

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СДВИГОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЯЗКОСТИ НЕФТИ

В.И. Лесин¹, И.А. Клепиков², С.В. Лесин³
¹ ИПНГ РАН, ² ГОУ ВПО МГПУ, ³ РГУНГ им. И.М.Губкина
e-mail: vilesin@inbox.ru

Введение

Вязкость играет определяющую роль в процессах транспортировки и добычи нефти. Высокая вязкость нефти и нефтепродуктов обусловлена присутствием в их составах коллоидных частиц, образованных асфальтенами, смолами и другими высокомолекулярными органическими веществами. Присутствие коллоидных частиц приводит к появлению неньютоновских свойств – зависимости вязкости коллоидного раствора от скорости сдвига G (градиента скорости – $dV/dx=G$).

Мазут представляет фракцию, в которой концентрируются высокомолекулярные органические молекулы, и он является хорошей моделью тяжелой, высоковязкой нефти, поскольку близок к ней по составу. Снижение вязкости мазута является важным направлением улучшения его технологических характеристик. Для этого используют как добавление легких органических веществ, так и процедуру висбрекинга – химического преобразования его состава, что может приводить к нежелательному понижению температуры вспышки. Вязкость мазута резко возрастает при снижении температуры, что вызывает необходимость пожароопасной процедуры нагрева перед его применением в технологическом процессе. Разработка физических методов воздействия для снижения вязкости нефти, которые не меняют ее химический состав, является актуальной задачей. Созданию научных основ применения скорости сдвига для управления вязкостью посвящена данная работа.

Известно, что под действием скорости сдвига вязкость неньютоновских жидкостей – коллоидных растворов снижается и в диапазоне больших скоростей сдвига приобретает постоянное значение, и жидкость становится ньютоновской. Акустическое воздействие в виде колебания давления и, как следствие, колебания скорости сдвига также сопровождается снижением вязкости. Однако после прекращения воздействия, через некоторое время постепенно восстанавливается первоначальная величина вязкости. Снижение вязкости при таких воздействиях вызвано разрушением агрегатов коллоидных частиц [1], которые обладают, как правило, фрактальной структурой [2, 3].

Воздействие колебаниями давления широко используется для повышения производительности скважин и увеличения коэффициента извлечения нефти. Однако не всегда такое воздействие является достаточно результативным при применяемых амплитудах и продолжительности колебаний давления и при действии геолого-технических факторов в условиях разработки месторождения.

В данной работе обосновывается новый подход к снижению вязкости, заключающийся в варьировании величины скорости сдвига и продолжительности его воздействия, в основе такого подхода лежит использование физико-химических свойств агрегатов коллоидных частиц фрактальной структуры.

В работах [4–6] была предложена теория вязкости неньютоновских жидкостей, основанная на физико-химических особенностях агрегатов коллоидных частиц фрактального строения. К таким особенностям физических фрактальных агрегатов [7] относятся связь между массой фрактального агрегата M (в дальнейшем ΦA) и его радиусом инерции R [8]:

$$M = m(R/a)^d. \quad (1)$$

Связь между площадью поверхности ΦA и радиусом инерции [9]:

$$S = a^2(R/a)^D. \quad (2)$$

Зависимость радиуса инерции R от скорости сдвига [7–8]:

$$R = a(G_0/G)^p. \quad (3)$$

При этом $G_0 = A/\eta_\infty a^2 h^2$, m – масса коллоидной частицы, a – радиус коллоидной частицы, η_∞ – вязкость при бесконечной скорости сдвига, h – расстояние между поверхностями частиц (в случае z контактов G_0 увеличивается в z раз), d – размерность массы ΦA ($1 \leq d \leq 3$), D – размерность поверхности ΦA ($2 \leq D \leq 3$), A – константа Гамакера, S – площадь поверхности ΦA .

Согласно [4] вязкость коллоидного раствора связана с концентрацией (n) ΦA и площадью поверхности ΦA соотношением:

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

Здесь K – коэффициент, зависящий от структуры и сил взаимодействия коллоидных частиц.

Учитывая (3) – (4) получаем зависимость:

$$\eta = \eta_\infty (1 + BG^{-\alpha}), \quad (5)$$

где $\alpha = p(D+1)$ и $B = Ka^3 n(G_0)^{p(D+1)}$.

