УДК 622.276

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

♦♦♦♦♦

USING NANOPARTICLES TO ENHANCE OIL RECOVERY

Бадоян Екатерина Сергеевна
студентка направления подготовки
21.03.01 «Нефтегазовое дело»,
профиль «Разработка и эксплуатация морских месторождений нефти и газа»,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
katya.badoyan@gmail.com

Шиповалова Алина Андреевна
студентка направления подготовки
21.03.01 «Нефтегазовое дело»,
профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи газа, газоконденсата и подземных хранилищ»,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
alina.shipovalova2004@mail.ru

Савенок Ольга Вадимовна
доктор технических наук,
профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Savenok_OV@pers.spmi.ru

Аннотация. В статье представлено описание основных характеристик и свойств наночастиц, с помощью применения которых можно добиться результатов в повышении нефтеотдачи. Поиск новых технологий и способов повышения объёмов извлекаемой нефти вызван тем, что современные традиционные методы увеличения нефтеотдачи позволяют извлечь лишь около трети от первоначальных извлекаемых запасов. Наночастицы способны решить данную проблему путём воздействия на породу, остаточную нефть, тяжёлую и сверхвязкую нефть. Приведены механизмы воздействия наночастиц на флюид, воду и породу, вызывающие изменение их физико-химических параметров и приводящие к более высокому коэффициенту извлечения нефти.

Ключевые слова: характеристика и свойства наночастиц; увеличение нефтеотдачи пласта; действие наночастиц на нефтеотдачу; изменение смачиваемости породы; уменьшение поверхностного натяжения на контакте нефти с водой; каталитические эффекты; технология наножидкостного заводнения.

Badoyan Ekaterina Sergeevna
Student training direction
21.03.01 «Oil and gas engineering»,
profile «Development and exploitation of offshore oil and gas fields»,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
katya.badoyan@gmail.com

Shipovalova Alina Andreevna
Student training direction
21.03.01 «Oil and gas engineering»,
profile «Operation and maintenance of gas production facilities, gas condensate and underground storage facilities»,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
alina.shipovalova2004@mail.ru

Savenok Olga Vadimovna
Doctor of technical sciences,
professor of the department of development and operation of oil and gas fieldsЮ
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
Savenok_OV@pers.spmi.ru

Annotation. The article presents a description of the main characteristics and properties of nanoparticles, the use of which can achieve results in enhancing oil recovery. The search for new technologies and methods for increasing the volume of recoverable oil is caused by the fact that modern traditional methods of enhancing oil recovery allow extracting only about a third of the initial recoverable reserves. Nanoparticles can solve this problem by influencing the rock, residual oil, heavy and super-viscous oil. The mechanisms of the impact of nanoparticles on fluid, water and rock are given, causing a change in their physicochemical parameters and leading to a higher oil recovery factor.

Keywords: characteristics and properties of nanoparticles; increased oil recovery; effect of nanoparticles on oil recovery; change in rock wettability; reduction of surface tension at the contact of oil with water; catalytic effects; nanofluid flooding technology.

В последнее время наблюдается тенденция снижения объёмов добываемых запасов нефти, что связано с истощением действующих месторождений и сложностью в поиске и разработке новых объектов. Важную роль в поддержании добычи играет повышение нефтеотдачи – комплекс действий, направленных на улучшение физических свойств нефтяного коллектора.

Нефтеотдача – ключевой параметр в нефтедобыче, который определяется как отношение объёма извлечённой из пласта нефти к начальным запасам этого пласта. Разработку месторождения можно условно разделить на 3 этапа [4].

Первый этап, при котором добыча нефти происходит за счёт пластовой энергии, которая расходуется на перемещение флюида к забою, по стволу скважины и на преодоления сил трения. Со временем пластовое давление снижается, в связи с этим пластовой энергии становится недостаточно для обеспечения прежнего уровня добычи, что влечёт за собой проведение ряда мероприятий для поддержания пластового давления.

Второй этап, при котором поддержание пластового давления осуществляется путём заводнения, нагнетания углеводородных газов или циклической закачки газа и воды. Впоследствии наблюдается увеличение обводнённости скважин, что осложняет добычу и негативно сказывается на рентабельности процесса разработки. Первичная и вторичная добыча часто оставляет значительную часть запасов нефти в пласте, что влечёт за собой использование сложных технологий, которые воздействуют на флюид и коллектор, изменяя их физико-химические свойства.

