

Фрактальная теория вязкости неньютоновской нефти, основанная на учете взаимодействия коллоидных частиц: обзор и новые результаты

В.И. Лесин

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва
E-mail: vilesin@inbox.ru

Аннотация. Для описания вязкости нефти автором была предложена теория, основанная на новой физической модели, которая заключается в учете взаимодействия отдельных коллоидных частиц и их агрегатов фрактальной структуры. Этот процесс сопровождается присоединением к агрегатам отдельных частиц и их отрывом под действием напряжения сдвига, что отражается на затратах энергии движения флюида и проявляется как зависимость вязкости от скорости сдвига.

Цель обзора состоит в демонстрации применения фрактальной теории вязкости для интерпретации результатов известных экспериментальных исследований. Обзор также содержит результаты новых экспериментальных исследований модельного образца нефти для иллюстрации ряда утверждений теории. Указаны детальные параметры физической модели, на основе которой предложена фрактальная теория вязкости, получена система двух уравнений, позволяющая описывать зависимости вязкости от скорости сдвига и времени.

Продемонстрировано соответствие вытекающих из теории выводов известным и вновь полученным экспериментальным данным. Подтверждены экспериментально предсказанные теорией закономерности релаксации вязкости при росте и снижении скорости сдвига. Предложена методология, основанная на законах термодинамики и позволяющая выбирать режим воздействия скоростью сдвига на тяжелую нефть для снижения ее вязкости.

Ключевые слова: нефть, вязкость, фрактальная теория, физическая модель, зависимость вязкости от скорости сдвига, зависимость вязкости от времени.

Для цитирования: Лесин В.И. Фрактальная теория вязкости неньютоновской нефти, основанная на учете взаимодействия коллоидных частиц: обзор и новые результаты // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 1(32). С. 26–46. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-32.art3>

Введение

Создание теории и математической модели вязкости тяжелой нефти является актуальной задачей для нефтяной промышленности. Феноменологические теории, основанные на математической обработке экспериментальных данных, не опираются на физические свойства структур нефти и не описывают многие особенности изменений вязкости при воздействии скорости сдвига и электромагнитных полей.

Увеличение в структуре добычи и транспортировке доли тяжелой нефти, обладающей высокой вязкостью, требует разработки эффективных методов воздействия на вязкость. Создание таких методов, в свою очередь, вызывает необходимость создания физических моделей, которые адекватно описывают имеющиеся экспериментальные данные, на основе которых можно предсказывать результаты применения новых технологий снижения вязкости.

В обзоре 2016 г. [1] отмечено, что неньютоновские свойства появляются, когда в составе нефти имеются асфальтены, текущая вязкость определяется структурами частиц нефти и при заданной температуре зависит от истории физических воздействий, в частности, скорости охлаждения. Для описания зависимости вязкости от скорости сдвига авторы предлагают феноменологические уравнения, основанные на описании экспериментальных зависимостей. В более поздней работе [2] авторы вводят сферические коллективные структуры нефти с целью описания аномальных экспериментальных зависимостей напряжения сдвига от скорости сдвига, используя предложенные ранее феноменологические уравнения, предсказывают экспоненциальную зависимость радиуса от времени роста таких агрегатов, размер агрегатов принимается равным порядка 8 нм. Публикации [1, 2] демонстрируют типичный подход к описанию вязкости, в котором отсутствует прямая связь между физическими свойствами компонентов нефти и их влиянием на затраты энергии, требуемой для движения флюида, т.е. на преодоление сил внутреннего трения, вызванных вязкостью.

В работе [3] был использован новый подход к созданию физической модели вязкости, основанный на разделении состава нефти на жидкую фазу, обладающую ньютоновскими свойствами и содержащую одиночные и мелкие коллоидные частицы, и твердую фазу, представляющую агрегаты коллоидных частиц нефти. Неньютоновские свойства, т.е. зависимость вязкости от скорости сдвига, согласно модели, вызывались процессами присоединения отдельных коллоидных частиц к

фрактальным агрегатам (ФА) и отрывом частиц (разрушением агрегата) под действием напряжения сдвига. В работе [3] получена формула, описывающая зависимость вязкости от скорости сдвига, дано объяснение уменьшению вязкости после обработки магнитным полем образца нефти, содержащего наноразмерные магнитные частицы оксидов железа. Рассеяние гидродинамической энергии, сопровождающее массообмен, выражалось в росте вязкости η из-за увеличения затрат гидродинамической энергии на движение фрактального агрегата и обеспечивалось работой сил вязкого трения на вращение ФА в поле градиента скорости течения V :

$$dV/dx = G ,$$

где G – скорость сдвига.

Теория основывалась на присутствии в нефти фрактальных агрегатов, изображения и размеры которых были получены в работе [3].

Присутствие ФА в нефти и зависимость размеров агрегата от скорости сдвига неоднократно подтверждались в ряде работ [4–6], что дало обоснование развитию модели и позволило предложить впоследствии более полную, чем в работе [3], фрактальную теорию вязкости, краткое изложение которой приводится в работе [7].

Из предложенной в работе [3] теории следует, что обработка магнитным полем нефти сопровождается как снижением скорости отложений асфальтенов, смол и парафинов, так и снижением вязкости [8], что экспериментально подтверждается, например, в работе [9].

Цель работы – обзор применения фрактальной теории вязкости для интерпретации результатов известных и новых экспериментальных исследований модельного образца нефти для иллюстрации ряда утверждений теории и анализ соответствия фрактальной теории известным по публикациям экспериментальным данным.

Модельный образец нефти был выбран для демонстрации вытекающих из теории экспериментальных результатов, в частности, для обоснования режимов воздействия на него скоростью сдвига с целью снижения вязкости нефти. Выбор режима был обоснован применением общего закона термодинамики – уменьшения свободной энергии тела при постоянной температуре.

