

Исследование режимов воздействия сдвиговыми напряжениями с целью снижения вязкости нефти

В.И. Лесин, Ю.В. Алексеева
ИПНГ РАН | Москва, Россия,
vilesin@inbox.ru

Аннотация

Исследовано влияние режимов воздействия напряжения сдвига на формирование дисперсной фазы коллоидных частиц нефти. На основе термодинамического подхода к формированию агрегатов коллоидных частиц нефти предложена концепция разработки режимов воздействия в рамках фрактальной теории вязкости. Полученные экспериментальные результаты подтверждают фрактальную теорию и демонстрируют возможность создания процедуры воздействия скоростью сдвига, приводящей к значительному устойчивому снижению вязкости нефти.

Ключевые слова

вязкость, нефть, фрактальная теория, коллоидная частица, скорость сдвига, термодинамика, режим воздействия сдвига

Материалы и методы

Измерения производились с помощью вискозиметра «Physica MCR 301» фирмы «Anton Paar» (Австрия) с измерительной системой в геометрии конус-плита.

Для измерения вязкости образец коллоидного раствора, имеющий

начальную температуру 20°C и находившийся при этой температуре не менее 10 суток, помещался в ячейку и охлаждался до заданной температуры, выдерживался при этой температуре 30 мин, после чего производились измерения зависимости вязкости η от скорости сдвига G . Измерения проводились в условиях постоянной температуры 10°C. Интервал времени, через которое фиксировалась стационарная величина η зависел от G . При таком режиме регистрации для каждого G достигалось значение вязкости, соответствующее термодинамическому равновесию при данной температуре и величине G .

Благодарности

Статья подготовлена сотрудниками ИПНГ РАН в рамках выполнения государственного задания по темам № АААА-А19-119030690057-5 (Лесин В.И.) и АААА-А19-119022090096-5 (Алексеева Ю.В.)

Для цитирования:

В.И. Лесин, Ю.В. Алексеева. Исследование режимов воздействия сдвиговыми напряжениями с целью снижения вязкости нефти // Экспозиция Нефть Газ. 2020. №2. С. 38-41. DOI:10.24411/2076-6785-2020-10080.

Поступила в редакцию: 24.03.2020

OIL PRODUCTION

UDC 622.276 | Original Paper

Research of modes of exposure by shear stresses in order to reduce petroleum viscosity

Victor I. Lesin, Yulia V. Alekseeva
OGRI RAS | Moscow, Russia,
vilesin@inbox.ru

Abstract

The effect of shear stress modes on the formation of the dispersed phase of colloidal oil particles is studied. Based on the thermodynamic approach to the formation of aggregates of colloidal oil particles, the concept of developing modes within the framework of fractal viscosity theory is proposed. The obtained experimental results confirm the fractal theory and demonstrate the possibility of creating a procedure for exposure the shear rate, which leads to a significant steady decrease in oil viscosity.

Keywords

viscosity, petroleum, fractal theory, colloidal particle, shear rate, thermodynamics, shear exposure mode

Materials and methods

Measurements were made using a viscometer "Physica MCR 301" by Anton Paar (Austria) with a measuring system in the cone-plate geometry. To measure the viscosity, a sample of a colloidal solution

having an initial temperature of 20°C and being at this temperature for at least 10 days it was placed in a cell and cooled to a set temperature, kept at this temperature for 30 minutes, after which measurements were made of the dependence of η on G . The viscosity measurements were performed at a constant temperature of 10°C. The time interval after which the stationary value of η was fixed was depended on G . In this registration mode, the viscosity value corresponding to the thermodynamic equilibrium at a given temperature and the value of G .

Acknowledgements

The paper has been prepared as part of the studies within the OGRI RAS State Research Contract, topics, АААА-А19-119030690057-5 (Lesin V.I.) and АААА-А19-119022090096-5 (Alekseeva Yu.V.)