Третий этап, при котором применяются гидродинамические, физические, газовые, тепловые, микробиологические или химические методы увеличения нефтеотдачи [4]. В последнем методе могут применяться полимеры, поверхностно-активные вещества, щелочные соединения, однако данный способ имеет ряд недостатков, таких как высокая стоимость реагентов, адсорбция компонентов раствора на поверхности коллектора, проникновение мелких частиц раствора в поровое пространство, образование нежелательных химических соединений при значительной минерализации и жёсткости пластовых вод. Всё вышеперечисленное подводит к тому, что необходимо разрабатывать новые надёжные и безопасные технологии увеличения нефтеотдачи. В химическом методе могут применяться нанотехнологии, в частности, наночастицы различных материалов, использование которых с недавних пор привлекает к себе всё большее внимание, поскольку данный способ является перспективным направлением повышения извлечения нефти.

Наночастицы – частицы, размеры которых колеблются от 1 до 100 нм. Поскольку наночастицы имеют малые размеры, они обладают большой удельной поверхностью соприкосновения и способностью свободно проникать в пористую среду для осуществления ряда физико-химических процессов с целью выработки трудноизвлекаемых запасов нефти, которые остаются недоступными для традиционных методов добычи [7].

Наночастицы в составе суспензии попадают в пласт, распределяясь по поровому пространству породы-коллектора и адсорбируясь на поверхности породы. Однако благодаря броуновскому движению, наночастицы также легко десорбируются и фильтруются через поры [5]. Действие наночастиц на нефтеотдачу подразделяется на 3 основные направления: 1) изменение смачиваемости породы; 2) уменьшение поверхностного натяжения на контакте нефти с водой; 3) каталитические эффекты [7].

При движении в пласте многофазных систем наблюдается явление удержания нефти породой, называемое *остаточной нефтенасыщенностью*. Остаточная нефтенасыщенность может включать в себя плёночную нефть и капиллярно-удержанную. Закачка наночастиц в поровое пространство ведёт за собой изменение смачиваемости горной породы, а именно её гидрофилизацию. Краевой угол смачивания породы нефтью при этом значительно возрастает, нефть хуже удерживается породой, что приводит к увеличению фазовой проницаемости по нефти и снижению фазовой проницаемости по воде.

Увеличение краевого угла смачивания «нефть – порода» происходит в результате увеличения расклинивающего давления – избыточного давления, возникающего в тонкой плёнке, равного разности давления действия этой плёнки на ограничивающие её поверхности и давлением в объёме. В случае пластовых условий расклинивающее давление – избыточное давление, возникающее в плёнке между горной породой и нефтью. Из-за того, что наночастицы адсорбируются на поверхности породы, они разделяют нефть и породу, образуя плёнку между ними. При этом чем больше величина поверхностных сил между суспензией и породой, тем больше расклинивающее давление и меньше краевой угол смачивания породы суспензией [5].

По результатам исследований [9] краевой угол смачивания породы нефтью возрастает с увеличением концентрации наночастиц в растворе до определённого значе-

ния концентрации, при превышении которого изменения смачиваемости не происходит. Краевой угол смачивания от размера наночастиц зависит следующим образом: уменьшение размера наночастиц приводит к увеличению краевого угла смачивания породы нефтью, следовательно, для лучшего отмывания нефти от породы необходим минимальный размер наночастиц.

Наночастицы помимо влияния на смачиваемость, оказывают действие на межфазное натяжение между нефтью и водой, снижая его. В поровом пространстве при этом снижается капиллярное давление и ранее капиллярно-удержанная нефть становится свободной, извлекаемой. Уменьшение межфазного натяжения с увеличением концентрации наночастиц происходит до определённой граничной концентрации, выше которой не наблюдается изменения межфазного натяжения на контакте «нефть – вода». Это явление объясняется тем, что при достижении граничной концентрации вся поверхность, разделяющая две фазы, становится полностью занятой наночастицами. По результатам экспериментов [9] установлено, что межфазное натяжение тем меньше, чем больше размер наночастиц.