Фрактальная теория вязкости нефти

В работе [3] была предложена формула, связывающая вязкость η со средним инерциальным радиусом фрактального агрегата

$$R = (R/a),$$

где R – радиус инерции, a – радиус коллоидной частицы, и концентрацией фрактального агрегата N (см^{-3}) соотношением:

$$\eta = \eta_{\infty}(1 + Ka^3NR^{\lambda}), \quad (1)$$

где η_{∞} – вязкость ньютоновской вмещающей жидкости, содержащей отдельные коллоидные частицы, которые не взаимодействуют между собой и не разрушаются под действием скорости сдвига G ; параметр $\lambda \geq 0$; здесь и в дальнейшем K – постоянная, зависящая от параметров взаимодействия ФА с коллоидными одиночными частицами дисперсии.

Формула (2) была получена путем вычисления мощности работы сил вязкого

трения вмещающей жидкости, необходимой для движения (вращения) фрактального агрегата и процесса динамического обмена – присоединения к ФА и отрыва коллоидных частиц нефти от ФА.

Как видно из (1), при $\lambda = 0$, или $R = 1$ вязкость зависит от объема коллоидных частиц в соответствии с уравнением Эйнштейна.

При исследованиях воздействия скорости сдвига на размеры ФА было экспериментально установлено [10] и подтверждено для нефти [4–6], что зависимость стационарного значения R от G имеет вид:

$$R \sim (G_0/G)^h.$$

Здесь G_0 и $h > 0$ – параметры, зависящие от структуры ФА.

Величина G_0 пропорциональна площади контактов коллоидной частицы с соседними частицами в ФА, при малой величине G_0 $h \rightarrow 0$, а при G , близких к нулю, $\eta \rightarrow \text{const}$.

С учетом зависимости $R(G)$ в работе [7] получено уравнение для $\eta(G)$:

$$\eta = \eta_{\infty}(1 + K_1a^3N(G_0/G)^{\lambda h}), \quad (2)$$

Аналогичная по виду формула была предложена в [11] для описания экспериментальных зависимостей вязкости углеводородной смазки от скорости сдвига. Формула (2) описывает закон вязкости Оствальда для случая

$$K_1a^3N(G_0/G)^{\lambda h} \gg 1.$$

Формула (2) первоначально была предложена для описания стационарного значения вязкости, поэтому для получения экспериментальной зависимости $\eta(G)$ требовалось измерять значение вязкости при изменении G через некоторое время, когда величина $\eta(G)$ достигнет стационарного значения.

Для учета динамики изменений ФА под действием сил вязкого трения уравнения (1) и (2) были дополнены уравнением зависимости радиуса фрактального агрегата от времени t при воздействии скорости сдвига [7]:

$$dR^D/dt = K_1 R n - K_2 G R^p - K_3 R^d, \quad (3)$$

где D – фрактальная размерность массы ($1 \leq D \leq 3$),

n – концентрация коллоидных частиц,

p и d – постоянные, зависящие от структуры ФА.

Константы K_1 , K_2 , K_3 – зависят сложным образом от D , G , t и расстояния от центра инерции r , но сохраняют свои значения в достаточно больших диапазонах G и, соответственно, r .

Здесь

$K_1 R n$ – скорость присоединения отдельных коллоидных частиц с концентрацией n к ФА,

$K_2 G R^p$ – скорость отрыва частиц от ФА под действием сил вязкости,

$K_3 R^d$ – скорость отрыва частиц от ФА за счет теплового движения.

K_1 зависит от частоты столкновений, контролируемых диффузией, между фрактальным агрегатом и коллоидными частицами, а также от вероятности присоединения к ФА.

Уравнение (3) было получено с использованием уравнений, предложенных в работах [10, 12–14] для описания изменений массы фрактального агрегата

$$M = m(R/a)^D,$$

где m – масса коллоидной частицы.

Физическая модель фрактальной теории вязкости основывается на следующих утверждениях:

1) Ньютоновская вмещающая жидкость – нефть, содержащая отдельные коллоидные

частицы, за счет расходования своей гидродинамической энергии перемещает фрактальный агрегат, обеспечивая вращение частиц с частотой G вокруг центров инерции. Как следствие такого вращения, составляющая вектора скорости вращения в направлении течения вмещающей жидкости для каждой точки на поверхности фрактального агрегата равна вектору скорости вмещающей жидкости. При соблюдении этого условия частота столкновения ФА с коллоидными частицами будет определяться скоростью диффузии и радиусами сталкивающихся объектов.

2) Вектор сил напряжения сдвига τ перпендикулярен радиус-вектору r , направленному из центра инерции к поверхности ФА [10, 14], т.е. скалярное произведение

$$\tau \cdot r = 0.$$

Силы сдвига, действующие на поверхность фрактального агрегата S , которая вращается со скоростью $\sim GR$, совершают работу с мощностью $\sim \tau S G R$ [3]. Работа сил τ расходуется не только на перемещение фрактального агрегата, но и на потери, вызванные ростом кинетической энергии частиц при присоединении к ФА до величины, которая равна потере кинетической энергии

$$\sim m(GR)^2/2,$$

при отрыве частицы от ФА и последующем торможении в жидкости.

3) Концентрация $N = \text{const}$ в ходе роста/разрушения фрактального агрегата под действием напряжения сдвига [15]. Величина N равна концентрации примесей минеральных частиц, в том числе отдельных магнитных частиц оксидов железа, их кластеров и фрактальных агрегатов.

4) Под действием напряжения сдвига величина R изменяется во времени t , при этом частота вращения G остается постоянной.

5) При изменении G уравнение (2) справедливо и для $R(t)$.

6) Соотношение концентраций [15]: $N/n \ll 1$.

7) Центральная часть фрактального агрегата обладает высокой плотностью и прочностью, под действием высоких скоростей сдвига разрушение ФА прекращается при достижении некоторого предельного радиуса R .

Особенности строения и основные физические характеристики фрактального агрегата представлены в обзоре [16]. Наиболее важные для теории характеристики приведены ниже.