Отметим, что:

$$\ln(\eta/\eta_\infty - 1) = \ln B - \alpha \ln G. \quad (6)$$

Вследствие мультифрактальной структуры ФА равновесная зависимость $\ln(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\ln G$ представляет непрерывную кривую, состоящую из отрезков с различными значениями (B) и (α) для каждого интервала значений G [6].

Параметрам $D=2$, $d=3$ соответствует ФА сферической формы, с минимальным объемом порового пространства, заполненного жидкостью. Такой структуре присуще минимальное значение поверхностной энергии (минимум энергии коллоидной системы способствует ее наиболее устойчивому состоянию).

В формуле (4) предполагается, что ФА растут на частицах примесей, например, на коллоидных частицах железа, обладающих большой энергией адсорбции по отношению к коллоидным частицам нефти. В этом случае концентрация n постоянна, меняются лишь параметры ФА. Справедливость такого предположения подтверждается уменьшением вязкости нефти после магнитной обработки, которая разрушает агрегаты примесей ферромагнитных частиц железа, т.е. увеличивает концентрацию (n) центров роста ФА, что приводит к снижению вязкости, благодаря снижению размеров ФА [4]. Коллоидные магнитные частицы железа в составе ФА нефти были обнаружены в ходе исследований [4]. Отметим, что для реальных коллоидных растворов других составов формула (4), как правило, также справедлива, поскольку вероятность образования достаточно устойчивого во времени зародыша ФА путем создания устойчивого во времени агрегата (кластера) с более чем 3-мя коллоидными частицами близка к нулю.

Способность сопротивляться отрыву фрагмента ФА под действием сил вязкого трения $f_c = \eta_\infty G a^2$ зависит от силы f_a , связывающей коллоидную частицу с ФА, эта сила пропорциональна количеству контактов частицы с соседними и для одного контакта оценивается как $f_a = Aa/12h^2$ [10]. В случае сферического ФА частица на поверхности имеет до 9 контактов с соседними и сила связи с агрегатом f_a возрастает на порядок, что может обеспечить независимость вязкости от скорости сдвига вплоть до достаточно больших значений G .

Основной вклад в снижение вязкости коллоидного раствора, содержащего ФА, вносит именно процесс обмена импульсами движения и энергией между ФА и жидкостью, который обусловлен прилипанием и отрывом коллоидных частиц от ФА. Внешняя жидкость за счет сил вязкого трения совершает работу, необходимую для разрыва связей

фрагмента с ФА, что приводит к потере гидродинамической энергии жидкости и вносит основной вклад в изменение измеряемой вязкости коллоидного раствора. При снижении скорости процессов отрыва–прилипания основной вклад в изменение вязкости вносит трение жидкости о поверхность ФА (что проявляется в резком снижении вязкости коллоидного раствора). В отсутствие процессов прилипания–отрыва от ФА коллоидный раствор становится ньютоновской жидкостью, вязкость которой возрастает на величину, пропорциональную объемной доле, занимаемой коллоидными частицами в растворе. В формуле (5) превращение коллоидного раствора в ньютоновскую жидкость соответствует $\alpha = p(D+1)=0$, т. е. $p=0$.

Такой процесс обмена между ФА и жидкостью аналогичен обмену импульсами движения молекул, происходящему в газе и являющемуся причиной появления свойства вязкости.

Фрактальная структура агрегатов коллоидных частиц была установлена в многочисленных экспериментах по рассеянию фотонов и другими методами [2–3]. Воздействия на свойства ФА скорости сдвига, температуры (при разной их продолжительности) детально исследованы в ряде работ по изучению ФА методами малоуглового рассеяния фотонов и оптической микроскопии [2–3, 8, 11–12]. Обнаружены закономерности изменений размеров и фрактальной размерности агрегатов: рост ФА при постоянной температуре приводит к росту фрактальной размерности массы d , причем, d растет с увеличением скорости роста ФА [13], фрактальная размерность d увеличивается с ростом скорости сдвига и при длительном воздействии скорости сдвига [8].

Отмеченные закономерности являются ожидаемыми, поскольку соответствуют общему закону минимизации свободной энергии многофазной системы за счет снижения площади межфазной поверхности. Несмотря на то, что работы [8, 13] по рассеянию фотонов проводились при концентрациях коллоидных частиц порядка 10^{-3} % объемных, обнаруженные при этом закономерности дают научные обоснования для разработки методов управления вязкостью с помощью использования скорости сдвига.

