



УДК 622.276

## МЕХАНИЗМ И ПРЕИМУЩЕСТВА ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТА МЕТОДОМ НАНОЗАВОДНЕНИЯ

### MECHANISM AND ADVANTAGES OF ENHANCED OIL RECOVERY BY NANOFLOODING

**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.** Нанозаводнение является инновационной технологией повышения нефтеотдачи. Наночастицы улучшают свойства закачиваемой жидкости и способствуют вытеснению трудноизвлекаемой нефти благодаря своим уникальным свойствам. В статье представлен обзор на основные механизмы воздействия наночастиц на границу раздела фаз «нефть – вода» и поверхность горной породы при нанозаводнении. Описаны способы получения наночастиц.

**Ключевые слова:** нанозаводнение как метод повышения нефтеотдачи пласта; извлечение высоковязких нефтей; повышение эффективности вытеснения нефти; коэффициент подвижности; закачка растворов поверхностно-активных веществ; закачка в пласт различных видов нанофлюидов; способы получения наночастиц металлов.

**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 Fields,  
Empress Catherine II  
Saint Petersburg Mining University  
Savenok\_OV@pers.spmi.ru

**Annotation.** Nanoflooding is an innovative technology for enhancing oil recovery. Nanoparticles improve the properties of the injected fluid and facilitate the displacement of hard-to-recover oil due to their unique properties. The article provides an overview of the main mechanisms of the impact of nanoparticles on the oil-water interface and the rock surface during nanoflooding. Methods for obtaining nanoparticles are described.

**Keywords:** nanoflooding as a method for enhancing oil recovery; extraction of high-viscosity oils; increasing the efficiency of oil displacement; mobility coefficient; injection of surfactant solutions; injection of various types of nanofluids into the formation; methods for producing metal nanoparticles.

**Н**ефтегазовая отрасль является одной из наиболее значимых отраслей в промышленности Российской Федерации, оказывающей влияние на экономику страны. Необходимо обеспечить её стабильное развитие путём поддержания уровня добычи. В России в настоящее время большинство месторождений находится на завершающей стадии разработки, их запасы истощаются и применение одной системы поддержания пластового давления заводнением становится неэффективным, поэтому на сегодняшний день происходит активное развитие третичных методов разработки – методов увеличения нефтеотдачи (МУН / EOR). Существует большое количество методов воздействия на пласт, однако многие оказываются нерентабельными для внедрения на нефтяных месторождениях, а некоторые недостаточно эффективны на практике. Поиск новых решений увеличения нефтеотдачи остаётся актуальной задачей, а существующие технологии должны подвергаться детальному изучению с целью их оптимизации и рационализации. На 2025 год 52 % от общего объёма



ма нефти в России приходится на трудноизвлекаемые запасы, что подтверждает необходимость разработки технологии повышения эффективности извлечения высоковязких нефтей.

С 1940-х годов основной технологией воздействия на пласт для извлечения нефти является заводнение. Когда фазовая проницаемость для воды больше, чем для нефти, вода прорывается к скважине, а нефть остаётся в порах коллектора. Тогда обводнённость продукции быстро растёт, и разработка становится нерациональной. Если пласт неоднородный, то фильтрация может охватывать только хорошо проницаемую часть пласта, а нефть, находящаяся в плохо проницаемом участке, остаётся неподвижной. Такие непромытые участки называются целиками нефти. Чтобы предотвратить преждевременную обводнённость продукции, необходимо выравнять фронт вытеснения нефти водой. Устойчивость фронта вытеснения связана с коэффициентом подвижности, характеризующим отношением подвижностей воды и нефти:

$$M = \frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{н}}} \cdot \frac{\mu_{\text{н}}}{\mu_{\text{в}}}$$

где  $M$  – коэффициент подвижности;  $k_{\text{в}}$  и  $k_{\text{н}}$  – фазовые проницаемости для воды и нефти соответственно, м<sup>2</sup>;  $\mu_{\text{в}}$  и  $\mu_{\text{н}}$  – динамические вязкости воды и нефти соответственно, Па · с.

Когда подвижность воды больше, чем нефти, на фронте вытеснения образуются языки заводнения, вода распространяется по пласту в направлении добывающих скважин быстрее нефти. Следовательно, коэффициент подвижности следует уменьшать. Когда коэффициент подвижности равен единице или меньше, наблюдается устойчивое состояние фронта.