For citation:

Victor I. Lesin, Yulia V. Alekseeva. Research of modes of exposure by shear stresses in order to reduce petroleum viscosity // Ekspozitsiya Net' Gaz = Exposition Oil Gas, 2020, issue 2, pp.38-41. (In Russ.). DOI:10.24411/2076-6785-2020-10080.

Received: 24.03.2020

Введение

Добыча и транспортировка тяжелой нефти и нефтепродуктов осложняется большой величиной вязкости, резко возрастающей с понижением температуры вследствие выпадения в твердую фазу в виде коллоидных частиц тяжелых компонентов нефти — асфальтенов, смол и парафинов. Для снижения вязкости используются технологии нагрева, введения химических реагентов, воздействия колебаниями давления в широком диапазоне частот. Целью всех указанных мероприятий является разрушение коллективных структур, образованных коллоидными частицами нефти и механическими примесями. Как установлено в ряде работ такие коллективные структуры представляют собой агрегаты коллоидных частиц фрактального строения (ФА) [1, 2].

Фрактальные агрегаты коллоидных частиц имеют пористую структуру, которая характеризуется степенной зависимостью плотности — ρ ФА от расстояния от центра инерции — r : $\rho \sim r^{-\alpha}$. ФА деформируются и разрушаются под действием сил напряжения сдвига τ со стороны раствора из-за возникновения градиента скорости V (скорости сдвига) [3, 4]:

$$G = dV/dx, \tau = \eta G$$

Вероятность присоединения к ФА коллоидных частиц и их мелких кластеров, имеющих плотную, прочную структуру, и отрыва фрагментов от ФА, а также деформация ФА зависят от сил напряжения сдвига τ , что выражается в зависимости инерциального радиуса R от G : $R = R(G)$. Поскольку масса ФА — $M \sim R^D$, то затраты гидродинамической энергии потока раствора на массообмен и перемещение ФА зависят от радиуса R и фрактальной размерности D . Особенности взаимодействия коллоидного раствора с ФА таковы, что отношения вязкости (напряжения сдвига) при малых значениях G (менее 1 с^{-1} – 10 с^{-1}) к вязкости в диапазоне больших значений G достигают нескольких десятков единиц [2, 5, 6, 7].

В связи с развитием и расширением применения методов повышения производительности скважин методами ударно-волнового воздействия на коллектор нефти важным является вопрос о подходах к выбору режимов воздействия с целью снижения вязкости нефти. В работе [8] при массовом применении ультразвуковой обработки скважин установлено, что коэффициент успешности может находиться в пределах 0–100%.

Колебания давления в скважине, как показано в [9], эквивалентны воздействию на нефть усредненных за период колебаний значений скорости сдвига. Задача данной работы состояла на примере модельных экспериментов при воздействии скорости сдвига определить тенденции изменений вязкости на основе термодинамического подхода к процессам изменения свойств ФА.

Теория и экспериментальные результаты

Поскольку течение нефти в трещинах и поровом пространстве коллекторов, а также в насосно-компрессорных трубах, характеризуется малыми значениями G , то при разработке общего подхода к снижению вязкости наибольшее внимание было обращено на диапазон значений G , близких к 0.

Согласно фрактальной теории вязкость коллоидного раствора [2, 7]:

$$\eta = \eta_{\infty} (1 + Ka^3 n \cdot R^4) \quad (1).$$

Здесь $R = R/a$, R — радиус инерции ФА, a — радиус коллоидной частицы, $\lambda(D) > 0$ и $K = K(D)$ — константы, зависящие от фрактальной размерности массы — D , где D зависит от предыдущих физико-химических воздействий на коллоидную систему (коллоидный раствор), n — концентрация центров роста ФА, η_{∞} — вязкость вмещающей жидкости:

$$\eta_{\infty} = \eta_0 (1 + KNv) \quad (2),$$

где N — концентрация мелких кластеров коллоидных частиц, v — их средний объем, K — фактор формы кластеров (для сферических частиц $K=2,5$), η_0 — вязкость вмещающей жидкости, близкая к вязкости бензиновой фракции нефти.

