериалов (наноалмазов, углеродных нанотрубок и графеноподобных материалов) в добывающем секторе нефтегазовой промышленности (процессы бурения и интенсификации добычи нефти).

Ключевые слова: нанотехнологии; добыча нефти; интенсификация добычи нефти; бурение; нанодисперсии; углеродные наноматериалы; углеродные нанотрубки.

Neftçıxarmada karbon nanomaterialların tətbiqinin perspektivləri

V.M.Şamilov
SOCAR, Bakı, Azərbaycan

Xülasə

Son vaxtlar karbon nanomateriallar və onlar əsaslı kompozisiyalar böyük maraq kəsb edir. Karbonun morfolojiyası və yüksək struktur müxtəlifliyi, eyni zamanda sadə funksionallığı materialın xüsusiyyətlərinin tapşırığa uyğun effektiv seçiminə imkan yaradır. Müasir karbon nanomateriallarının geniş tətbiqi neft-qaz sənayesinə də təsir etmişdir. Təqdim olunan məqalədə neftqaz sahəsində nanotexnologiyaların tətbiqinin əsas istiqamətləri göstərilmişdir. Xüsusən, neft-qazçıxarmada və qazmada karbon nanomateriallarının (nanoalmazlar, karbon nanoboruları və qrafenə bənzər materiallar) istifadəsi tendensiyalarına diqqət yönəldilmişdir.

Açar sözlər: nanotexnologiya; neft hasilatı; neft hasilatının intensivləşdirilməsi; qazma; nanodispersiyalar; karbon nanomaterialları; karbon nanoborular.