Одним из способов снижения подвижности воды является добавление в неё полимера, повышающего вязкость вытесняющего флюида. Данная технология называется полимерным заводнением. Её применяют при высоких значениях коэффициента подвижности или в неоднородных пластах, в остальных случаях полимерное заводнение нерентабельно, т.к. применение полимерного заводнения – дорогостоящее мероприятие. Также применение данного МУН ограничивается возможной деструкцией полимера при взаимодействии с солями пластовых вод и при действии высоких температур.

С целью уменьшения остаточной нефтенасыщенности производят закачку растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые уменьшают межфазное натяжение на границе «нефть – вода» и изменяют смачиваемость поверхности горной породы, в результате возрастает фазовая проницаемость по нефти. Данный метод хорошо себя зарекомендовал на практике, позволяя увеличить коэффициент извлечения нефти до 0,5 доли ед. Но у растворов ПАВ есть ряд недостатков, таких как адсорбция на горной породе, негативное влияние на окружающую среду вследствие токсичности ПАВ, химическое взаимодействие с пластовыми водами, нестабильность при высоких температурах и большая стоимость реагентов.

Помимо традиционного химического заводнения существуют инновационные технологии для увеличения нефтеотдачи. К ним относится нанозаводнение, предполагающее закачку в пласт различных видов нанофлюидов. Нанозаводнение имеет ряд преимуществ, которые будут рассмотрены далее.

Наночастицы обладают много меньшими размерами по сравнению с размерами порового пространства и большой удельной поверхностью соприкосновения, что обуславливает их высокую проникающую способность в поровые каналы и протекание различных физико-химических процессов, благодаря которым становится возможной добыча трудноизвлекаемых запасов без закупоривания и загрязнения каналов фильтрации.

Анализируя результаты исследования реологии наножидкостей, выявлено, что добавление наночастиц в жидкость увеличивает её вязкость, а характер её движения изменяется на псевдопластический, что улучшает свойства нанофлюида как вытесняющего агента.

Благодаря свойствам наночастиц изменяется смачиваемость нефтеносных пластов водой – это способствует лучшему отмыванию горных пород от нефти. Смачиваемость же в свою очередь влияет на такие важные явления, как межфазное натяжение, капиллярное давление и капиллярная пропитка, от которых зависит степень и скорость выработки запасов нефти. Наночастицы позволяют ослабить воздействие данных явлений и улучшить фильтрацию флюида в каналах. Исследования показывают, что нефтьвытесняющие свойства нанофлюида после прокачки через модель пласта ухудшаются, что свидетельствует об адсорбции наночастиц на породе, а измерение поверхностного натяжения показывает, что смачиваемость породы изменилась.

При применении наночастиц в процессах заводнения нужно учитывать размеры используемых частиц, поскольку некоторые металлические наночастицы могут закупоривать каналы, если их диа-



метры меньше размеров частиц. Также при больших концентрациях может произойти нежелательное закупоривание каналов в связи с агрегацией частиц. Однако можно отметить, что в некоторых случаях закупорка каналов может иметь и положительные последствия – застревание и накопление наночастиц в одном поровом канале приводит к росту давления в соседнем фильтрационном канале, которое способствует вытеснению из него нефти, после чего давление падает и вода вытесняет частицы, очищая канал.

Во время вытеснения нефти на границе «нефть – вода» образуется эмульсия. Наночастицы способствуют стабилизации эмульсии. Наноэмульсии представляют собой эмульсии Пикеринга, которые способны выдерживать высокие пластовые температуры, обладают высокой кинетической стабильностью, что означает, что они менее склонны к расслоению или коалесценции капель.

Применение наночастиц в гетерогенном катализе для увеличения нефтеотдачи при разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами обеспечивает протекание физико-химических реакций в пластовых условиях, в результате которых выделяется теплота, температура растёт, тем самым оказывается тепловое воздействие на нефть и понижается её вязкость. Если сравнивать методы закачки нанокатализаторов и термогравитационное дренирование пласта (steam-assisted gravity drainage – SAGD), то второй способ более затратный, так как требует применение дорогостоящих водяного пара и водорода, постоянного поддержания высоких температур и давлений в пласте. С использованием наночастиц затраты на поддержание температуры снижаются, поскольку данный процесс осуществляется за счёт экзотермических реакций взаимодействия наночастиц и тяжёлых компонентов нефти – смол и асфальтенов.

Также одной из особенностей наночастиц является их экологичность, поскольку чаще всего в качестве добавляемых агентов выступают частицы диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , который является основным компонентом песчаника, что также снижает его стоимость по сравнению с другими применяемыми химическими веществами.

Проводилось большое количество экспериментов по исследованию влияния нанофлюидов на нефтеотдачу. В основном для этой цели используют нанофлюиды на основе  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и др.

