

вающих скважин и производя их обводнение. Таким образом, полезной работы по вытеснению нефти из порового объема закачиваемая вода не производит, а лишь негативно влияет на обводненность добывающих скважин. Карбонизация воды ППД и добавление в нее ПАВ никак не влияют на результат. Единственным агентом закачки, показавшим способность производить вытеснение нефти из матрицы породы и поддерживать пластовое давление, является отбензиненный газ. Накопленная добыча нефти по варианту с закачкой отбензиненного газа на 34 % превышает добычу по базовому варианту без ППД (рис. 2).

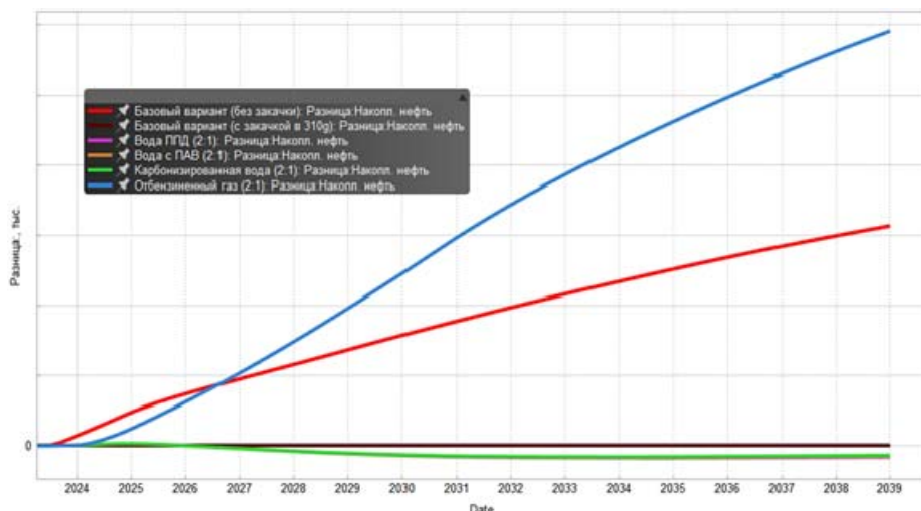


Рис. 2. Разница в накопленной добыче нефти по вариантам разработки. Результаты расчета на секторной модели I–III пачек Речицкого месторождения

Учитывая экономическую нецелесообразность закачки газа, а также принимая во внимание результаты статических и фильтрационных исследований с целью подбора химических композиций для улучшения нефтевытесняющих свойств воды в низкопроницаемых породах, рекомендуется опробовать технологию «huff-and-puff» с применением в качестве рабочего агента воды ППД. При снижении эффективности после нескольких циклов работы необходимо проведение ОПР с использованием подобранного раствора ПАВ – ОП-10 (концентрация – 0,5 %, вода затворения – минерализованная, плотностью 1,128 г/см³).

УДК 622.276(075.8)

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ДОБЫЧЕ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМОЙ НЕФТИ

Ш. М. Алхатиб, Н. А. Демяненко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Отмечено, что нанотехнологии зародились в начале 1980-х гг. прошлого столетия. В последнее время они завоевали популярность в нефтегазовом секторе. Это направление считается одним из самых перспективных в области повышения нефтеотдачи пластов из-за эффективного воздействия наножидкостей на увеличение нефтеотдачи трудноизвлекаемой нефти из пластов. Проведены исследования по вытеснению остаточной нефти наножидко-

стями из керновых моделей, которые показали, что можно получить дополнительный прирост нефтеотдачи до 20 % по сравнению с традиционным заводнением. Рассмотрены результаты исследований, выполненных в последнее время в области влияния наноконпозиций на увеличение нефтеотдачи пластов.

Ключевые слова: наночастицы, наножидкости, трудноизвлекаемые запасы нефти, повышение нефтеотдачи пластов, интенсификация добычи нефти.

APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES IN THE EXTRACTION OF HARD-TO-RECOVER OIL

Sh. M. Alkhateeb, N. A. Demyanenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Nanotechnology emerged in the early 1980s. Recently, it has gained popularity in the oil and gas sector. This area is considered one of the most attractive in the field of enhanced oil recovery due to the effective impact of nanofluids on increasing the oil recovery of hard-to-recover oil from formations. Studies on the displacement of residual oil by nanofluids from core models have shown that it is possible to obtain an additional increase in oil recovery of up to 20 % compared to traditional flooding. The paper considers the results of studies carried out recently in the field of the influence of nanocompositions on increasing oil recovery.

