

УДК 531.1; 621.928.37; 622.276
DOI: 10.31660/0445-0108-2022-5-90-97

Движение нанокластеров нефти в капилляре пористой среды

**Ю. В. Пахаруков^{1,2}, Ф. К. Шабиев^{1,2}, Р. Ф. Сафаргалиев^{1,2*},
А. В. Морев¹**

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

*safargalievrf@tyuiu.ru

Аннотация. В работе рассматривается движение гидрофильной и гидрофобной жидкостей в капилляре. Известно, что структура течения таких жидкостей зависит от множества условий. Вопрос правильного выбора управляющих параметров имеет большое значение для управления переходом течения в разные режимы. Важнейшим вопросом в задаче фильтрации является морфологическая устойчивость фронта вытеснения в процессе фильтрации. Обычно считается, что достаточно управлять капиллярным числом, чтобы менять режимы течения. В работе показано, что можно выделить еще один параметр — расклинивающее давление. Если найти механизмы влияния на расклинивающее давление, то можно эффективно управлять течением, меняя толщину струи, и управлять процессом кластеризации (разбиением струи на капли). В работе показано, что таким механизмом может быть взаимодействие молекул углеводорода с наночастицами.

Ключевые слова: фильтрация нефти, пористая среда, нанокластеры, графен

Для цитирования: Движение нанокластеров нефти в капилляре пористой среды / Ю. В. Пахаруков, Ф. К. Шабиев, Р. Ф. Сафаргалиев, А. В. Морев. – DOI 10.31660/0445-0108-2022-5-90-97 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2022. – № 5. – С. 90–97.

Flow of oil nanoclusters in a porous medium capillary

**Yury V. Pakharukov^{1,2}, Farid K. Shabiev^{1,2}, Ruslan F. Safargaliev^{1,2*},
Alexander V. Morev¹**

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

²University of Tyumen, Tyumen, Russia

*safargalievrf@tyuiu.ru

Abstract. In the article, we consider movement of hydrophilic and hydrophobic liquids in a capillary. It is known that structure of flow of such fluids depends on set of conditions. The issue of correct choice of control parameters is of great importance for controlling the transition of the flow into different modes. The most important issue in the filtration problem is morphological stability of displacement front during filtration. It is generally assumed that it is sufficient to control the

capillary number to change the flow regimes. The article shows that another parameter can be singled out, which is the disjoining pressure. If mechanisms of influence on wedging pressure can be found, then it is possible to control effectively flow by changing thickness of jet and to control the process of clustering (splitting of jet into droplets). In the article, it is shown that such mechanism can be interaction of hydrocarbon molecules with nanoparticles.

Keywords: oil filtration, porous media, nanoclusters, graphene

For citation: Pakharukov, Yu. V., Shabiev, F. K., Safargaliev, R. F., & Morev, A. V. (2022). Flow of oil nanoclusters in a porous medium capillary. *Oil and Gas Studies*, (5), pp. 90-97. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2022-5-90-97

Введение

Процесс фильтрации является важнейшей частью движения жидкости в пористо-капиллярной среде не только в технологиях нефтедобычи, но и при работе энергетических установок. Работа этих установок зависит от точного регулирования расхода жидкости. Одной из проблем работы энергетических установок является снижение со временем расхода жидкости за счет уменьшения проницаемости пористого материала. Все пространство пересекающихся капилляров и пор можно разбить на отдельные кластеры. В этом случае движение жидкости в кластерах можно описывать теорией перколяции [1]. Перколяция характеризуется критической точкой, которая может быть оценена числом Рейнольдса. Известно, что вблизи критического числа Рейнольдса на поверхности капилляров появляется граничный слой, состоящий из кластеров неподвижных молекул жидкости. При этом ламинарное течение в капилляре распадается, а сами кластеры увеличиваются в размере, сливаясь в бесконечный кластер, образуя пленку на поверхности капилляра. В случае вытеснения нефти из пористой среды гидрофильной жидкостью будет образовываться гидрофобная пленка нефти. До сих пор считается, что основным инструментом влияния на движение жидкости в процессе фильтрации является капиллярное число, определяемое вязкостью и скоростью течения жидкости [1]. С ростом капиллярного числа наблюдается смена режимов течения в капиллярах от струйного к капельному и четочному течению [2]. Однако, как видно из вышеизложенного, на характер течения и теплообмен в пристеночной области должны влиять пленка и геометрия неоднородности поверхности капилляра. Ниже будет приведен анализ влияния толщины пленки и размера неоднородности поверхности капилляров на смену режимов течения и явлений, связанных с ними.