Исходя из вышесказанного, способ уменьшения вязкости коллоидного раствора может заключаться в постепенном или скачкообразном увеличении скорости сдвига с целью полного разрушения ФА, а затем снижении скорости сдвига в условиях динамического равновесия между ФА и отдельными коллоидными частицами для каждого нового значения G с целью формирования плотных ФА. Режимы роста и

снижения G можно оценить, проводя исследования релаксации вязкости после изменения G .

Согласно [10–12] рост радиуса R агрегата из отдельных частиц во времени подчиняется степенному закону $R \sim t^m$ в значительном временном интервале. При достижении достаточно большого размера R возникает процесс отделения ФА от раствора за счет процесса седиментации, с началом процесса седиментации степенной закон становится неприменимым.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

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 $20\text{ }^\circ\text{C}$ и находившийся при этой температуре не менее 10 суток, помещался в ячейку и охлаждался–нагревался до заданной температуры, выдерживался при этой температуре 30 мин, после чего производились измерения зависимости η от G в режиме, когда каждое новое значение η при новом значении G достигало параметра близкого к стационарному. Измерения вязкости проводились при температуре $10\text{ }^\circ\text{C}$.

Для выбора режима изменения G были проведены эксперименты по исследованию релаксации в различных диапазонах значений G .

Как следует из (5), в условиях равновесия $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1) = \text{Ln} B - \alpha \text{Ln} G$, где α представляет постоянную величину, отражающую постоянство фрактальной размерности поверхности в определенном диапазоне значений G . Т.е. при выборе режима воздействия необходимо изменять скорость сдвига таким образом, чтобы сохранялась линейная зависимость $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\text{Ln} G$ в максимально большом интервале G и $\alpha \approx 0$.

Из (4) следует, что:

$$\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1) = \text{Ln}(K a^3 n) + (D+1)\text{Ln}(R(t)/a).$$

При $R \sim t^m$ имеем:

$$\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1) \sim m(D+1)\text{Ln} t. \quad (7)$$

Из (7) следует, что в случае степенной зависимости скорости роста или уменьшения R во времени $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ будет линейной функцией $\text{Ln} t$.

Наибольшие трудности при использовании представляет мазут с высокой вязкостью порядка нескольких единиц Па·с, находящийся при низкой температуре.

Поэтому для модельных экспериментов исследовали вязкость при температуре образца 10 °С.

При исследовании релаксации в диапазоне до 1000 с⁻¹ было обнаружено, что как рост вязкости мазута после снижения G, так и снижение вязкости после увеличения G хорошо подчиняется степенному закону. На рис. 1–2 приведены примеры зависимостей вязкости от времени при скачкообразном изменении скорости сдвига 0 с⁻¹ → 1000 с⁻¹ (рис. 1) и 1000 с⁻¹ → 1 с⁻¹ (рис. 2)

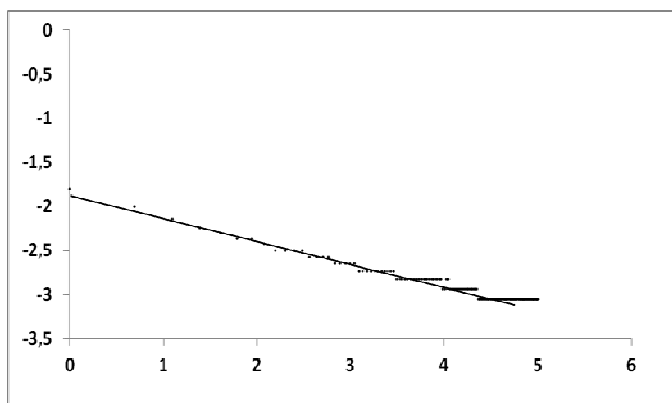


Рис. 1. Релаксация вязкости при скачке G 0→1000 с⁻¹.
Ось ординат – $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$, ось абсцисс – $\text{Ln } t$. Наклон прямой $m(D+1) = -0,24$; $\eta_\infty = 0,17$; температура образца 10 °С