Плотность ρ распределения коллоидных частиц в ФА зависит от расстояния от центра масс r и параметра β :

$$\rho \sim r^{-\beta}.$$

В работе [16] указано, что для фрактального агрегата больших размеров параметр β может зависеть от r .

В этом случае размерность массы

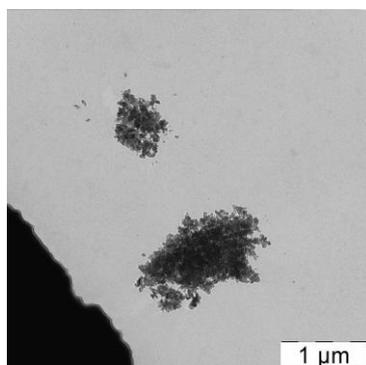
$$D_i = \text{const}$$

для интервалов $r_{i-1} \leq r_i \leq r_{i+1}$.

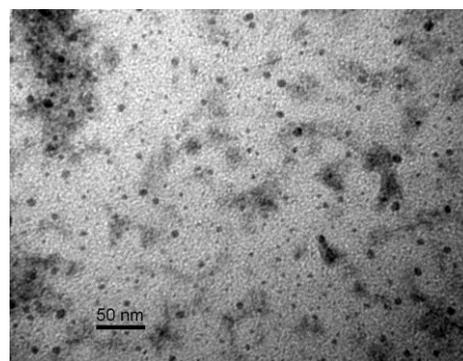
Фрактальные агрегаты обладают пористой структурой, находятся в динамическом равновесии с отдельными коллоидными частицами и их кластерами, инерциальный радиус R и размерность фрактального агрегата D зависят как от скорости сдвига, так и от времени воздействия температуры и механических возмущений – истории предыдущих воздействий [1–5]. Типичные размеры ФА находятся в диапазоне от 1 мкм до 500 мкм [3–5].

На рис. 1 представлены изображения агрегатов коллоидных частиц нефти и отдельных частиц нефти. Для их получения использовались методы просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп LEO 912 AB Omega).

Рис. 1, где показаны участки поверхности подложки, на которую нанесены капли нефти, иллюстрирует справедливость приведенных выше утверждений 6 и 7.



a



b

Рис. 1. Полученные методом просвечивающей электронной микроскопии изображение фрактальных агрегатов коллоидных частиц нефти (**a**) и изображение отдельных частиц нефти (**b**), масштабы указаны на рисунках

На рис. 1а видны два фрактальных агрегата размером порядка 1 мкм. На рис. 1б – многочисленные коллоидные частицы нефти и, возможно, частицы горной породы (темные округлые пятна размером ≈ 5 нм). Число частиц n на меньшей площади значительно выше количества N фрактального агрегата (см. рис. 1а). Поскольку изображения были получены в условиях глубокого вакуума, на них отсутствуют следы летучих фракций нефти с упругостью паров более 10^{-4} мм рт. ст. при комнатной температуре.

Часть фрактального агрегата, находящаяся вблизи центра инерции, имеет более высокую плотность, чем периферическая, что обусловлено особенностями динамики роста агрегата [16]. Поскольку параметры дисперсионной части нефти, к которой относятся ФА, зависят от «истории», величина вязкости неоднозначно зависит от температуры и скорости сдвига. Размерность массы D , например, возрастает при длительном воздействии скорости сдвига, при росте температуры, при отсутствии движения раствора [17, 18]. Как следствие, физико-химические характеристики нефти не являются однозначной функцией температуры и величины скорости сдвига [1].

Сформированные в определенных условиях пористые фрактальные агрегаты с размерностью массы $D < 3$ обладают более высокой площадью контакта с вмещающей жидкостью, более высокой свободной энергией – \mathcal{F} , чем сферические плотные агрегаты. Согласно основному закону термодинамики система стремится занять положение, соответствующее минимуму свободной энергии. Минимуму \mathcal{F} , т.е. минимуму площади поверхности при заданном объеме, соответствует перестройка

пористых ФА в плотные, сферической формы (размерностью $D = 3$), с их последующим объединением и седиментацией. Особенностью фрактального агрегата, как следует из названия, является повторение исходной структуры – размерности массы D – в ходе увеличения/разрушения ФА (изменения R). D зависит от условий роста: скорости изменения температуры, скорости сдвига, электромагнитного поля, примесей химических реагентов. В ходе регистрации зависимости $\eta(G)$ проявляется слоистая структура, отражающая зависимость $D(r)$, сформированную к моменту начала измерений. Поскольку фрактальное строение предполагает воспроизведение структуры агрегата при росте для получения сферических плотных ФА, необходимо обеспечить рост на центре кристаллизации с $D = 3$ в условиях, когда частицы будут закрепляться на поверхности только при плотной упаковке.

Сравнение теоретических предсказаний с экспериментальными результатами

С целью иллюстрации соответствия теории экспериментальным данным ряд новых исследований был проведен на образце тяжелой нефти. В статье также использованы ранее опубликованные экспериментальные результаты.

Реометр «Physica MCR 301» фирмы «Anton Paar» (Австрия) с измерительной ячейкой в геометрии конус-плита был использован для измерения вязкости нефти. Измерения производились при атмосферном давлении в диапазоне температур выпадения твердой фазы, диапазон определялся методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

Температура начала выпадения твердой фазы из модельного образца нефти, определенная методом дифференциальной сканирующей калориметрии, составила ≈ 40 °С, плотность при комнатной температуре – $0,96$ г/см³, содержание нерастворимых в гептане фракций, включающих асфальтены и смолы, – 27%. Вязкость нефти исследовалась в диапазоне температур от 5 до 40 °С, т.е. в области возникновения коллоидных частиц (см. рис. 1).

В составе нефти могут находиться примеси частиц оксидов металлов, которые согласно теории представляют центры адсорбции асфальтенов, являющихся ядрами коллоидных частиц-мицелл нефти.

