

01;03

Вытеснение нефти из пористой среды с использованием графитовой суспензии

© Ю.В. Пахаруков^{1,2}, Ф.К. Шабиев^{1,2,¶}, Р.Ф. Сафаргалиев²¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия² Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

¶ E-mail: faridshab@mail.ru:

Поступило в Редакцию 3 июля 2017 г.

Обнаружено, что водная графитовая суспензия из планарных наноструктур на границе раздела нефть–вода обладает вытесняющей способностью. В эксперименте с использованием ячейки Хеле–Шоу показано, что в процессе вытеснения на границе раздела не образуются вязкие пальцы, являющиеся результатом неустойчивости на границе раздела нефть–вода.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.04.45632.16943

В настоящее время бóльшая часть нефтяных месторождений переходит на заключительную стадию разработки [1]. В связи с этим задача полноты вытеснения нефти из пласта решается с применением физико-химических методов воздействия на пласт совместно с его заводнением [2]. Существует ряд представлений о механизмах действия внутри пластовых оторочек на основе водных растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ), полимеров, щелочно-кислотной обработки и т.д. [3]. Принято считать, что наиболее эффективным является микэмульсионное заводнение. Но для этого заводняющий агент должен обладать необходимой подвижностью и ультранизким поверхностным натяжением на границе с нефтью. В этом случае граница раздела нефть–вода будет устойчивой и не будут образовываться вязкие пальцы прорыва воды через слой нефти.

Однако микроэмульсии представляют собой сложную динамическую структуру и очень чувствительны к катионам высокой валентности, содержащимся в пласте. С повышением температуры и давления смещается фазовое равновесие и увеличивается влияние стенок капилляров, а движение в пористом коллекторе с фрактальной геометрией приводит к стохастическому воздействию на микроэмульсию. В результате устойчивое в лабораторных условиях микроэмульсионное состояние становится неустойчивым в условиях реального пласта [2]. В связи с этим возникает вопрос: можно ли создать на границе раздела нефть–вода переходную область с низким поверхностным натяжением, не являющуюся микроэмульсией, обладающей слабой чувствительностью к температуре и жесткостью пластовых вод?

Задачей настоящей работы является исследование вытесняющей способности воды при добавлении графитовых наночастиц на границу раздела нефть–вода.

Известно, что низкое поверхностное натяжение на границе раздела нефть–вода связывается с образованием структуры из жидкокристаллических монослоев макромолекул [2]. Такие слои могут быть образованы из планарных наночастиц графита с размером менее 400 nm. При этом стабильность суспензии будет обеспечиваться условием [4]

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S \leq 0,$$

где ΔS — изменение энтропии, ΔH_{mix} — изменение энтальпии смеси, ΔG_{mix} — изменение энергии Гиббса смеси.

Следовательно, растворитель должен иметь удельную поверхностную энергию (σ), близкую к энергии монослоя из графитовых частиц. Таким свойством обладает водный раствор этанола [5]. Изменением концентрации этанола можно подобрать σ , близкую к плоским частицам графита.

В реальных условиях очень часто наблюдается напластывание жидкостей (движение нефти в воде). В этом случае решение задачи движения возможного контакта зависит от коэффициента пропорциональности мощности пласта и угла наклона пласта.

На форму водонефтяного контакта влияет соотношение коэффициента вязкости нефти и воды. Образование переходных областей приводит к уменьшению скорости движения по подошве пласта и увеличению скорости по кровле пласта. Разная скорость внутреннего и

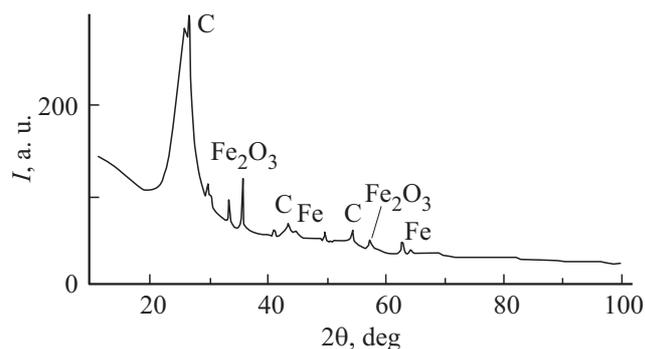


Рис. 1. Рентгенограмма углеродного материала, содержащего графитовые планарные структуры, полученного в результате взаимодействия пористого углерода, нагретого до 1000°С, с дистиллированной водой.

внешнего контуров зависит от проницаемости породы. Даже в простых схемах вытеснения наблюдается искажение формы водонефтяного контура с образованием языков обводнения. Коэффициентом устойчивости служит величина коэффициента подвижности

$$\lambda = \frac{k_{wo}\mu_{oil}}{k_{ow}\mu_B},$$

где k_{wo} — проницаемость по воде в присутствии остаточной нефти, k_{ow} — проницаемость по нефти в присутствии связанной воды, μ_{oil} — вязкость нефти, μ_B — вязкость раствора.