Существуют следующие способы получения наночастиц металлов:

- получение наночастиц путём измельчения более крупных с помощью распыления, помола или лазерной абляции;
- получение наночастиц с помощью микроорганизмов;
- формирование наночастиц, которые содержат металлы в восстановленной или ионизированной форме, с помощью полимеров;
- получение наночастиц металлов и их оксидов с помощью специальных восстанавливающих агентов.

Последние два способа относятся к химическому методу синтеза частиц и не требуют специального оборудования. Данные методы являются наиболее распространёнными, поскольку они более просты и легко осуществимы по сравнению с другими способами, имеют низкую стоимость, обеспечивают высокий выход наночастиц и являются экологически безопасными. При синтезе частиц данными методами возможно получение частиц определённого размера и формы.

Основу химического метода составляют реакции молекул с последующим нарастанием до размеров наноструктур. Наибольшее практическое применение среди химических методов синтеза получил метод микроэмульсий, суть которого состоит в смешивании двух эмульсий: эмульсию вода / нефть, предварительно стабилизированную эмульгаторами (зачастую ПАВ) смешивают с эмульсией, содержащей соли необходимых металлов и различные реагенты, инициирующие последующее зародышеобразование и рост частиц после смешивания и обмена реагентами (соль металла и восстановители) за счёт столкновения капель жидкостей друг с другом.

Таким образом, в статье проведён обзор метода интенсификации нефтедобычи путём наноэмульсионного вытеснения. Повышение эффективности вытеснения нефти из пористой среды пласта при применении данной технологии обусловлено большой проникающей способностью наночастиц и высокой поверхностной активностью ввиду их малых размеров. Наночастицы воздействуют на межфазное натяжение, адсорбируясь на границе «нефть – вода», на смачиваемость породы, уменьшают вязкость нефти термическим воздействием, стабилизируют эмульсию типа «вода в нефти», способствуя выносу нефти из пор, уменьшают коэффициент подвижности, стабилизируя фронт вытеснения и тем самым создавая благоприятные условия для равномерного вытеснения нефти. Также рассмотрены основные способы получения наночастиц, включающие механическое измельчение, лазерную абляцию, биологический синтез и химические методы. Выбор метода получения зависит от требуемых свойств наночастиц (размер, форма, состав, чистота), масштаба производства и стоимости.

**Список литературы:**

1. Алиева Н.М. Катализаторы на основе наноматериалов: синтез и области применения // Вестник Башкирского университета. – 2023. – Т. 28. – № 2. – С. 158–165.
2. Андреева Е.С. Наножидкостное заводнение как метод повышения нефтеотдачи: механизм, преимущества / Е.С. Андреева, О.А. Маринина, Л.Г. Туровская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 189–202.
3. Бадоян Е.С. Использование наночастиц для увеличения нефтеотдачи / Е.С. Бадоян, А.А. Шиповалова, О.В. Савенок // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2024. – № 4. – С. 107–111.
4. Гилаев Г.Г. Применение нанотехнологий для повышения нефтеотдачи пластов: наножидкости / Г.Г. Гилаев, М. Амер, М.С. Аль-Идриси // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2023. – № 11 (371). – С. 42–49.
5. Гилаев Г.Г. Применение нанотехнологий для повышения нефтеотдачи пластов: наноэмульсии / Г.Г. Гилаев, М. Амер, М.С. Аль-Идриси, В.С. Гнеуш, Г.Г. Гилаев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2024. – № 2 (374). – С. 56–62.
6. Дадабаева А.А. Увеличение нефтеотдачи с помощью наночастиц на основе кремния // Нефтепромысловая химия: Материалы VIII Международной (XVI Всероссийской) научно-практической конференции (24 июня 2021 года, г. Москва). – М. : Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2021. – С. 60–63.
7. Дмитриевский А.Н. Инновационный потенциал умных нефтегазовых технологий / А.Н. Дмитриевский, Н.А. Ерёмин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 1. – С. 4–9.
8. Заводнение нефтяных месторождений и оценка природных вод как одного из основных сырьевых источников технологии заводнения / Л.К. Кузнецов [и др.] // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. – № 4. – С. 143–145.
9. Лялина Т.С. Получение наночастиц металлов с использованием восстанавливающих агентов и хитозана / Т.С. Лялина, А.П. Луньков, В.П. Варламов // Прикладная биохимия и микробиология. – 2022. – Т. 58. – № 2. – С. 108–116.
10. Подопригора Д.Г. Опыт применения и перспективы внедрения технологии полимерного заводнения в неоднородных коллекторах / Д.Г. Подопригора, Р.Р. Бязров, Е.А. Христоч // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 6.
11. Раупов И.Р. Повышение нефтеотдачи пласта на месторождениях высоковязкой и сверхвязкой нефти. Современное состояние технологий / И.Р. Раупов, Ю.А. Сытник // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 7(127). – С. 14–22.
12. Рогачёв М.К. Регулирование фильтрационных характеристик нефтяных коллекторов с использованием поверхностно-активных веществ / М.К. Рогачёв, А.Н. Кузнецова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 10-4(41). – С. 98–99.
13. Оценка влияния коллоидных систем с наночастицами на смачиваемость поверхности карбонатных горных пород / В.В. Сергеев [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 166–173.
14. Сулейманов Б.А. Механизм повышения нефтеотдачи пласта нанофлюидами / Б.А. Сулейманов, Х.Ф. Аббасов // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2022. – № 3. – С. 28–37.
15. Шамилов В.М. Перспективы применения углеродных наноматериалов в нефтедобыче // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2020. – № 3. – С. 90–107.