Keywords: nanoparticles, nanofluids, hard-to-recover oil reserves, enhanced oil recovery, intensification of oil production.

Нанотехнология определяется как создание функциональных материалов, устройств и систем путем управления материей на наноуровне (одна миллиардная доля метра) и использования ее новых свойств [1]. Наножидкости – это новый класс жидкостей-теплоносителей, основанный на нанотехнологиях, которые созданы путем стабильного диспергирования и суспендирования наночастиц размером 1–50 нм в обычных жидкостях-теплоносителях [2].

Небольшой размер наночастиц и большая площадь их поверхности дают им различные преимущества с точки зрения реологии, смачиваемости, поверхностных эффектов и вытеснения остаточной нефти. Они также часто характеризуются высокими способностями к эмульгированию и растворению и являются термодинамически стабильными соединениями. Поэтому при добавлении наночастиц в жидкость, которая будет закачиваться в пласт для вытеснения нефти, изменяются свойства вытесняющей жидкости (увеличивается ее вязкость, снижается поверхностное натяжение на границе раздела фаз, изменяется смачиваемость породы с гидрофобной на гидрофильную). Вязкость вытесняющей жидкости приближается к вязкости пластовой нефти, что предотвращает быстрое продвижение закачиваемой жидкости по наиболее проницаемым зонам и способствует выравниванию фронта вытеснения.

Снижение поверхностного натяжения на границе раздела фаз и изменение смачиваемости пород содействуют уменьшению давления закачки вытесняющих жидкостей. Увеличивается способность двигаться пленочной и капиллярной нефти, поскольку наножидкость легко проникает в пространство мелких нанопор. Хороший эффект возникает даже в условиях чрезвычайно низкой проницаемости коллекторов (0,1–1 мД), что позволяет преодолеть проблемы, с которыми сталкиваются традиционные методы повышения нефтеотдачи пластов [3, 4]. Тип, размер и концентрация наночастиц влияют на свойства приготовленных наножидкостей, эффективность и результативность вытеснения нефти, а также на конечный результат вытеснения.

В нефтегазовой промышленности для приготовления наножидкостей исследованы наночастицы оксидов металлов, металлов, углеродные нанотрубки и магнитные наночастицы [3].

Стабильная гомогенная дисперсия наночастиц или их суспензия в жидкостях-носителях (пресной, соленой, морской воде, растворах полимеров, гликолях или спиртах) имеет решающее значение для производства высококачественных наножидкостей и является одним из основных требований для успешного использования нанокомпози́тов для нефтеотдачи пластов [5, 6]. При равномерном осаждении наночастиц на поверхности пор породы изменяются ее свойства, что способствует отрыву остаточных пленок нефти и движению вала нефти к добывающим скважинам. При агрегации наночастиц образуются более крупные конгломераты, что вызывает закупорку мелких пор, приводит к увеличению давления закачки, снижению эффективности вытеснения. Дисперсионная стабильность наночастиц зависит от природы самих наночастиц, солености используемых закачиваемых жидкостей, значения pH этих жидкостей, а также магнитных свойств и электростатического отталкивания между частицами.

Наночастицы уменьшают шероховатость поверхности породы путем адсорбции на ней, образуя более обтекаемые поровые пространства, которые облегчают движение молекул нефти и уменьшают давление закачки. Этот слой является гидрофобным и предотвращает прилипание воды к поверхности породы, снижая сопротивление потоку воды и предотвращая набухание глинистых частиц в слое, не допуская тем самым закрытие пор, а также помогает снижению поверхностного натяжения между нефтью и водой, что способствует удалению остатков нефти из каналов фильтрации.

Механизм действия нанокомпози́тов на пленки нефти, покрывающие стенки каналов фильтрации, можно объяснить следующим образом: частицы агрегируются и образуют клиновидный слой в зоне трехфазного контакта капле́й нефти, наножидкостей и поверхности пор породы. Эта сборка приводит к образованию силы, которую можно сравнить с вершиной клиновидной пленки (скользящей пленки), называемой давлением структурного раздвигания, поскольку наночастицы в верхней части головки постоянно выталкиваются вперед. Капля нефти отделяется от поверхности пор породы и выбрасывается под действием капиллярной силы (рис. 1).