На рис. 2 приведены результаты исследований методом порошковой

дифракции исследуемого образца нефти. Наличие размытых колец демонстрирует присутствие кристаллических частиц малых размеров, представляющих, вероятно, частицы оксидов металлов.

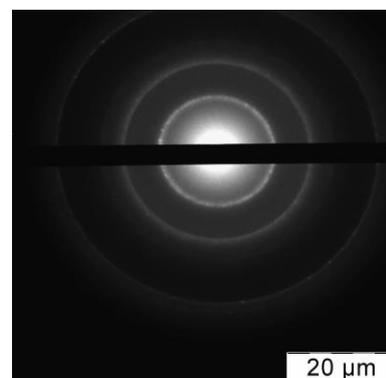


Рис. 2. Электронная дифрактограмма от локальной области образца нефти, содержащей кристаллические частицы

Рассмотрим ряд частных решений уравнений (1)–(3).

I. В состоянии равновесия

$$(dR/dt) = 0 ;$$

при

$$K_3 R^d \ll K_1 R n$$

и

$$K_3 R^d \ll K_2 G R^p$$

решение уравнения (4) имеет вид:

$$K_1 R n = K_2 G R^p .$$

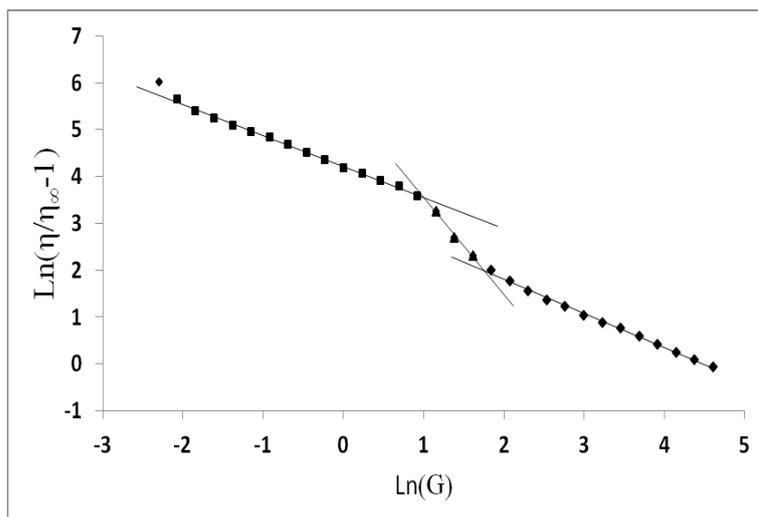
Откуда получаем уравнение:

$$R = (K_{1n}/K_2)^{1/(p-1)} (1/G)^{1/(p-1)}$$

$$\text{и } \text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1) = (\lambda/(p-1)) \text{Ln}(K_{1n}/K_2) - (\lambda/(p-1)) \text{Ln}(G). \quad (5)$$

Экспериментально полученные зависимости $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\text{Ln}(G)$ представляют ломаные линии, состоящие из прямых отрезков, соответствующих

достаточно большим интервалам значений G . На рис. 3 приведен пример зависимости (5) для параметров исследуемого образца нефти.



_____ – линейные участки, на основании параметров которых определялись η_∞ , B , $\lambda/(p-1)$

Рис. 3. Зависимость $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty-1)$ от $\text{Ln}(G)$, полученная для образца нефти при температуре 10 °С

Зависимость $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty-1)$ от $\text{Ln}(G)$ (см. рис. 3) отражает изменение фрактальной размерности массы D в ходе уменьшения радиуса R при разрушении фрактального агрегата под действием скорости сдвига G . Такой вид зависимости показывает, что рост фрактального агрегата происходил в условиях, когда плотность менялась скачкообразно в ходе увеличения массы ФА.

Зависимость $\eta(G)$ для случая, приведенного на рис. 3, описывается функцией:

$$\eta(G) = 0,4(1+B_i G^{-(\lambda/(p-1))_i}),$$

где $\eta_\infty = 0,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$,

B_i – константа для определенного диапазона скорости сдвига G ,

параметры линейных участков:

$$(\lambda/(p-1))_1 = 0,65(0,12 \text{ с}^{-1} \leq G \leq 2,5 \text{ с}^{-1}),$$

$$(\lambda/(p-1))_2 = 1,85(2,5 \text{ с}^{-1} \leq G \leq 5,3 \text{ с}^{-1}),$$

$$(\lambda/(p-1))_3 = 0,95(5,3 \text{ с}^{-1} \leq G \leq 100 \text{ с}^{-1}),$$

соответственно.

Обозначим выражение $\lambda/(p-1)$ переменной α .

На отдельных участках ($G_i \leq G \leq G_{i+1}$) стационарная зависимость $\eta(G)$ описывается эмпирической формулой Sisko [11], которая была предложена для смазочных материалов на основе нефти.

На рис. 4 представлена зависимость напряжения сдвига $\tau = G\eta$ от скорости сдвига G для образца, приведенного на рис. 3.