Объект и методы исследования

Движение капли в капиллярах определяется не только силами, описываемыми капиллярным числом, но и величиной расклинивающего давления.

Рассмотрим движение капли жидкости (нефть) в цилиндрическом капилляре (рис. 1), заполненном не смешивающейся жидкостью (вода).

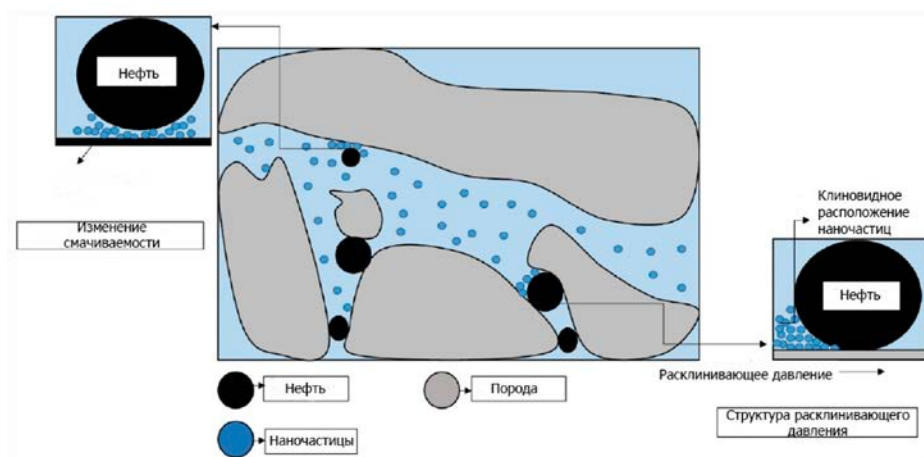


Рис. 1. Движение нанокластера нефти в цилиндрическом капилляре [3]

Введем цилиндрическую систему координат. Ось x направим по оси капилляра, начало координат свяжем с центром капли. Будем считать, что продольный размер капли больше радиуса капилляра (a). В таком представлении задачу капиллярной системы можно моделировать уравнением Навье — Стокса в рамках теории «смазки» [2].

Для случая неподвижной капли ($A(t) = 0$) можно получить уравнение, описывающее изменение толщины пленки в приближении $h/a \ll 1$ [2].

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\sigma}{3\mu_1} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h^3 \left[\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \left(\frac{1}{a^2} + \frac{\partial P(h)}{\sigma \partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] \right\}, \quad (1)$$

где σ — поверхностное натяжение; P — расклинивающее давление.

Для анализа устойчивости этого уравнения необходимо понять временную зависимость толщины пленки [3].

$$h = h_0 + \Delta(x, t), \Delta \ll h_0, \quad (2)$$

где $\Delta(x, t) = e^{\lambda t + i\omega x}$.

В результате подстановки получим [2, 3]

$$\lambda = -\frac{\sigma h_0^3}{3\mu_1} \left[\omega^4 - \omega^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{P'(h_0)}{\sigma} \right) \right]. \quad (3)$$

Возмущение будет нарастать при $\lambda > 0$, если

$$\left(\frac{1}{a^2} + \frac{\partial P}{\partial x} \frac{1}{\sigma} \right) > \omega^2. \quad (4)$$

Частота колебаний поверхности капли связана с ее длиной (l), поэтому условие неустойчивости может быть усилено соотношением

$$\frac{\partial P}{\partial x} > -\frac{\sigma}{a^2}. \quad (5)$$

Для оценки можно считать справедливым

$$\frac{\partial}{\partial x} \sim \frac{1}{l}. \quad (6)$$

В результате можно получить размер капли, с которого капля начнет вытягиваться и диспергироваться:

$$l \sim \frac{P(h)a^2}{\sigma}. \quad (7)$$

Оценивая расклинивающее давление выражением $\Pi = \frac{A}{h^2}$, $h \sim 10^{-7}$ м, $A = 10^{-12}$, $\sigma \sim 0,1$ н/м, получим $l \sim 10^{-5}$ м.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что эволюция капиллярной системы определяется наряду с капиллярным числом, расклинивающим давлением. Следовательно, детализацию влияния скорости течения жидкости, стенок капилляров и пустотного пространства на процесс фильтрации можно осуществить через анализ расклинивающего давления и выделение роли капиллярного числа.

Таким образом, было показано, что эффекты, проявляемые при движении капель в капиллярах, описываются влиянием двух величин — расклинивающего давления и капиллярного числа.