При учете зависимости радиуса инерции от скорости сдвига $R \sim (G_0/G)^h$ [3, 4, 5] стационарное значение вязкости, соответствующее данному значению G имеет вид:

$$\eta = \eta_{\infty} (1 + Kga^3 n (G_0/G)^{4h}) \quad (3).$$

ФА больших размеров ($R \gg l$) имеют слоистую структуру [4, 9], что выражается в изменении λh с ростом или снижением G . При этом λh и K_g меняются, но остаются постоянными величинами для конечных интервалов значений $G_i < G < G_{i+1}$, т.е. $(\lambda h)_i = \alpha_i = \text{const}$ и $K_g = \text{const}$ для $r_i < R < r_{i+1}$.

Слоистая структура ФА проявляется, например, как зависимость стационарного значения $\ln(\eta/\eta_{\infty} - 1)$ от $\ln(G_0/G)$ в виде ломаной линии, состоящей из соединенных между собой отрезков прямых, соответствующим определенным диапазонам значений G [2, 7]:

$$\ln(\eta/\eta_{\infty} - 1) = \ln B_i - \alpha_i \ln G \quad (4).$$

Использование формулы (4) позволяет получить аналитическую зависимость вязкости и, следовательно, напряжения сдвига от скорости сдвига G в виде:

$$\eta = \eta_{\infty} (1 + B_i G^{-\alpha_i}),$$

где составляющая $B_i G^{-\alpha_i}$ будет характеризовать отклонение вязкости η от ньютоновских свойств, т.е. при $B_i G^{-\alpha_i} \approx 0$ вязкость практически не зависит от G и коллоидный раствор можно считать ньютоновской жидкостью.

Наличие ФА в нефти резко снижает продуктивность скважины за счет повышения сопротивления потоку как в пласте, так и в насосно-компрессорных трубах. Поэтому целью исследования, предлагаемого в данной работе, являлось построение общей концепции процесса, регулируемого во времени воздействия напряжения сдвига с целью снижения вязкости нефти в диапазоне наиболее важных малых значений G , т.е. уменьшения B и α .

Слоистая структура агрегатов коллоидных частиц нефти характеризуется плотным ядром ФА (рис. 1)..

На фото видно, что периферическая часть ФА обладает высокой разреженностью, когда каждая отдельная частица контактирует с малым количеством соседей. Поскольку сила притяжения частицы/фрагмента пропорциональна количеству контактов [7], то отрыв фрагментов от агрегата потребует приложения значительных сил напряжения сдвига. В свою очередь столкновение частицы/кластера с гладкой поверхностью плотно упакованного сферического ФА с $D = 3$ не приведет к их присоединению из-за малой площади контакта.

Из вышесказанного следует, что для снижения вязкости следует формировать плотные сферические ФА. Этот результат можно получить, создавая условия роста ФА в состоянии термодинамического равновесия между дисперсной средой и центрами роста ФА по следующему сценарию. Вначале под действием больших скоростей сдвига добиваемся полного разрушения ФА, а затем путем снижения скорости сдвига достигаем основного свойства ФА — воспроизведения плотной структуры в ином масштабе. Присоединение и отрыв коллоидных частиц от ФА под действием G наименее вероятен для плотных агрегатов сферической формы.

Для подтверждения справедливости термодинамического подхода к снижению вязкости были проведены эксперименты, в которых реализовывались различные программы изменения скорости сдвига во времени с целью проверки предложенной выше гипотезы.

Измерения производились с помощью вискозиметра «Physica MCR 301» фирмы «Anton Paar» (Австрия) с измерительной системой в геометрии конус-плита.

Для измерения вязкости образец коллоидного раствора, имеющий начальную температуру 20°C и находившийся при этой температуре не менее 10 суток, помещался в ячейку и охлаждался до заданной температуры, выдерживался при этой температуре 30 мин., после чего производились измерения зависимости η от G . Измерения вязкости проводились в условиях постоянной температуры 10°C. При измерении зависимости η от G значения вязкости фиксировались через некоторое время после достижения стационарного значения. Параметры B , α , η_{∞} определялись экспериментально с помощью формулы (4); процедура описана в [2, 7].