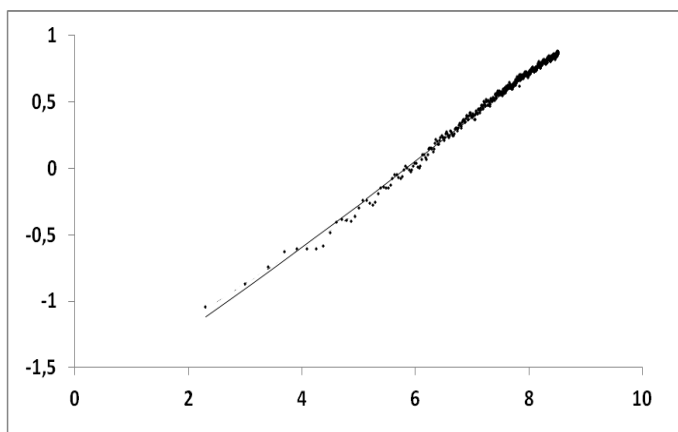


Рис. 2. Релаксация вязкости при скачке 1000 → 1 с⁻¹.
Ось ординат – $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$, ось абсцисс – $\text{Ln } t$. Наклон прямой $m(D+1) = 0,3294$; $\eta = 0,17(1 + 0,147t^{0,3294})$ в интервале 10–5000 с; температура образца 10 °С

Зависимость $\eta(t) = 0,17(1 + 0,144 t^{-0,24})$ при скачке скорости сдвига 0→1000 с⁻¹ для интервала времени (t) 1 с ≤ t ≤ 150 с хорошо описывает снижение вязкости во времени, хотя этот процесс отражает не рост ФА от времени в результате формирования из

коллоидных частиц, а разрушение ФА. К примеру, характерное время достижения уровня 0,9 от предельного значения $\eta_{\infty} = 0,17 \text{ Па}\cdot\text{с}$ достигается в этом случае за $\approx 100 \text{ с}$.

При переходе от 1000 с^{-1} к 1 с^{-1} характерное время достижения 0,9 предельного значения составило $\approx 1000 \text{ с}$, зависимость $\eta(t)$ в интервале 10–5000 с имеет вид функции $\eta(t)=0,17(1+0,147t^{0,3294})$, вязкость в этом случае формально стремится к бесконечности. Однако, как уже отмечено выше, при достаточно больших временах, при достижении больших размеров ФА начинается процесс седиментации, приводящей к расслоению раствора на жидкость и твердую часть, поэтому полученная для ранних стадий роста ФА зависимость вязкости от времени становится неприменимой. Как видно из рис. 2, на начальном участке зависимости вязкости от времени при скачке вязкости $1000 \text{ с}^{-1} \rightarrow 1 \text{ с}^{-1}$ заметны осцилляции, характерные для роста ФА из отдельных коллоидных частиц [7], что подтверждает фрактальную теорию вязкости, предложенную в [4].

Как видно из полученных данных, скачок G хотя и приводит к значительному снижению вязкости на некоторое время, но сопровождается длительным ростом вязкости в условиях действия скорости сдвига малой величины. Такой режим обработки является перспективным в случае коротких интервалов времени между обработкой и вовлечением раствора в технологический процесс, однако, в этом случае не образуются плотные ФА, о чем свидетельствовал продолжающийся и после 5000 с рост вязкости в течение 300 мин.

В результате проведения экспериментов по исследованию релаксации вязкости в режимах $1 \rightarrow 10 \text{ с}^{-1}$ и $100 \rightarrow 1000 \text{ с}^{-1}$ были оценены характерные времена релаксации. С учетом их были проведены эксперименты по постепенному увеличению, а затем снижению скорости сдвига с целью достижения устойчивого снижения вязкости. Один из них приведен ниже.

Для сокращения времени обработки сдвигом и получения плотных ФА был осуществлен модельный эксперимент, который позволил за общее время, порядка 80 мин, снизить первоначальную вязкость при $G=0,1 \text{ с}^{-1}$ примерно в 20 раз и достичь устойчивого во времени значения вязкости образца нефти. Эксперимент базировался на ранее полученных данных о росте размерности массы d под длительным воздействием больших значений скорости сдвига [8] и больших значений скорости роста ФА [13]. Для получения плотных ФА необходимо осуществлять рост ФА в условиях, когда скорость роста массы M максимальна, очередное изменение ΔG при снижении скорости сдвига от максимальной величины происходит, когда достигнуто равновесие при предыдущем значении G .