Рассмотрим влияние капиллярного числа. Пусть имеется участок бесконечной струи радиусом R_0 и поверхностным натяжением σ . Вследствие развития неустойчивости под действием поверхностных сил струя разваливается на капли, то есть совокупность сферических капель будет более выгодна, чем цилиндрическая струя. W — потенциальная энергия боковых поверхностных сил (капилляра). Приравняв объем цилиндра к объему сферических капель, получим r — радиус одной капли

$$r = \sqrt[3]{\frac{3R_0^2 L}{4N}},$$

$$\frac{W_{сф}}{W_{цил}} = \sqrt[3]{\frac{9R_0 N}{2L}} < 1.$$

Пусть $N = 1$, при $L > 4,5R_0$ то есть $r > 3R_0/2$, L — длина неустойчивого участка цилиндрической струи. Струя неустойчива к длинным волнам $\lambda \geq 4R_0$. Более строгий анализ показывает

$$r \approx \frac{3R_0}{\sqrt[3]{4}}.$$

Струя неустойчива к радиальным колебаниям и разбивается на капли (r). Началом этого процесса является возмущение радиальной проекции радиуса струи [2, 4]

$$R = R_0 + \varepsilon \exp(\omega t + ikx), \quad \varepsilon \ll R_0.$$

В результате можем выразить частоту колебания радиальной поверхности струи

$$\omega^2 = \frac{\varepsilon}{\rho R_0^3} \frac{I_1(kR)}{I_0(kR)} (1 - k^2 R_0^2), \quad kR < 1,$$

где I_1, I_0 — функции Бесселя.

Время образования капель из струи можно оценить выражением

$$\frac{1}{\omega} \approx 3 \sqrt{\frac{\rho R_0}{\sigma}}.$$

Из условия неустойчивости Рэлея следует $L \geq 4,5R_0$. С другой стороны, выше было показано, что из условия нарастания возмущения можно получить оценку длины вытянутой капли с учетом расклинивающего давления

$$l \sim \frac{\Pi(h)R^2}{\sigma}.$$

Из сопоставления выражений ($l \approx L$) можно получить оценку расклинивающего давления, необходимого для образования капель:

$$\Pi(h) \geq \frac{4,5\sigma}{R_0}.$$

Скорость вытягивания капли можно оценить выражением

$$V \approx l\omega = \frac{\Pi(h)R_0^{1/2}}{3\sqrt{\sigma\rho}}.$$

Скорость движения капли связана с капиллярным числом соотношением [1–5]

$$V = 1,2(3Ca)^{\frac{2}{3}}.$$

Сравнивая выражения для V можно получить зависимость капиллярного числа от расклинивающего давления, размера капли и поверхностного натяжения

$$Ca \sim \frac{1}{3} \left(\frac{\Pi R_0^{\frac{1}{2}}}{3,6 \sqrt{\rho \sigma}} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Из анализа выражения следует, что с увеличением капиллярного числа будет развиваться дробление струйного течения на капли. Следовательно, капиллярное число является управляющим параметром, отвечающим за переход между режимами течения.

Результаты и обсуждение

Такой результат дает возможность управлять структурой флюида в капилляре за счет изменения расклинивающего давления. Дело в том, что изменять капиллярное число можно за счет изменения условий вытеснения в процессе фильтрации. Это не всегда возможно и всегда связано с техническими трудностями. Другое дело расклинивающее давление, которым можно управлять в процессе движения жидкости в капилляре. Например, можно добавить в поток малую концентрацию наночастиц. Ранее в наших работах было показано, что добавление графеновых наночастиц приводит к их взаимодействию с молекулами углеводорода. В результате образуется пленка (рис. 2), хорошо взаимодействующая с поверхностью капилляров.

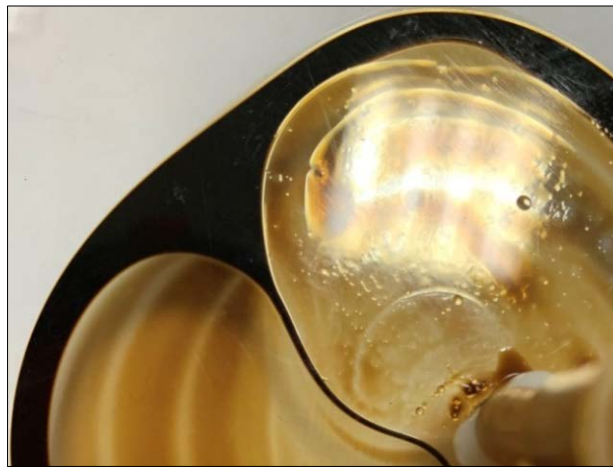


Рис. 2. Вытеснение нефти в радиальной ячейке Хеле-Шоу

Такой эффект приводит к значительному изменению фильтрационного процесса. Ниже приведены результаты вытеснения в ячейке Хеле-Шоу, которая хорошо моделирует процесс фильтрации. Видно, что в результате формирования пленки значительно увеличивается морфологическая устойчивость фронта вытеснения без заметного снижения поверхностного натяжения.