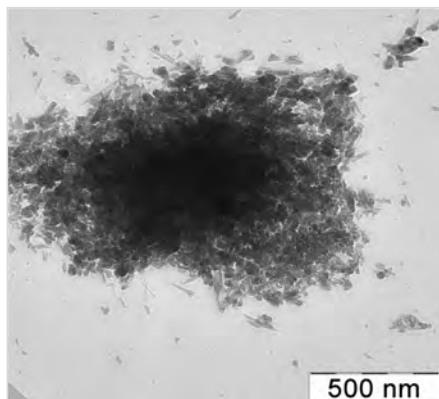


Рис. 1 — Изображение агрегата коллоидных частиц нефти, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии
Fig. 1 — Image of an aggregate of colloidal petroleum particles obtained by transmission electron microscopy

Поскольку для течения более информативным является напряжение сдвига $\tau(G) = \eta_\infty G(1 + BG^{-\alpha})$, характеризующее сопротивление движению жидкости в трубопроводе и пористой среде, результаты экспериментов будут представлены в виде зависимостей $\tau(G)$.

На рис. 2а, б показаны участки зависимостей $\tau(G)$ в области значений G , соответствующих малым скоростям течения для случая, когда после роста G от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до 100 с^{-1} , воздействие скоростью сдвига было остановлено на 30 и 60 мин., а затем была снята зависимость $\tau(G)$ при снижении G от 100 с^{-1} до $0,1 \text{ с}^{-1}$.

Сравнение постоянных η_∞ , B , α показало, что в диапазоне $0,1\text{--}30 \text{ с}^{-1}$ при росте G коэффициенты B_i составляли величины порядка $5\text{--}10$ коэффициенты α_i находились в диапазоне $1\text{--}0,3$. При снижении G коэффициенты составили для 30 мин. задержки $B_i \approx 0,3\text{--}1$ и $\alpha_i \approx 0,3\text{--}0,8$; после 60 мин. $B_i \approx 1\text{--}2$, $\alpha_i \approx 0,5\text{--}1$. Величина η_∞ составила в обоих случаях $0,17 \text{ Па}\cdot\text{с}$ для подъема G и $0,24 \text{ Па}\cdot\text{с}$ на снижении. Из рис. 2 видно, что

прерывание на сравнительное небольшое время приводит постепенно к значительному росту напряжения сдвига в области малых значений G . Сравнение рис. (а) и (б) показывает, что большой интервал времени после завершения обработки приводит к неньютоновской, нелинейной зависимости $\tau(G)$ для малых скоростей сдвига, тогда как при малом интервале $\tau(G) \sim G$ вплоть до малых значений G .

Изменение η_∞ показывает, что остановка воздействия приводит к росту объема мелких коллоидных частиц Nv , который в данном случае можно оценить как рост с 10% объема до 30%. Это приводит к тому, что в области больших значений G обработка приводит к росту напряжения сдвига. На рис. 3 показаны зависимости, снятые при росте и снижении после 60-минутного интервала времени остановки воздействия. Видно, что из-за роста η_∞ в области значений G более 60 с^{-1} напряжение сдвига после обработки скоростью сдвига больше, чем для исходного состояния образца.

В [10] была исследована зависимость $\tau(G)$ для случая, когда после достижения 100 с^{-1} скорость сдвига была увеличена до 1000 с^{-1} , а затем постепенно снижена до $0,1 \text{ с}^{-1}$. В этом случае значения η_∞ $0,14 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и $0,15 \text{ Па}\cdot\text{с}$ учетом точности измерений $0,005 \text{ Па}\cdot\text{с}$ можно считать одинаковыми. Как следует из вышесказанного, в этом случае объем Nv не изменился.