**List of references:**

1. Aliyeva N.M. Catalysts based on nanomaterials: synthesis and applications // Bulletin of the Bashkir University. – 2023. – Vol. 28. – № 2. – P. 158–165.
2. Andreeva E.S. Nanofluid flooding as a method of enhancing oil recovery: mechanism, advantages / E.S. Andreeva, O.A. Marinina, L.G. Turovskaya // News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources. – 2024. – Vol. 335. – № 6. – P. 189–202.
3. Badoyan E.S. Using nanoparticles to enhance oil recovery / E.S. Badoyan, A.A. Shipovalova, O.V. Savenok // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2024. – № 4. – P. 107–111.
4. Gilaev G.G. Application of nanotechnologies to increase oil recovery of formations: nanofluids / G.G. Gilaev, M. Amer, M.S. Al-Idrisi // Construction of oil and gas wells on land and at sea. – 2023. – № 11 (371). – P. 42–49.
5. Application of nanotechnologies to increase oil recovery: nanoemulsions / G.G. Gilaev [et al.] // Construction of oil and gas wells on land and at sea. – 2024. – № 2(374). – P. 56–62.



6. Dadabaeva A.A. Enhanced oil recovery using silicon-based nanoparticles // Oilfield Chemistry: Proceedings of the VIII International (XVI All-Russian) scientific and practical conference (June 24, 2021, Moscow). – M. : Gubkin Russian state university of oil and gas (National research university), 2021. – P. 60–63.
7. Dmitrievsky A.N. The innovative potential of the smart oil and gas technologies / A.N. Dmitrievsky, N.A. Eremin // Geology, geophysics and development of oil and gas fields. – 2016. – № 1. – P. 4–9.
8. Flooding oil deposits and an estimation of natural waters as one of the basic raw sources of flooding technology / L.K. Kuznetsov [et al.] // Bashkir Chemical Journal. – 2010. – Vol. 17. – № 4. – P. 143–145.
9. Lyalina T.S. Obtaining of metal nanoparticles using reducing agents and chitosan / T.S. Lyalina, A.P. Lunkov, V.P. Varlamov // Biochemistry and Microbiology. – 2022. – Vol. 58. – № 2. – P. 108–116.
10. Podoprigora D.G. Experience of application and prospects of introduction of polymer flooding technology in heterogeneous reservoirs / D.G. Podoprigora, R.R. Byazrov, E.A. Khristich // Bulletin of Eurasian Science. – 2022. – Vol. 14. – № 6.
11. Raupov I.R. Enhanced oil recovery at high-viscosity and extra-viscous oil fields. Current state of technology / I.R. Raupov, Ju.A. Sytnik // Business magazine Neftegaz.RU. – 2022. – № 7(127). – P. 14–22.
12. Rogachev M.K. Regulation of filtration characteristics of oil reservoir with surface active agents / M.K. Rogachev, A.N. Kuznetsova // International Research Journal. – 2015. – № 10-4(41). – P. 98–99.
13. Assessment of the colloidal system with nanoparticles influence on wettability of carbonate rock surface / V.V. Sergeev [et al.] // Nanotechnologies in construction: scientific online journal. – 2020. – Vol. 12. – № 3. – P. 166–173.
14. Suleimanov B.A. Enhanced oil recovery mechanism with nanofluid injection / B.A. Suleimanov, H.F. Abbasov // SOCAR Proceedings. – 2022. – № 3. – P. 28–37.
15. Shamilov V.M. Potential applications of carbon nanomaterials in oil recovery // SOCAR Proceedings. – 2020. – № 3. – P. 90–107.