

УДК 532.546

ФИЛЬТРАЦИЯ НЕФТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ НАЛИЧИИ НАНОЧАСТИЦ ГРАФЕНА

Ю. В. Пахаруков^{*,**}, Ф. К. Шабиев^{*,**}, Б. В. Григорьев^{**},
Р. Ф. Сафаргалиев^{**}, И. Р. Поточняк^{**}

* Тюменский индустриальный университет, 625000 Тюмень, Россия

** Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия

E-mails: pacharukovyu@yandex.ru, faridshab@mail.ru, b.v.grigorev@utmn.ru,
ruslan.safargaliyev@mail.ru, i.r.potochnyak@utmn.ru

Проведено экспериментальное исследование процесса фильтрации графеновой суспензии через образец керна. Обнаружено, что на межфазной границе нефть — вода в пористой среде образца керна формируется переходная многослойная микрогетерофазная структура, состоящая из планарных наночастиц графена, углеводородных молекул, входящих в состав нефти, и поверхностно-активных веществ. Установлено, что с увеличением концентрации наночастиц графена объемная доля вытесненной нефти увеличивается, объемная доля воды в нефти уменьшается.

Ключевые слова: фильтрация нефти, графеновая суспензия, микрогетерофазная структура.

DOI: 10.15372/PMTF20190105

В настоящее время проблема разработки трудноизвлекаемых запасов нефти приобретает большое значение, поскольку их объем является значительным. При этом актуальной задачей является создание эффективных технологий увеличения объемов нефтедобычи. В работе [1] проведено исследование вытесняющей способности воды в ячейке Хеле-Шоу при добавлении в нее наночастиц графена. Показано, что планарные наночастицы графена активно участвуют в формировании устойчивой межфазной границы нефть — вода. Однако в реальном нефтяном пласте непосредственный контакт нефти и воды отсутствует. Для изучения механизма вытеснения нефти в реальном пласте необходимо провести экспериментальные исследования фильтрации водного раствора графена через образец керна, насыщенного нефтью. Целью данной работы является изучение механизма вытеснения нефти графеновой суспензией из образца керна.

Вытеснение нефти графеновой суспензией из образца керна осуществлялось на установке ПИК-ОФМ/ЭП-3, предназначенной для исследования фильтрационно-емкостных и электрических свойств керна, с использованием методики, рекомендуемой ОСТ 39-235-89 [2]. Изучались образцы карбонатных кернов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, имеющие пористость 13 % и насыщенные промысловой нефтью с вязкостью $\eta = 4,08$ мПа·с и плотностью $\rho = 838$ кг/м³.

В эксперименте использовались три образца керна диаметром $d = 30$ мм и высотой $h = 30$ мм с проницаемостью $K = 53,4; 35,3; 28,0$ м·Д и объемом пор $V_{por} = 3,170; 3,381;$

3,976 см³. Каждый эксперимент включал два этапа. На первом этапе проводилось насыщение образца путем прокачки через керны объема нефти, равного четырем полным объемам пор, на втором — вытеснение нефти водным раствором NaCl или водным раствором NaCl с наночастицами графена путем прокачки через образцы объема раствора, равного четырем полным объемам пор (40 мл).

В первом эксперименте водный раствор имитировал пластовую воду. В качестве пластовой воды использовался раствор NaCl в дистиллированной воде с концентрацией 20 г/л. В последующих экспериментах в модель пластовой воды добавлялась графеновая суспензия, объемная доля которой составляла 5, 10, 15 %. Концентрация частиц графена равна 0,04 г/л. Графеновая суспензия синтезировалась ультразвуковым диспергатором [3].

На начальном этапе (до выхода на рабочий режим) скорость насыщения составляла 1 мл/мин, рабочая скорость насыщения равна 0,1 мл/мин. Вытеснение осуществлялось с рабочей скоростью 0,1 мл/мин. Рабочая температура равна 40 °С, рабочее давление — 3 МПа, давление обжима — 10 МПа.

После вытеснения проводилась экстракция образцов керна, а затем сушка, насыщение солевым раствором и центрифугирование с регистрацией массы керна после каждой операции.

Для оценки эффективности вытеснения нефти определялась объемная доля вытесненной нефти δ :

$$\delta = \frac{V_{oil10}}{V_0}$$

(V_{oil10} — объем вытесненной нефти после 10-дневного отстаивания; V_0 — объем вытесненной жидкости).

Для оценки обводненности вытесненной нефти определялась доля воды в объеме вытесненной нефти:

$$\varepsilon = \frac{V_{oil0} - V_{oil10}}{V_{oil10}}$$

(V_{oil0} — объем нефти непосредственно после фильтрации).

Характеристики процесса вытеснения нефти из насыщенного образца моделью пластовой воды и графеновой суспензией приведены в таблице.

На рис. 1 представлена зависимость объемной доли вытесненной нефти δ от концентрации C наночастиц графена в пластовой воде. Увеличение доли вытесненной нефти δ свидетельствует об уменьшении энергии отрыва нефти от поверхности капилляра в пористой среде. Кроме того, увеличение δ может быть обусловлено уменьшением поверхностного натяжения и краевого угла смачивания, что подтверждает слабая зависимость объемной доли вытесненной нефти от концентрации наночастиц при ее малых значениях.