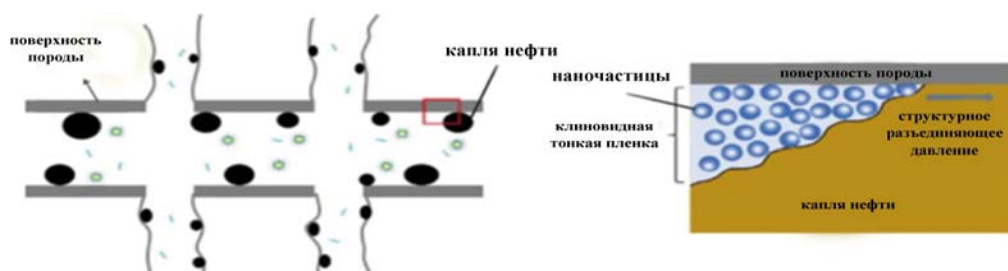


Рис. 1. Схема уменьшения поверхностного натяжения между наножидкостью, нефтью и породой

Исследования по извлечению остаточной нефти с использованием наножидкостей показали, что с увеличением концентрации наночастиц в наножидкостях вязкость нефти и содержание асфальтенов в получаемой нефти уменьшались, и их значения постепенно становились ниже значений в исходной нефти. Это связано с тем,

что наночастицы могут поглощать асфальтены в сырой нефти. Также результаты исследований показали, что оптимальная концентрация наночастиц составляет 10 частей на миллион. Увеличение концентрации введенных в наножидкость наночастиц может засорить поровое пространство из-за их агрегации и образования крупных соединений, что приведет к снижению извлечения нефти. Таким образом, при планировании мероприятий по повышению нефтеотдачи с наножидкостями необходимо подбирать оптимальную концентрацию наночастиц, чтобы они выполняли свою задачу, не влияя на петрофизические свойства нефтяного пласта.

В результате экспериментов было определено, что периодическая (циклическая) подача наносоединений вместе с другими закачиваемыми жидкостями, такими как соленая вода, приводит к сокращению потребления наносоединений и, таким образом, к снижению стоимости процесса производства и повышению эффективности вытеснения по сравнению с постоянной непрерывной закачкой наножидкостей, которая требует большого количества наносоединений.

На сегодняшний день самые последние исследования сосредоточены на совместном введении наносоединений с поверхностно-активными веществами. В ходе исследований установлено, что совместное воздействие жидкостей является более сильным и эффективным в снижении поверхностного натяжения и изменении смачиваемости породы в продуктивном пласте. А это, в свою очередь, приводит к увеличению извлечения нефти до 20 % [3]. Кроме того, сейчас разрабатываются магнитные наносоединения, которые активируются при применении магнитного поля, что повышает их подвижность и эффективность в пласте.

В настоящее время исследования в использовании нанотехнологий в области добычи нефти становятся современным направлением в повышении нефтеотдачи пластов, которое доказало свою эффективность в увеличении извлечения трудноизвлекаемой нефти. Однако при этом необходимы дальнейшая обширная исследовательская работа для производства менее дорогих и экологически чистых наносоединений и более глубокое определение типов, размеров и оптимальных концентраций соединений для целевого пласта. Также следует расширять исследования магнитных наносоединений, учитывая их будущую важную роль в добыче нефти.

Л и т е р а т у р а

1. Shidong, Li. A coreflood investigation of nanofluid enhanced oil recovery / Li Shidong, Ole Torsæter, Luky Hendraningrat // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2013. – DOI 10.1016/j.petrol.2013.07.003
2. Stephen, U. S. Choi. Nanofluids: From Vision to Reality Through Research / U. S. Choi Stephen // *American Society of Mechanical Engineers*. – 2009. – DOI 10.1115/1.3056479
3. A review of nanomaterials and their applications in oil & petroleum / D. Kabra, G. Pareek, K. Kumari, A. Roy // *Nano Express*. – 2023. – DOI 10.1088/2632-959X/acdc40
4. Pryazhnikov, M. I. Numerical study of the mechanisms of enhanced oil recovery using nanosuspensions / M. I. Pryazhnikov, V. A. Zhigarev, A. V. Minakov // *Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Research Gate*. – 2021. – DOI 10.1007/s00162-021-00569-9
5. Morteza Dejam. Comprehensive experimental study on the effect of silica nanoparticles on the oil recovery during alternating injection with low salinity water and surfactant into carbonate reservoirs / Morteza Dejam, Saheed Olawale Olayiwola // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – DOI 10.1016/j.molliq.2020.115178
6. Potential application of low-salinity polymeric-nanofluid in carbonate oil reservoirs: IFT reduction, wettability alteration, rheology and emulsification characteristics / Y. Kamal, Odisho Kolo, Abbas Khaksar, Manshad agar A. Ali // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – DOI 10.1016/j.molliq.2019.04.053