С учётом влияния размера вводимых в пласт наночастиц на смачивание горной породы и на межфазное натяжение «наносуспензия – нефть» можно сделать вывод о том, что для максимального увеличения нефтеотдачи существует *оптимальный* размер наночастиц. Он должен определяться отдельно для каждого структурно-геологического объекта.

Не менее важным эффектом применения наночастиц является катализ – изменение скорости реакции. Нередко извлечение нефти на поверхность усложняется высокой плотностью и вязкостью извлекаемой нефти, поэтому используют различные методы уменьшения этих параметров, в том числе закачку наночастиц, которые являются катализаторами в реакциях гидрокрекинга тяжёлых углеводородов, в результате которых разрывается связь C – C и образуются более лёгкие углеводороды. Это ведёт к уменьшению вязкости и позволяет нефти легче течь при неизменных термодинамических условиях. Также каталитический эффект наночастиц может распространяться на разрыв C – S связи, т.е. реакцию десульфуризации [3].

Наночастицы также могут применяться в качестве адсорбентов асфальтенов. Адсорбция асфальтенов на поверхности наночастиц зависит, прежде всего, от химического взаимодействия между ними. Асфальтены имеют основный характер, поэтому лучше взаимодействуют с кислотными частицами. Удерживание асфальтенов происходит за счёт сил Ван-дер-Ваальса, электростатических сил и образования донорно-акцепторных и водородных связей [1, 2].

Регулирование воздействия наночастиц на пласт происходит путём выбора концентрации наночастиц в растворе, их размера и химического состава. Неправильный выбор размера и концентрации может привести к тому, что частицы будут застревать в порах, закупоривать их, не давая флюиду течь. Хотя размер наночастиц на несколько порядков меньше, чем диаметры большинства пор, наночастицы имеют склонность к агломерации. Процесс закупоривания поровых каналов иногда используют для перенаправления потока флюида и затрагивания «мёртвых» зон пласта [8]. Необходимо также учитывать поверхностный заряд породы-коллектора при выборе pH жидкости закачки.

В настоящее время ещё не выделен наиболее эффективный метод использования данных частиц, поскольку множество других веществ, таких как поверхностно-активные вещества, полимеры, щелочи и эмульгаторы могут применяться в комплексе с закачиваемыми наночастицами для достижения более продуктивного результата, а также важную роль играет и состав самих частиц [6].

Технология применения наножидкостного заводнения весьма перспективна для увеличения нефтеотдачи вырабатываемых месторождений со значительными объёмами остаточной нефти, а также для повышения извлечения тяжёлых и битуминозных нефтей. Наночастицы в поровом пространстве коллектора действуют на смачиваемость горной породы, на межфазное натяжение между нефтью и водой, влияют на скорость протекающих реакций, могут адсорбировать на себе асфальтены. Применение данного способа увеличения нефтеотдачи требует дальнейших исследований ввиду того, что для достижения оптимального эффекта от закачки наночастиц необхо-

димо при их выборе учитывать фильтрационно-емкостные свойства пласта, тип флюида, температуру, давление и минералогический состав пород. Также особую роль играет состав самих частиц, поскольку от него зависит эффект протекающих химических реакций частиц с водой и нефтью, взаимодействие с горной породой. Добавление других активных веществ, таких как ПАВ, щелочи, полимеры и эмульгаторы, также позволяет повысить извлечение нефти.

Наночастицы обладают рядом особых свойств, что выделяет их на фоне остальных традиционных методов увеличения нефтеотдачи. Жидкости на основе наночастиц более стабильны, активны и экологичны, что делает изучение и разработку методов их закачки перспективным направлением в развитии нефтегазовой отрасли. Однако зависимость от параметров пласта, флюида и породы, а также высокая стоимость искусственно получаемых частиц приводит к тому, что их применение не так широко распространено в настоящее время и требует дальнейшего изучения.

Литература

1. Sepideh Kashefi, Lotfollahi M.N., Shahrabadi A. Адсорбция асфальтенов наночастицами с различным химическим составом поверхности: исследование равновесных и термодинамических характеристик // НЕФТЕХИМИЯ. – 2019. – Т. 59. – № 6. – Вып. 1. – С. 645–651. – DOI: 10.1134/S0028242119060121.