Такую зависимость $\tau(G)$ принято называть аномальной, поскольку в области малых значений скорости сдвига G имеется участок, где одному значению напряжения сдвига τ соответствуют три значения скорости сдвига. С ростом G напряжение сдвига монотонно растет, при достижении некоторого значения G достигает значения максимума τ_{\max} , при дальнейшем росте G напряжение сдвига монотонно снижается, достигает значения минимума τ_{\min} и монотонно растет с последующим ростом G . Согласно фрактальной теории стационарное значение напряжения сдвига:

$$\tau(G) = G\eta = \eta_\infty(G+B_i G^{(1-\alpha_i)}) . \tag{6}$$

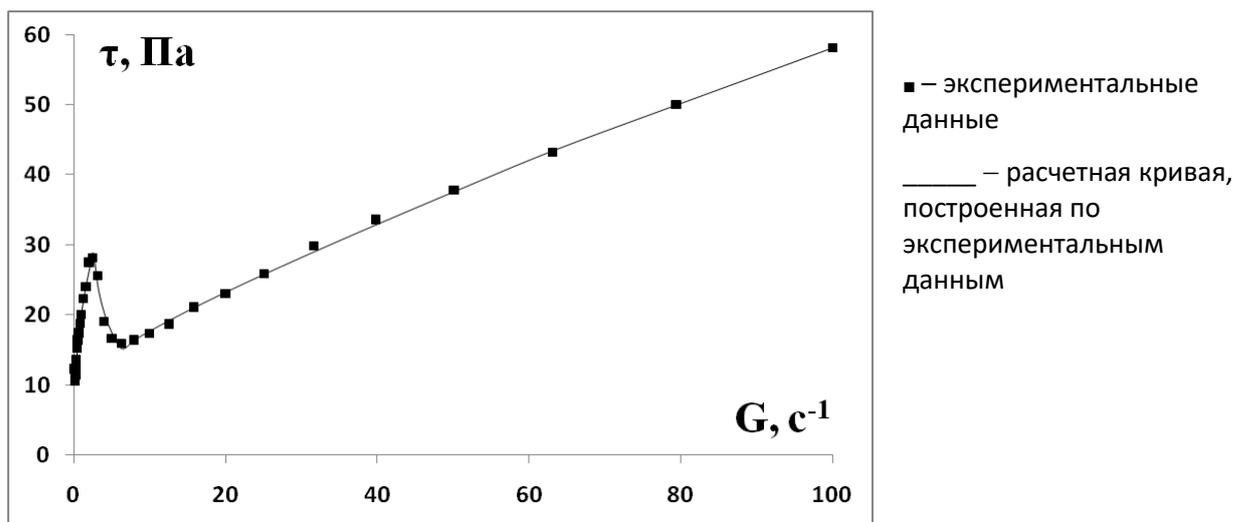


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига G , полученная для образца нефти при температуре 10 °С

Появление участка значений G , где напряжение сдвига $\tau(G)$ падает с ростом скорости сдвига, вызвано изменением разности $(1-\alpha_i)$ с положительной величины 0,33 на отрицательную $-0,85$, а затем – на величину 0,05, приближающуюся к нулю. В области

$$53 \text{ c}^{-1} \leq G \leq 100 \text{ c}^{-1}$$

величина $(1-\alpha_i) = 0,05$,

что соответствует диапазону скорости сдвига, в котором нефть становится почти ньютоновской жидкостью, вязкость которой практически не зависит от скорости сдвига.

Такая аномалия возникает, когда внешний слой фрактального агрегата обладает более высокой прочностью (плотностью), чем следующий за ним более рыхлый слой: более прочному слою соответствует α_i , близкая к нулю, менее прочному слою отвечает большая величина α_i .

II. Коллоидная система в момент времени t представляет одиночные и мелкие частицы, величинами K_2GR^p и K_3R^d можно пренебречь:

$$(K_2GR^p + K_3R^d) \ll K_1R .$$

Для регистрации вязкости выбирается достаточно малая скорость сдвига G , величину которой можно определить после предварительного получения зависимости $\eta(G)$: величина G должна находиться в диапазоне значений $\alpha_i \gg 0$. Перед началом измерений вязкости система была приведена в состояние полностью разрушенных фрактальных агрегатов путем воздействия скоростью сдвига 1000 c^{-1} в течение 500 с, после чего произведены измерения вязкости во времени при скорости сдвига 1 c^{-1} . Эта скорость сдвига соответствовала области значений $\lambda/(p-1) \gg 0$, что было предварительно установлено экспериментально.

Уравнение (4) при условии, что

$$K_2GR^p + K_3R^d \ll K_1RN ,$$

имеет вид:

$$(D/(D-1))dR^{D-1} = K_1dt .$$

Частное решение:

$$R \sim (t)^{1/(D-1)} .$$

Тогда:

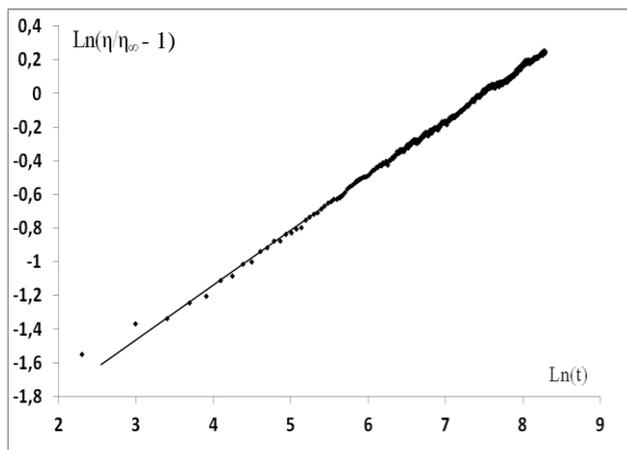
$$\ln(\eta/\eta_\infty - 1) \sim (\lambda/(D-1))\ln(t) .$$

На рис. 5 приведена зависимость $\ln(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\ln(t)$, полученная для образца нефти при температуре 10 °С. Видно

хорошее совпадение с линейной зависимостью, соответствующей формуле:

$$\eta(t) = 0,17(1+0,147t^{0,33})$$

при $\eta_\infty = 0,17$ (Па·с).



• – экспериментальные данные
 _____ – расчетная кривая, построенная по экспериментальным данным

Рис. 5. Зависимость $\ln(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\ln(t)$ для образца нефти при температуре 10 °С, характеризующая релаксацию вязкости при скачке скорости сдвига G от 1000 c^{-1} до 3 c^{-1}

III. Рассмотрим следующий предельный случай зависимости вязкости от времени, когда первоначально покоящаяся в течение длительного времени нефть приводится в движение с некоторой скоростью сдвига. Это соответствует началу движения нефти в поровом пространстве при эксплуатации месторождения и/или процедурам извлечения нефти из емкостей хранения. В начальный момент времени мы имеем агрегаты больших размеров и на образец накладывается скорость сдвига G .