Для реализации такой обработки образец мазута подвергался воздействию растущей, а затем снижающейся скорости сдвига в условиях, близких к равновесным, т. е. когда величина вязкости достигала своего предельного значения для данной скорости сдвига G . Критерием близости к равновесным измерениям служило наличие линейной зависимости $\ln(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\ln G$ (6) в значительных интервалах G .

Поскольку релаксация вязкости происходит по степенным законам за рабочее время невозможно достичь идеального равновесия в коллоидной системе при данном значении G . Аналогичная ситуация имеет место при осуществлении цикла Карно, который требует бесконечного времени при теплопередаче к рабочему телу в условиях, когда температуры рабочего тела и нагревателя (холодильника) должны быть равны. В силу вышесказанного для осуществления снижения вязкости неньютоновской жидкости с использованием критерия выбора режима являются технически возможные условия сдвигового воздействия, учитывая их следует выбирать тактику изменения скорости сдвига во времени. Поэтому в данных экспериментах время, через которое производилось новое измерение, менялось в пределах 600 с – 50 с в соответствии с диапазоном G , шаг ΔG при измерениях вязкости возрастал и уменьшался от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до 200 с^{-1} (рис. 3, 4).

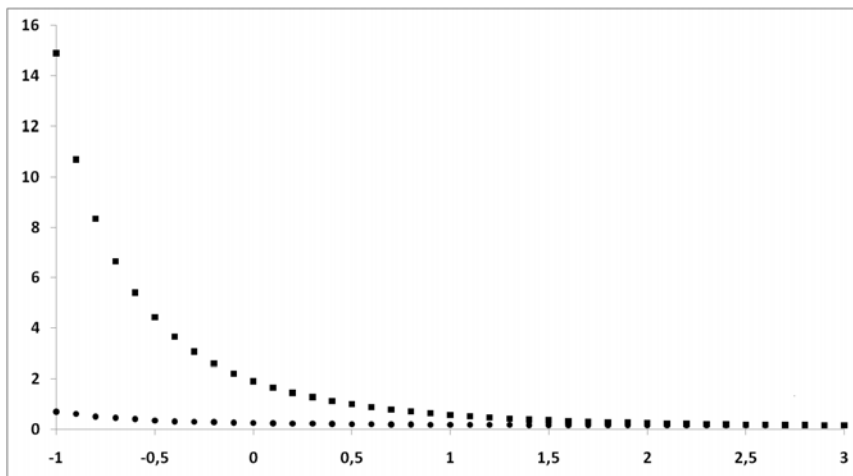


Рис. 3. Зависимости вязкости η (ось ординат, Па·с) от скорости сдвига $\ln G$ (ось абсцисс), полученные при росте G (■) и при уменьшении G (•)

На рис. 3 показан пример такого воздействия. При переходе от скорости сдвига $0,1 \text{ с}^{-1}$ к 1000 с^{-1} время изменений составило 2700 с, и от 1000 с^{-1} к $0,1 \text{ с}^{-1}$ – 2700 с. При снижении G от 1000 с^{-1} до 6 с^{-1} коэффициент $\alpha = 0,047$, что означает $p \leq 0,016$. И, как следует из (3), ФА имеет в этом случае плотную структуру, форму близкую к сферической, поэтому радиус слабо зависит от скорости сдвига. В диапазоне $6 \text{ с}^{-1} - 1,3 \text{ с}^{-1}$