Итоги

Из полученных результатов следует, что после остановки воздействия скоростью сдвига происходит увеличение количества мелких, плотных частиц, что выражается в росте η_∞ . Поскольку такие частицы являются центрами роста ФА, то коллоидная фаза перераспределяется между увеличенным количеством центров, формируя устойчивые к разрушению ФА малых размеров. При этом вклад процессов роста/разрушения ФА под действием скорости сдвига в затраты гидродинамической энергии уменьшается, что выражается

в слабой зависимости вязкости от скорости сдвига и уменьшению вязкости в области малых значений G .

Выводы

На основе использования фрактальной теории предложен общий подход к снижению вязкости нефти и нефтепродуктов путем воздействия скоростью сдвига, регулируемой во времени по определенной программе. Метод основывается на термодинамическом подходе к процессам роста и/или разрушения агрегатов нефти фрактального строения под действием сил напряжения сдвига. Прерывистый режим воздействия может, как показывают экспериментальные данные, привести не только к снижению, но и росту вязкости и отрицательно сказаться на процессе добычи нефти.

Литература

1. Kane M., Djabourov M., Volle J.-L. Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions // Fuel, 2004, vol. 83, pp. 1591–1605. (In Eng.).
2. Lesin V.I., Koksharov Yu. A., Khomutov G.B. Viscosity of liquid suspensions with fractal aggregates: Magnetic nanoparticles in petroleum colloidal structures // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, vol. 392, pp. 88–94. (In Eng.).
3. Roldugin V.I. The characteristics of fractal disperse system // Russ. Chem. Rev, 2003, vol. 72, issue 11, pp. 913–937. (In Eng.).
4. Жюльен Р. Фрактальные агрегаты // Успехи физических наук. 1989. Т.157. №2. С. 339–357.
5. Sonntag R.C., Russel W.B. Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses. 1. Shear stress // Journal of Colloid and Interface Science, 1986, vol. 113, pp. 399–413. (In Eng.).
6. Лесин В.И., Лесин С.В. Фрактальная теория и экспериментальные исследования вязкости коллоидных систем при скоростях сдвига, близких к нулю // Нефтяное