Тогда при

$$K_2 G R^p \gg K_1 R^d - K_3 R$$

для (4) получаем:

$$R^{D-1} dR/dt = -K_2 G R^p .$$

При $p > D$

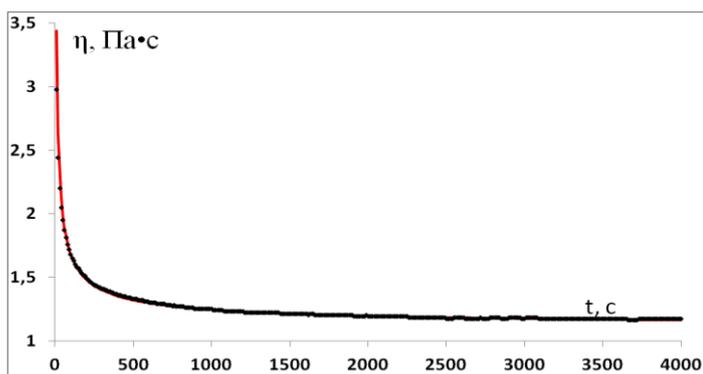
$$(D/(p-D))dR^{D-p} = K_2 G dt .$$

В результате частное решение примет вид:

$$R = (C_3 t)^{1/(D-p)} ,$$

где $C_3 = (D/(p-D))K_2 G$.

На рис. 6 приведен пример измерения зависимости вязкости от времени для случая, когда на образец нефти, длительное время находившийся в покое при температуре 10 °С, в момент времени $t = 0$ наложена скорость сдвига 3 c^{-1} .



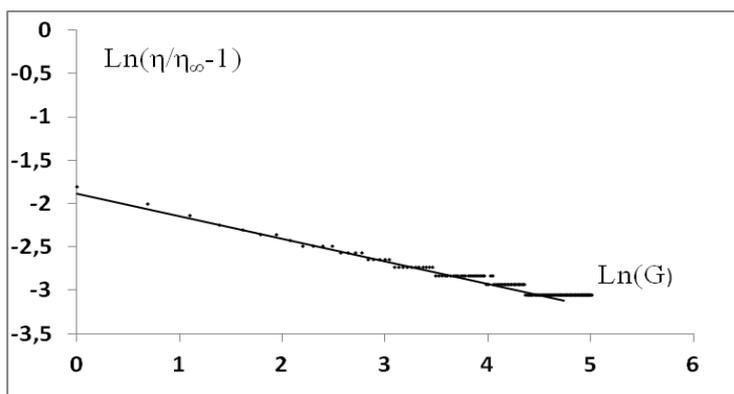
• – экспериментальные данные
 — расчетная кривая,
 построенная по
 экспериментальным данным

Рис. 6. Зависимость $\eta = 1,1(1+8,57t^{-0,61})$ для образца нефти, характеризующая релаксацию вязкости во времени $t > 1$ с после скачка скорости сдвига от 0 до 3 с^{-1}

На рис. 7 показана зависимость $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\text{Ln}(t)$ для $t > 1$ с при скачке G от 0 до 1000 с^{-1} . Зависимость имеет линейный вид, соответствующий

$$\eta(t) = 0,17(1+0,144t^{-0,24})$$

при $1/(D-p) = -0,24$, $\eta_\infty = 0,17$ (Па·с), температура образца $10 \text{ }^\circ\text{C}$.



• – экспериментальные данные
 — расчетная кривая,
 построенная по
 экспериментальным данным

Рис. 7. Зависимость $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\text{Ln}(t)$ для образца нефти, характеризующая релаксацию вязкости при скачке скорости сдвига G от 0 до 1000 с^{-1} [7]

Как видно из графиков на рис. 6 и 7, уже начиная с достаточно малых скоростей сдвига может наблюдаться ситуация, когда вязкость настолько слабо зависит от G , что данную нефть можно считать ньютоновской жидкостью, начиная с $G = 3 \text{ с}^{-1}$.

IV. Рассмотрим зависимость вязкости η от G при $G \rightarrow 0$.

Очевидно, что величина стационарного значения вязкости в рамках предложенной

модели должна стремиться к постоянной конечной величине η при $G \rightarrow 0$, поскольку

$$\tau = G\eta \rightarrow 0.$$

Это связано с тем, что силы вязкого трения уменьшаются с уменьшением G , поэтому, начиная с некоторого значения $G < G_{\min}$, сила трения, вызывающая отрыв частиц от фрактального агрегата, становится меньше сил взаимного притяжения коллоидных частиц.

Уравнение (5) приобретает вид:

$$K_1 R = K_3 R^d,$$

где $R = (K_1/K_3)^{1/(d-1)}$ не зависит от G и, как следствие, $\eta = \text{const}$.

При $G < G_{\min}$ вязкость η не будет зависеть от G , поскольку в этих условиях агрегаты можно рассматривать как твердые и недеформируемые частицы.

На рис. 8 показан пример зависимости $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\text{Ln}(t)$ для образца тяжелой нефти при температуре 40 °С.

Для этого образца, принимая $R = 10^{-4}$ см, $M = 10^{-8}$ г, получаем оценку $G_{\min} < 1,5 \text{ c}^{-1}$. Отметим, что в диапазоне малых G вязкость может возрастать с ростом G . Это связано с возможным наличием потенциального барьера взаимодействия коллоидных и фрактальных агрегатов. В этом случае при росте G происходит преодоление потенциального барьера и, следовательно, дополнительное присоединение коллоидных частиц к фрактальным агрегатам благодаря росту скорости соударения за счет вращения ΦA .