Фронт устойчив для $\lambda < 1$, т.е. величина μ_B не должна сильно увеличиваться. Следовательно, суспензия из графитовых (планарных) частиц должна обладать малым поверхностным натяжением σ на границе раздела нефть–вода, а вязкость раствора μ_B и его плотность ρ должны удовлетворять эмпирическому условию

$$0.1 \geq \frac{\mu_B}{\sqrt{\sigma\rho d}},$$

где d — средний размер пор в пористой структуре (или диаметр капилляра),

$$k_{ow}\mu_B < k_{wo}\mu_{oil}.$$

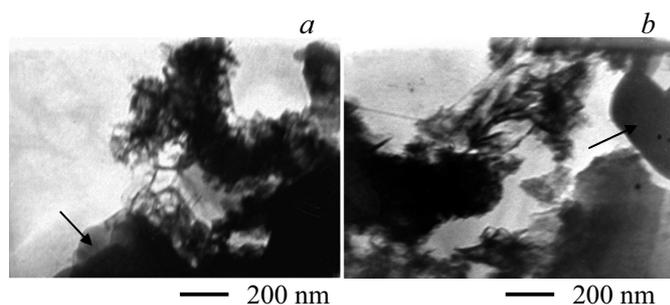


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения углеродного материала, полученного в результате охлаждения в дистиллированной воде поликристаллического графита, нагретого до 1000°C . Стрелкой указана область, содержащая совершенные кристаллы графита — планарные наночастицы: *a* — толщина кристаллита много меньше его диаметра, *b* — толщина кристаллита соразмерна его диаметру.

Образцы графитовых планарных наноструктур были синтезированы по методике, предложенной в работе [6]. Порошкообразный поликристаллический графит нагревался в печи Таммана до 1000°C , затем образцы извлекались из печи и опускались в сосуд с дистиллированной водой комнатной температуры ($\sim 20^{\circ}\text{C}$). В результате взаимодействия нагретого поликристаллического графита с холодной водой часть графита выпадала в осадок, другая его часть оставалась на поверхности воды, образуя тонкую пленку, которая затем извлекалась. Далее извлеченную пленку растворяли в 70% растворе этанола, получая эмульсию.

При анализе рентгенограммы углеродного материала, полученной на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение), были идентифицированы дифракционные максимумы, соответствующие графиту, турбостратному углероду, чистому железу и трем модификациям оксида железа (Fe_2O_3 (10R), Fe_2O_3 (100M), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (рис. 1).

Электронно-микроскопические исследования графитового материала, выполненные на просвечивающем электронном микроскопе УЭМВ-100К по стандартным методикам, показали наличие идеальных кристаллов графита различной толщины (рис. 2).

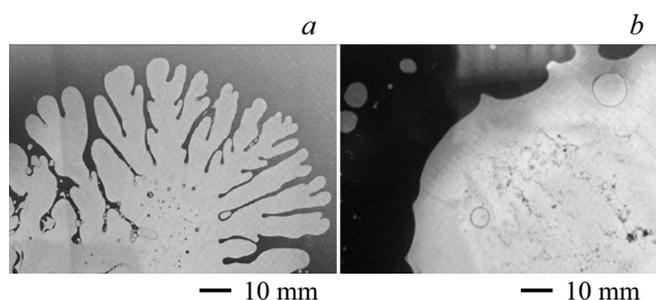


Рис. 3. Вытеснение водой нефти в ячейке Хеле–Шоу: *a* — с образованием вязких пальцев, *b* — без образования вязких пальцев с устойчивой границей раздела вода–графит–нефть.

Для исследования поведения границы раздела вода–нефть в работе была использована радиальная ячейка Хеле–Шоу, геометрические параметры которой составляли $R_0 = 2 \text{ mm}$, $R_\infty = 120 \text{ mm}$, $b = 0.6 \text{ mm}$ [7,8].

В результате синтеза планарных углеродных наночастиц сформировалась суспензия с размером частиц 200–400 nm с низким поверхностным натяжением $\sigma = 43 \text{ mN/m}$.

Добавление суспензии в нефтяную фазу уменьшило исходную вязкость на 0.7%, что усилило условие устойчивости фронта (коэффициент подвижности $\lambda < 1$).

При нагнетании воды без планарных частиц графитовой суспензии в ячейку Хеле–Шоу (с постоянным давлением $p = 10 \text{ kPa}$) образовывались вязкие пальцы вследствие неустойчивости границы раздела, свидетельствующие о прорыве воды сквозь нефть (рис. 3, *a*). При добавлении в воду графитовых наночастиц вытеснение идет устойчивым фронтом без образования вязких пальцев при том же режиме с постоянным давлением $p = 10 \text{ kPa}$. На рис. 3, *b* отчетливо видна граница раздела нефть–суспензия–вода.

Итак, суспензия формирует устойчивую границу раздела нефть–вода даже без добавления ПАВ.

Для усиления эффекта устойчивости в дальнейшем можно, комбинируя ПАВ и этанол в суспензии из графитовых планарных наночастиц, значительно снизить поверхностное натяжение.

Таким образом, результаты исследования указывают на перспективность разработки технологии по вытеснению остаточной нефти из нефтегазового пласта с использованием суспензии на основе графита.

Список литературы

- [1] Химические методы в процессах добычи нефти / Отв. ред. Н.М. Эмануэль, Г.Е. Заиков. М.: Наука, 1987. 238 с.
- [2] Микроэмульсии. Структура и динамика / Под ред. С.Е. Фриберга, П. Богореля. М.: Мир, 1990. 320 с.
- [3] *Хавкин А.Я.* Гидродинамические основы разработки залежей нефти с низкопроницаемыми коллекторами. М: МО МАНПО, 2000. 525 с.
- [4] *Антонова И.В.* // УФН. 2017. Т. 187. № 2. С. 220–234.
- [5] *Соотс Р.А., Якимчук Е.А., Небогатикова Н.А., Котин И.А., Антонова И.В.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 8. С. 102–110.
- [6] *Belenkov E.A., Shabiev F.K.* // Письма о материалах. 2015. Т. 5. № 4. С. 459–462.
- [7] *Мартюшев Л.М., Бирзина А.И.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. В. 8. С. 516–522.
- [8] *Мартюшев Л.М., Бирзина А.И.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 5. С. 71–78.