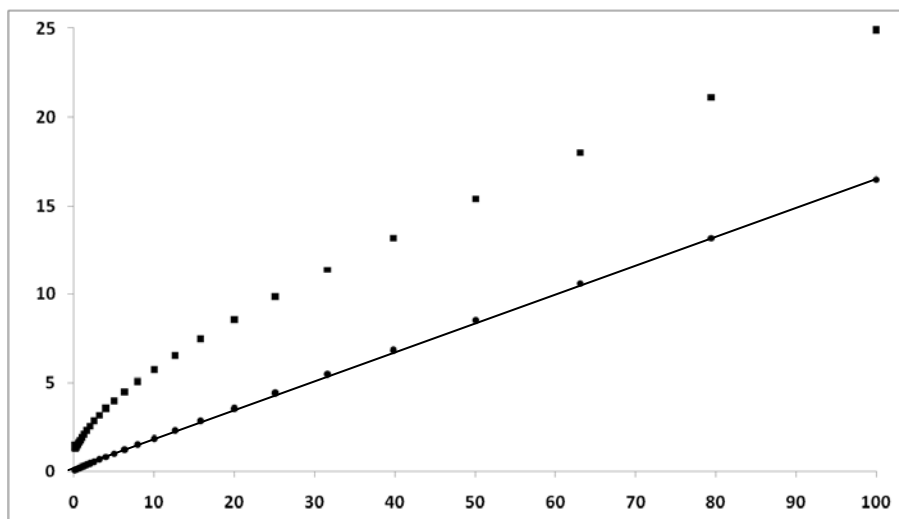


Рис. 4. Зависимости напряжения сдвига $\tau = \eta G$ (ось ординат – Па) от скорости сдвига G (ось абсцисс – с^{-1}), полученные при росте G (■) и при уменьшении G (●)

α возросла до 0,1519, и $\alpha = 0,611$ в диапазоне $0,3 \text{ с}^{-1} - 0,1 \text{ с}^{-1}$. При этом вязкость выросла с 0,2 Па·с (при 1000 с^{-1}) до 0,36 Па·с (при 1 с^{-1}) и составила 0,66 Па·с (при $0,1 \text{ с}^{-1}$). Достигнутая в результате обработки сдвигом вязкость 0,66 Па·с при $G = 0,1 \text{ с}^{-1}$ более, чем в 20 раз (15 Па·с) меньше исходной вязкости мазута, что позволяет, например, более, чем в 20 раз увеличить производительность трубопровода или время слива мазута из цистерны.

Возрастание наклона зависимости $\ln(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\ln G$ от 0,047 до 0,66 говорит о том, что в этой области рост размеров ФА происходил в режиме неплотной упаковки. Это, по-видимому, связано с уменьшением концентрации коллоидных частиц, что сопровождается снижением скорости роста и, как следствие, уменьшением плотности поверхностного слоя ФА. Для достижения бóльшего эффекта снижения вязкости в области малых значений G время обработки скоростью сдвига следует увеличить, что в условиях применения стандартного оборудования представляет определенные трудности.

Вязкость после обработки уменьшилась примерно в 20 раз для скорости сдвига $G = 0,1 \text{ с}^{-1}$. Величина относительного снижения напряжения сдвига (см. рис. 4) увеличивается с 70% при $G = 100 \text{ с}^{-1}$ до 300% и выше в диапазоне $G \leq 10 \text{ с}^{-1}$. В наиболее важном диапазоне скоростей сдвига обработанный коллоидный раствор оказывает многократно меньшее гидродинамическое сопротивление, чем необработанный. Это и является основной причиной роста дебита нефти при обработке коллоидного раствора колебаниями давления. Вязкость воды, которая является ньютоновской жидкостью, не меняется, поэтому снижается относительная доля воды в продукции скважины.

Более быстрые циклы роста – снижения скорости сдвига, чем в приведенном примере, приводили к тому, что различия в вязкости значительно уменьшались, причем, чем меньше было время цикла, тем меньшие наблюдались различия.

Измерения на приборе «Physica MCR 301» проводил И.А. Клепиков.

Выводы. Полученные результаты показывают возможность создания процедуры воздействия на коллоидный раствор скоростью сдвига, приводящей к значительному устойчивому снижению вязкости нефти, что позволяет избежать процедуры нагрева. Фрактальная теория создает научную основу технологий снижения вязкости нефти путем воздействия скоростью сдвига и колебаниями давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Урьев Н.Б.* Физико-химическая динамика дисперсных систем // *Успехи химии*, 2004, Т. 73, № 1. С. 39– 62.
2. *Roldugin V.I.* The characteristics of fractal disperse system // *Russ. Chem. Rev.* 2003. Vol. 72, No. 11. P. 913– 937.
3. *Onuma K., Kanzaki N.* Multi-angle static and dynamic light scattering investigation of lysozyme association: From crystallization to liquid–liquid phase separation // *Journal of Crystal Growth*. 2007. Vol. 304. P. 452–459.
4. *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: Physicochem. Eng. Aspects*. 2011. Vol. 392. P. 88–94.
5. *Лесин В.И., Лесин С.В.* Фрактальная» теория вязкости для скоростей сдвига близких к нулю // *Электрон. журн. «Георесурсы, геознергетика, геополитика»*. 2012. Вып. 1(5). 9 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru>
6. *Лесин В.И.* Фрактальная формула зависимости вязкости неньютоновской жидкости от градиента скорости // *Электрон. журн. «Георесурсы, геознергетика, геополитика»*. 2011. Вып. 1(3). 5 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru>
7. *Жюльен Р.* Фрактальные агрегаты // *Успехи физических наук*. 1989. Т. 157, № 2. С. 339–357.
8. *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. P. 399–413.