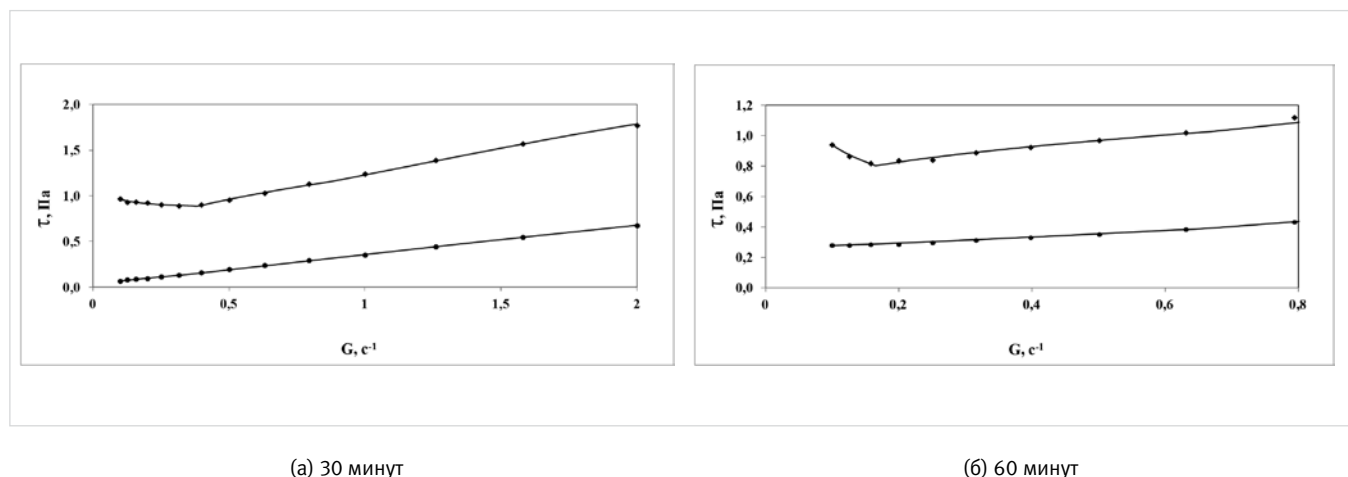


Рис. 2 — Зависимости $\tau(G)$ для случая, когда после роста G от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до $G=100 \text{ с}^{-1}$, воздействие скоростью сдвига было остановлено на 30 (а) и 60 (б) мин., а затем была снята зависимость $\tau(G)$ при снижении G от 100 с^{-1} до $0,1 \text{ с}^{-1}$. Точки — экспериментальные данные, сплошные линии расчет по формуле (4)
Fig. 2 — Dependence $\tau(G)$ for the case when, after increasing G from 0.1 с^{-1} to $G=100 \text{ с}^{-1}$, the exposure of the shear rate was stopped for 30 (a) and 60 (b) minutes, and then the dependence $\tau(G)$ was registered when G decreased from 100 с^{-1} to 0.1 с^{-1} . Points-experimental data, solid lines calculation using the formula (4)

- хозяйство. 2013. №7. С. 111–113.
7. Лесин В.И. Математическая модель вязкости тяжелой нефти, содержащей примеси коллоидных наночастиц оксидов металлов // Нефтегазовое дело. 2019. №2. С. 200–217. Режим доступа: DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-199-216.
8. Муллакаев М.С., Салтыков Ю.А., Салтыков А.А., Муллакаев Р.М., Анализ опытно-промышленных испытаний ультразвуковой технологии на скважинах самотлорского месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. №7 (331). С. 71–85. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-7(331)-71-85.
9. Лесин В.И., Лесин С.В. Влияние колебаний давления на вязкость нефти, содержащей коллоидные частицы // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. №1 (24). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art11.
10. В.И. Лесин, Ю.В. Алексеева. М Эволюция структуры фрактальных агрегатов нефти под действием напряжения сдвига // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. №3 (22). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art28.

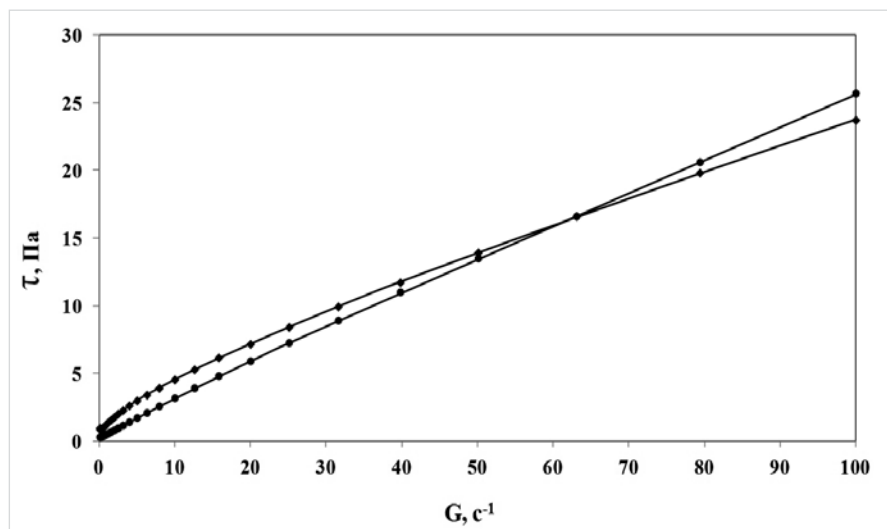


Рис. 3 — Зависимости $\tau(G)$ для случая, когда после роста от $0,1 \text{ c}^{-1}$ до $G=100 \text{ c}^{-1}$, воздействие скоростью сдвига было остановлено на 60 мин, а затем была снята зависимость $\tau(G)$ при снижении G от 100 c^{-1} до $0,1 \text{ c}^{-1}$. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии расчет по формуле (4)