Выводы

Показано, что в процессе фильтрации графенового нанофлюида в радиальной ячейке Хеле-Шоу, заполненной нефтью, за счет тепломассопереноса формируется пленка из молекул углеводородов и наночастиц, обладающая внутренней структурой.

Список источников

1. Мирзаджанзаде, А. Х. Моделирование процессов нефтегазодобычи : нелинейность, неравновесность, неопределенность / А. Х. Мирзаджанзаде, М. М. Хасанов, Р. Н. Бахтизин. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2005. – 367 с. – Текст : непосредственный.
2. Калинин, В. В. Влияние поверхностных сил на гидродинамику растекания капель и капиллярные течения : специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Калинин Василий Валерьянович. – Москва, 2002. – 289 с. – Текст : непосредственный.
3. Design and screening of synergistic blends of SiO₂ nanoparticles and surfactants for enhanced oil recovery in high-temperature reservoirs / N.Y.T. Le, D. K. Pham, K. H. Le, P. T. Nguyen. – Text : electronic // Advances in Natural Sciences : Nanoscience and Nanotechnology. – 2011. – Vol. 2, Issue 3. – URL: <https://doi.org/10.1088/2043-6262/2/3/035013>.
4. Кляцкин, В. И. Диффузия и кластеризация пассивной примеси в случайных гидродинамических потоках : монография / В. И. Кляцкин. – Москва : Физматлит, 2005. – 160 с. – Текст : непосредственный.
5. Пахаруков, Ю. В. Механизмы формирования микрогетерофазных состояний в реофизически сложных средах, применяемых в нефтегазодобыче / Ю. В. Пахаруков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. – 242 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Mirzadzhanzade, A. Kh., Khasanov, M. M., & Bakhtizin, R. N. (2005). Modelirovanie protsessov neftegazodobychi : nelineynost', neravnovesnost', neopredelennost'. Moscow, Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 367 p. (In Russian).
2. Kalinin, V. V. (2002). Vliyanie poverkhnostnykh sil na gidrodinamiku rastekaniya kapel' i kapillyarnye techeniya. Diss. ... dokt. fiz.-mat. nauk. Moscow, 289 p. (In Russian).
3. Le, N. Y. T., Pham, D. K., Le, K. H., & Nguyen, P. T. (2011). Design and screening of synergistic blends of SiO₂ nanoparticles and surfactants for enhanced oil recovery in high-temperature reservoirs. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 2(3). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/2043-6262/2/3/035013>

4. Klyatskin, V. I. (2005). Diffuziya i klasterizatsiya passivnoy primeci v sluchaynykh gidrodinamicheskikh potokakh. Moscow, Fizmatlit Publ., 160 p. (In Russian).
5. Pakharukov, Yu. V. (2014). Mekhanizmy formirovaniya mikrogeterofaznykh sostoyaniy v reofizicheski slozhnykh sredakh, primenyaemykh v neftegazodobyche. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., 242 p. (In Russian).

Информация об авторах

Пахаруков Юрий Вавилович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, методов контроля и диагностики, Тюменский индустриальный университет, профессор кафедры прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет, г. Тюмень

Шабиев Фарид Канафеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, методов контроля и диагностики, Тюменский индустриальный университет, доцент кафедры прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет, г. Тюмень

Сафаргалиев Руслан Фаридович, ассистент кафедры физики, методов контроля и диагностики, Тюменский индустриальный университет, старший преподаватель кафедры прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, safargalievrf@tyuiu.ru

Морев Александр Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Yury V. Pakharukov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Physics, Control and Diagnostic Methods, Industrial University of Tyumen, Professor at the Department of Applied and Technological Physics, University of Tyumen

Farid K. Shabiev, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Physics, Control and Diagnostic Methods, Industrial University of Tyumen, Associate Professor at the Department of Applied and Technological Physics, University of Tyumen

Ruslan F. Safargaliev, Assistant at the Department of Physics, Control and Diagnostic Methods, Industrial University of Tyumen, Senior Lecturer at the Department of Applied and Technological Physics, University of Tyumen, safargalievrf@tyuiu.ru

Alexander V. Morev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Physics, Industrial University of Tyumen

Статья поступила в редакцию 16.08.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 15.09.2022.

The article was submitted 16.08.2022; approved after reviewing 12.09.2022; accepted for publication 15.09.2022.