На рис. 2 приведена зависимость объемной доли воды в объеме вытесненной нефти ε от концентрации наночастиц графена. Уменьшение величины ε свидетельствует об устой-

Характеристики процесса вытеснения нефти из образцов карбонатных кернов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции

Модель пластовой воды	C , г/л	V_0 , мл	V_{oil0} , мл	V_{oil10} , мл	$V_{oil0} - V_{oil10}$, мл
Раствор NaCl	0	42	7,5	6,0	1,5
Раствор NaCl и графеновая суспензия	0,002	39	6,5	6,2	0,3
	0,004	39	6,7	6,3	0,4
	0,006	40	8,4	7,6	0,8

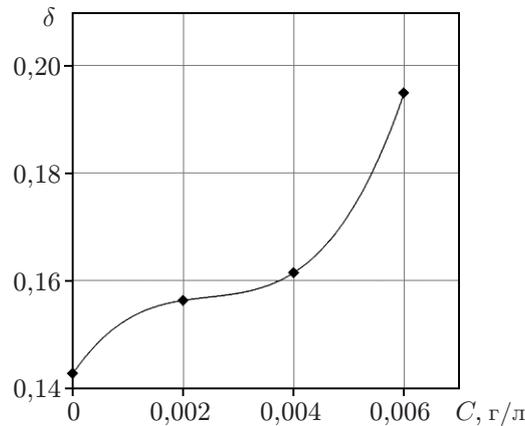


Рис. 1. Зависимость объемной доли вытесненной нефти δ от концентрации C наночастиц графена в пластовой воде

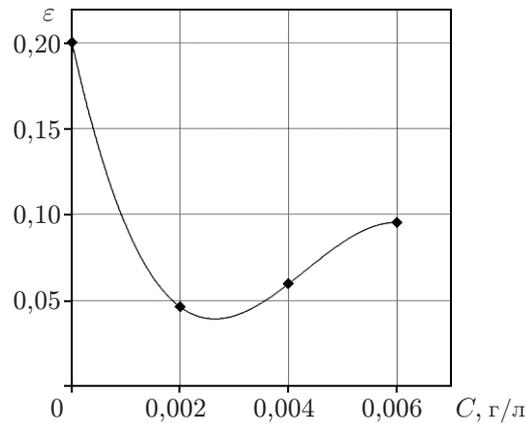


Рис. 2. Зависимость объемной доли воды в объеме вытесненной нефти ε от концентрации C наночастиц графена в пластовой воде

чивости межфазной границы нефть — вода, поэтому прорыва воды не происходит. Увеличение ε с увеличением концентрации частиц указывает на увеличение толщины слоев, примыкающих к межфазным границам, и смену механизма вытеснения: переход от уменьшения поверхностного натяжения к уменьшению энергии отрыва нефти от поверхности капилляров.

Таким образом, можно предположить, что на межфазной границе нефть — вода в пористой среде формируется переходная многослойная микрогетерофазная структура, состоящая из плоских наночастиц графена, углеводородных молекул, входящих в состав нефти, и поверхностно-активных веществ.

Фактически плоские наночастицы графена выполняют функцию подложки, на которой адсорбируются углеводородные молекулы, входящие в состав нефти. В дальнейшем образуется пленка с примыкающими к ней слоями графена — многослойная микрогетерофазная структура. В экспериментах, описанных в [4, 5], наблюдалось образование пленки с примыкающими к ней слоями графена на границе предельный углеводород — вода. В [6] описан фазовый переход твердое тело — жидкость на межфазной границе *n*-гексан — вода. На рис. 3 показана пленка, сформировавшаяся на границе графеновой суспензии ($C = 0,04$ г/л) и октана (C_8H_{18}). Пленка получена в пробирке путем выдерживания октана на поверхности графеновой суспензии в течение 24 ч.

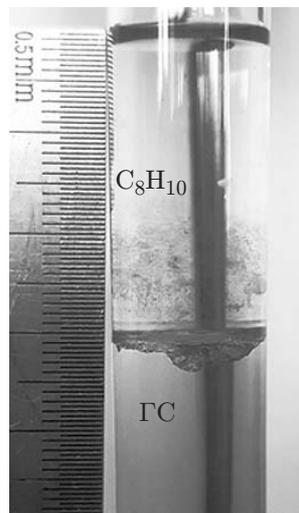


Рис. 3. Пленка, образующаяся в процессе взаимодействия графеновой суспензии (ГС) и октана (C_8H_{18})

Таким образом, результаты работы свидетельствуют о необходимости изучения механизмов самоорганизации пленки на подложке из наночастиц графена, увеличения ее толщины и вытеснения нефти при наличии пленки из пористой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пахаруков Ю. В., Шабиев Ф. К., Сафаргалиев Р. Ф. Вытеснение нефти из пористой среды с использованием графитовой суспензии // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 4. С. 3–8.
2. ОСТ 39-235-89. Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. Введ. 06.02.1989.
3. Соотс Р. А., Якимчук Е. А., Небогатикова Н. А. и др. Графеновые суспензии для 2D-печати // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 8. С. 102–110.
4. Lei Q., Bain C. D. Surfactant-induced surface freezing at the alkane-water interface // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92, N 4. 176103.
5. Schlossman M. L., Tikhonov A. M. Molecular ordering and phase behavior of surfactants at water-oil interfaces as probed by X-ray surface scattering // Ann. Rev. Phys. Chem. 2008. V. 59, N 5. P. 153–177.
6. Тихонов А. М. Фазовый переход твердое тело — жидкость в гиббсовском монослое триаконолановой кислоты на межфазной границе н-гексан — вода // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102, № 8. С. 620–625.

*Поступила в редакцию 18/VII 2018 г.,
после доработки — 9/VIII 2018 г.
Принята к публикации 3/IX 2018 г.*