Fig. 3 — Dependence $\tau(G)$ for the case when, after an increase from 0.1 c^{-1} to $G=100 \text{ c}^{-1}$, the exposure of the shear rate was stopped for 60 minutes, and then the dependence $\tau(G)$ was registered when G decreased from 100 c^{-1} to 0.1 c^{-1} . Points-experimental data, solid lines calculation using the formula (4)

ENGLISH

Results

From the results obtained, it follows that after stopping the exposure of the shear rate, an increase in the number of small, dense particles occurs, which is expressed in the growth of n_{∞} . Since these particles are the centers of FA growth, the colloidal phase is redistributed between an increased number of centers, forming small FA resistant to destruction. In this case, the contribution of FA growth / destruction processes under the effect of the shear rate to the hydrodynamic energy consumption decreases, which is expressed in a weak dependence of the viscosity on the shear rate and a decrease in the viscosity in the region of small values of G .

Conclusions

Based on the use of fractal theory, a General approach to reducing the viscosity of oil and petroleum products by affecting the shear rate regulated in time according to a certain program is proposed. The method is based on a thermodynamic approach to the processes of growth and / or destruction of oil aggregates of fractal structure under the action of shear stress forces. Intermittent exposure can, as shown by experimental data, lead not only to a decrease, but also to an increase in viscosity and negatively affect the process of oil production.

References

- Kane M., Djabourova M., Volle J-L. Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions // Fuel, 2004, vol. 83, pp. 1591–1605.
- Lesin V.I., Koksharov Yu. A., Khomutov G.B. Viscosity of liquid suspensions with fractal aggregates: Magnetic nanoparticles in petroleum colloidal structures // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, vol. 392, pp. 88–94.
- Roldugin V.I. The characteristics of fractal disperse system // Russ. Chem. Rev, 2003, vol. 72, issue 11, pp. 913–937.
- Jullien R. Fractal Aggregates // Condensed Matter Physics, 1989, vol. 157, issue 2, pp. 339–357. (In Russ.).
- Sonntag R.C., Russel W.B. Structure and breakup of Floccs Subjected to Fluid Stresses.1. Shear stress // Journal of Colloid and Interface Science, 1986, vol. 113, pp. 399–413.
- Lesin V.I., Lesin S.V. Fractal theory and experimental research of colloidal systems viscosity at shear rates close to zero value // Oil Industry, 2013, issue 7, pp. 111–113. (In Russ.).
- Lesin V.I. Viscosity Mathematical Model of Heavy Oil Containing the Metal Oxides Colloid Nanoparticles Impurity // Oil and Gas Business, 2019, issue 2, pp. 200–217. DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-199-216. (In Russ.).
- Mullakaev M.S., Saltykov Yu. A., Saltykov A.A., Mullakaev R.M. Analysis of pilot testing of ultrasonic technology in the Samotlor field wells // Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields, 2019, issue 7 (331), pp. 71–85. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-7(331)-71-85. (In Russ.).
- Lesin V.I., Lesin S.V. Influence of pressure fluctuations on the viscosity of oil containing colloidal particles // Actual Problems of Oil and Gas, 2019, issue 1 (24). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art11. (In Russ.).
- Lesin V.I., Alekseeva Yu.V. Evolution of the structure of oil fractal aggregates under the action of shear stress // Actual Problems of Oil and Gas, 2018, issue 3 (22). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art28. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лесин Виктор Иванович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
ИПНГ РАН, Москва, Россия
Для контактов: vilesin@inbox.ru

Алексеева Юлия Владимировна, младший научный сотрудник
ИПНГ РАН, Москва, Россия
Для контактов: avajul@yandex.ru

Victor I. Lesin, Sc.D., leading scientific researcher, OGRI RAS,
Moscow, Russia
Corresponding author: vilesin@inbox.ru

Yulia V. Alekseeva, junior scientific researcher, OGRI RAS,
Moscow, Russia
Corresponding author: avajul@yandex.ru