9. *Provata A., Falaras P., Hagas A.* Fractal features of titanium oxide surfaces // *Chemical Physics Letters*. 1998. Vol. 297, № 5–6. P. 484–490.
10. *Eggersdorfer M.L., Kadau D., Herrmann H.J., Pratinis S.E.* Fragmentation and restructuring of soft-agglomerates under shear // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2010. Vol. 342. P. 261–268.
11. *Михайлов Е.Ф., Власенко С.С.* Образование фрактальных структур в газовой фазе // *Успехи физических наук*. 1995. Т. 165, № 3. С. 263–283.
12. *Городецкий Е.Е., Курьяков В.Н., Юдин И.К., Дешабо В.А., Косов В.И., Юдин Д.И.* Исследование устойчивости и кинетики агрегации тяжелых фракций в модельных системах и природных нефтях // *Электрон. журн. «Георесурсы, геоэнергетика, геополитика»*. 2012. Вып. 2(6). 19 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru>
13. *Huang A.Y., Berg J.C.* Aggregate restructuring by polymer solvency effects // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279. P. 440–446.

REFERENCES

1. *Ur'ev N.B.* Fiziko-khimicheskaya dinamika dispersnykh sistem // *Uspekhi khimii*, 2004, Т. 73, № 1. С. 39– 62.
2. *Roldugin V.I.* The characteristics of fractal disperse system // *Russ. Chem. Rev.* 2003. Vol. 72, No. 11. P. 913– 937.
3. *Onuma K., Kanzaki N.* Multi-angle static and dynamic light scattering investigation of lysozyme association: From crystallization to liquid–liquid phase separation // *Journal of Crystal Growth*. 2007. Vol. 304. P. 452–459.
4. *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: Physicochem. Eng. Aspects*. 2011. Vol. 392. P. 88–94.
5. *Lesin V.I., Lesin S.V.* Fraktal'naya teoriya vyazkosti dlya skorostey sdviga blizkikh k nulyu // *Elektron. zhurn. «Georesursy, geoenergetika, geopolitika»*. 2012. Vyp. 1(5). 9 s. – Rezhim dostupa: <http://oilgasjournal.ru>
6. *Lesin V.I.* Fraktal'naya formula zavisimosti vyazkosti nen'yutonovskoy zhidkosti ot gradienta skorosti // *Elektron. zhurn. «Georesursy, geoenergetika, geopolitika»*. 2011. Vyp. 1(3). 5 s. – Rezhim dostupa: <http://oilgasjournal.ru>

7. *Zhyul'en R.* Fraktal'nye agregaty // *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 1989. T. 157, № 2. S. 339–357.
8. *Sonntag R.C., Russel W.B.* Structure and breakup of Floes Subjected to Fluid Stresses.1. Shear stress // *Journal of Colloid and Interface Science.* 1986. Vol. 113. P. 399–413.
9. *Provata A., Falaras P., Hagas A.* Fractal features of titanium oxide surfaces // *Chemical Physics Letters.* 1998. Vol. 297, № 5–6. P. 484–490.
10. *Eggersdorfer M.L., Kadau D., Herrmann H.J., Pratinis S.E.* Fragmentation and restructuring of soft-agglomerates under shear // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2010. Vol. 342. P. 261–268.
11. *Mikhaylov E.F., Vlasenko S.S.* Obrazovanie fraktal'nykh struktur v gazovoy faze // *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 1995. T. 165, № 3. S. 263–283.
12. *Gorodetskiy E.E., Kur'yakov V.N., Yudin I.K., Deshabo V.A., Kosov V.I., Yudin D.I.* Issledovanie ustoychivosti i kinetiki agregatsii tyazhelykh fraktsiy v model'nykh sistemakh i prirodnykh neftiyakh // *Elektron. zhurn. «Georesursy, geoenergetika, geopolitika».* 2012. Vyp. 2(6). 19 s. – Rezhim dostupa: <http://oilgasjournal.ru>
13. *Huang A.Y., Berg J.C.* Aggregate restructuring by polymer solvency effects // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2004. Vol. 279. P. 440–446.