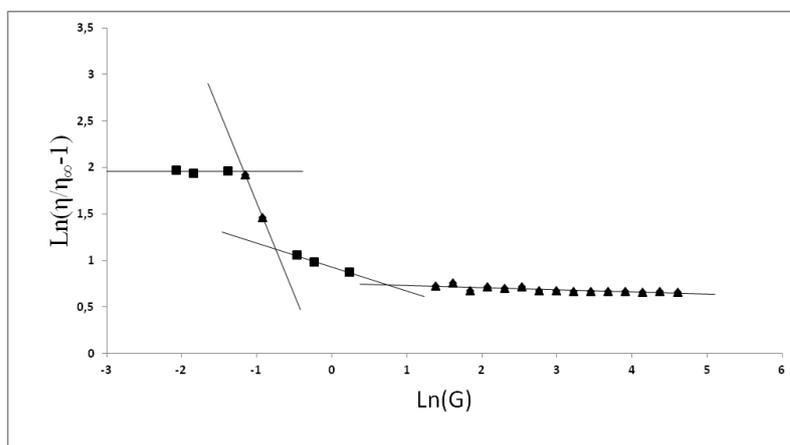


Рис. 8. Зависимость $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\text{Ln}(G)$ для образца нефти при температуре 40 °С

Зависимость вязкости $\eta(G)$, восстановленная по данным рис. 8, характеризуется параметрами:

$$\eta_\infty = 0,01 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\alpha_1 = 0,0025 \text{ для } 0,12 \text{ c}^{-1} \leq G \leq 0,32 \text{ c}^{-1}; \alpha_2 = -1,98 \text{ для } 0,32 \text{ c}^{-1} \leq G \leq 0,63 \text{ c}^{-1}; \alpha_3 = -0,26 \text{ для } 0,63 \text{ c}^{-1} \leq G \leq 1,26 \text{ c}^{-1}; \alpha_4 = -0,023 \text{ для } 1,26 \text{ c}^{-1} \leq G \leq 100 \text{ c}^{-1}.$$

Из графика на рис. 8 видно, что в диапазонах как очень малых, так и больших значений G параметр $\alpha_i \approx 0$, т.е. вязкость практически не зависит от скорости сдвига в соответствии с предложенной теорией. Отметим, что при переходе от $G = 0,32 \text{ c}^{-1}$ до $G = 1,26 \text{ c}^{-1}$

вязкость уменьшается от 0,8 Па·с до 0,03 Па·с.

Следует отметить, что измерение вязкости представляет собой процедуру определения силы τ , которая передается от вращающегося цилиндра на неподвижный цилиндр при данной скорости сдвига G .

При $G \rightarrow 0$

сила $\tau \rightarrow 0$

и для расчета

$$\eta = \tau/G$$

необходимо точно определять стационарное значение τ , когда время достижения такого значения может составлять несколько часов.

V. Спектроскопическими исследованиями было показано, что структура фрактального агрегата (размерность массы D) в ходе роста воспроизводит структуру поверхностного слоя, что выражается в степенной зависимости плотности ρ от расстояния r до центра инерции ФА. Фрактальная размерность центров роста зависит от истории воздействий, в частности, после воздействия большой скорости сдвига величина D возрастает [19].

Рост величины D соответствует уменьшению величины α_i , при $\alpha_i = 0$ вязкость раствора не зависит от скорости сдвига. Для этого, например, ФА исходной нефти необходимо за счет большой скорости сдвига раздробить на отдельные прочные кластеры, а затем снижать скорость сдвига постепенно, добиваясь равновесия перед каждым шагом снижения скорости сдвига. При медленном росте скорости сдвига G можно добиться такого разрушения фрактального агрегата, при котором в растворе будут присутствовать его плотные фрагменты, которые при медленном снижении величины G станут служить центрами роста ФА максимальной плотности с размерностью массы $D = 3$.

При большой величине G (в ходе ее снижения) новая частица будет устойчиво закрепляться только при максимальном количестве контактов с частицами на поверхности фрактального агрегата. В таком режиме воздействия скоростью сдвига G можно получить нефть, в которой агрегаты являются плотными и вязкость определяется общей долей объема коллоидных частиц. Исследования влияния величины сдвига и продолжительности сдвигового воздействия, а также температуры, проведенные в ряде работ [12, 19–21], показали, что фрактальная размерность D увеличивается с ростом величины и продолжительности действия скорости сдвига, а при $G = 0$ растет со временем.

На рис. 9 приведена зависимость $\eta(G)$, зарегистрированная в ходе эксперимента по снижению вязкости нефти. Величина η регистрировалась по достижении стационарного значения для каждого G .

Зависимость $\eta(G)$ в ходе роста и снижения G имела вид:

$$\eta(G) = \eta_{\infty}(1 + B_1 G^{-\alpha_1}),$$

где $\eta_{\infty} = 0,12$ Па·с.

В табл. 1 приведены параметры вязкости, зарегистрированные в ходе монотонного роста и снижения скорости сдвига, после того как образец подвергался обработке при $G = 1000$ с⁻¹. Полное время процедур измерения вязкости в ходе роста, а затем снижения G составило 50 мин. Зависимость вязкости нефти от времени учитывалась при снятии полной реологической кривой путем фиксации величины вязкости при достижении стационарного значения для каждой новой скорости сдвига.

Таблица 1

Параметры зависимости вязкости от скорости сдвига

Значения параметров при росте G		Значения параметров при снижении G после 500 с обработки при G = 1000 с ⁻¹	
α_i	диапазон G, с ⁻¹	α_i	диапазон G, с ⁻¹
0,9	0,1 с ⁻¹ ≤ G ≤ 0,4 с ⁻¹	0,6	0,1 с ⁻¹ ≤ G ≤ 0,3 с ⁻¹
0,18	150 с ⁻¹ ≤ G ≤ 1000 с ⁻¹	0,05	5 с ⁻¹ ≤ G ≤ 1000 с ⁻¹

Как видно из табл. 1, при снижении G значение величины α увеличилось от 0,05 до 0,6, что свидетельствует о формировании слоя частиц, слабо связанных с поверхностью фрактального агрегата. Достигнутая в результате обработки сдвигом вязкость 0,6 Па·с при G = 0,1 с⁻¹ в 25 раз меньше исходной вязкости нефти (15 Па·с).