2. Abbas H.A., Abdallah D.M., Aissa A.S., Khaled O.S., Youcef B. Исследование адсорбции асфальтенов алжирской нефти на синтетических наночастицах маггемита // НЕФТЕХИМИЯ. – 2021. – Т. 61. – № 1. – С. 78–86. DOI: 10.31857/S002824212101007X

3. Кожанов Д.Д. Краткий обзор применения нанотехнологий в нефтегазовой отрасли // Новые направления нефтегазовой геологии и геохимии. Развитие геологоразведочных работ: сборник научных статей. – Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. – 440 с.

4. Рузин Л.М., Морозюк О.А. Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика): учебное пособие. – Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2014. – 127 с.

5. Андреева Е.С., Маринина О.А., Туровская Л.Г. Наножидкостное заводнение как метод повышения нефтеотдачи: механизм, преимущества // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. –Т. 335. – № 6. – С. 189–202. – DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4408.

6. Земцов Ю.В. Нанотехнологии МУН. Состояние и перспективы развития // Современные технологии строительства и капитального ремонта скважин. Перспективные методы увеличения нефтеотдачи пластов: сборник докладов 17-й Международной научно-практической конференции (06-11 июня 2022 года, г. Сочи). – Краснодар : ООО «Научно-производственная фирма «НИТПО». – 2022. – С. 119–123.

7. Применение наночастиц в нефтедобыче тяжелой и битуминозной нефти / Р.М. Гадельшин [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 17. – С. 60–63.

8. Ерёмин Н.А., Капшунова С.В. Физико-химические механизмы вытеснения нефти методом нанозаводнения // Экспозиция Нефть Газ. – 2024. – № 5. – С. 80–84. – DOI: 10.24412/2076-6785-2024-5-80-84.

9. Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц оксида кремния на характеристики смачиваемости нефтью горной породы / А.В. Минаков [и др.] / Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – Вып. 24. – С. 30–32. – DOI: 10.21883/PJTF.2020.24.50425.18520.

References

1. Sepideh Kashefi, Lotfollahi M.N., Shahrabadi A. Adsorption of asphaltenes by nano-particles with different surface chemistry: study of equilibrium and thermodynamic characteristics // NEFTECHEMIA. – 2019. – V. 59. – № 6. – Vyp. 1. – P. 645–651. – DOI: 10.1134/S0028242119060121.

2. Abbas H.A., Abdallah D.M., Aissa A.S., Khaled O.S., Youcef B. Study of adsorption of Algerian oil asphaltenes on synthetic maghemite nanoparticles // NEFTECHEMIA. – 2021. – V. 61. – № 1. – P. 78–86. DOI: 10.31857/S002824212101007X

3. Kozhanov D.D. Brief review of nanotechnology application in oil and gas industry // New directions of oil and gas geology and geochemistry. Development of geologic and exploration works: collection of scientific articles. – Perm : Perm State National Research University, 2017. – 440 p.

4. Ruzin L.M., Moroziuk O.A. Methods of oil recovery enhancement (theory and practice): textbook. – Ukhta : Ukhta State Technical University, 2014. – 127 p.

5. Andreeva E.S., Marinina O.A., Turovskaya L.G. Nanofluid flooding as a method of enhanced oil recovery: mechanism, advantages // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. – 2024. - V. 335. – № 6. – P. 189–202. – DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4408.

6. Zemtsov Yu.V. Nanotechnologies of MUN. State and prospects of development // Modern technologies of well construction and workover. Perspective methods of oil recovery enhancement: Collection of reports of the 17th International Scientific and Practical Conference (June 06-11, 2022, Sochi). – Krasnodar : LLC «Research and Production Firm 'NIT-PO'». – 2022. – P. 119–123.

7. Application of nanoparticles in oil production of heavy and bituminous oil / R.M. Gadelshin [et al.] // Vestnik of Technological University. – 2015. – V. 18. – № 17. – P. 60–63.

8. Eryomin N.A., Kapshunova S.V. Physico-chemical mechanisms of oil displacement by nanoflooding method // Exposition Neft Gaz. – 2024. – № 5. – P. 80-84. – DOI: 10.24412/2076-6785-2024-5-80-84.

9. Experimental study of the influence of silicon oxide nanoparticles additive on the characteristics of oil wettability of rock / A.V. Minakov [et al.] / Letters to the Journal of Technical Physics. – 2020. – V. 46. – Vyp. 24. – P. 30-32. – DOI: 10.21883/PJTF.2020.24.50425.18520.