Величине $\alpha \approx 0$ соответствует вязкость, которая практически не зависит от скорости сдвига. Этот эксперимент показывает, что при вышеописанном режиме механического воздействия можно формировать плотные фрактальные агрегаты, устойчивые к воздействию напряжения сдвига.

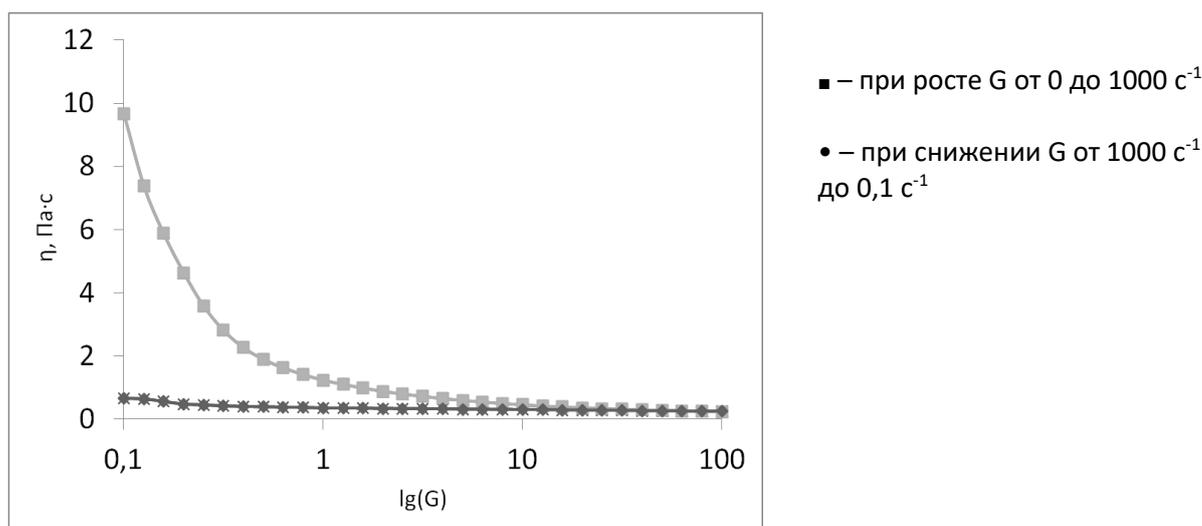


Рис. 9. Зависимость вязкости η от скорости сдвига $\lg(G)$ при температуре 10 °C

VI. Из теоретической модели следует, что при увеличении концентрации N – центров роста ФА – вязкость должна уменьшаться из-за снижения радиусов R (см. утверждение 2 к построению физической модели), поскольку Ka^3NR^λ при этом уменьшается за счет, например, разрушения агрегатов магнитных частиц оксидов железа

под действием магнитного поля агрегатов[3].

Искусственное введение малых количеств примесей оксидов железа, или других коллоидных частиц с высокой величиной адсорбции асфальтенов, также снижает вязкость неньютоновской нефти [22, 23], что подтверждает предложенную теоретическую модель.

В отличие от описанной в работе, ранее предложенные реологические модели рассматривали коллоидные растворы, в том числе нефть, как сплошную среду, не выделяя фактор обмена массой и энергией между ньютоновской жидкостью, содержащей отдельные коллоидные частицы и фрактальные агрегаты. Математическое описание реологии опиралось на эмпирически полученные формулы для описания зависимостей вязкости от скорости сдвига [24, 25].

Фрактальная теория создает научную основу применения магнитных и электрических полей [9, 26] для снижения вязкости, поскольку такие поля разрушают фрактальные агрегаты [27], содержащие электрически заряженные и магнитные частицы, и создают условия образования плотных частиц малых размеров. Разнообразие метастабильных состояний ФА объясняет зависимость физико-химических характеристик нефти от истории предыдущих воздействий [28]. Это свойство ФА, вероятно, является причиной вариации эффективности обработки акустическими полями призабойных зон скважин от 0 до 100% [29], поскольку вибрации могут вызывать и снижение [30], и рост вязкости [31], как это следует из фрактальной теории. Уменьшение размеров ФА до $(R/a) < 10$ сопровождается потерей фрактальных свойств, такие структуры по свойствам подобны отдельным коллоидным частицам [32]. В этом случае нефть становится ньютоновской жидкостью, к которой применимо уравнение Эйнштейна; уравнение

(2) совпадает для предельных случаев с широко используемыми эмпирическими формулами, что подтверждает правильность выбранной физической модели.

Заключение

В статье впервые представлена в полном объеме новая физическая модель вязкости неньютоновского коллоидного раствора, опирающаяся на физические характеристики коллоидных агрегатов (структур) фрактального строения. Основная новизна физической модели состоит в разделении флюида на вмещающую жидкость и агрегаты коллоидных частиц, которые рассеивают энергию движения жидкости за счет процессов обмена энергией с внешней средой. Основанный на физической модели математический аппарат фрактальной теории вязкости достаточно точно описывает изменения вязкости при воздействии скорости сдвига.

Впервые дано обоснование влияния истории воздействия на вязкость неньютоновской жидкости с точки зрения действия законов термодинамики.

Предложенная модель создает методическую основу применения физических воздействий и химических реагентов с целью снижения вязкости как нефти, так и технологических жидкостей.

В проведенном обзоре публикаций продемонстрировано полное соответствие основных положений фрактальной теории ранее полученным экспериментальным данным.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Исследование термодинамических свойств углеводородных смесей, моделирование гидротермодинамических, физико-химических и геомеханических процессов в геосредах с целью повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа», № АААА-А19-119030690057-5).

Литература

1. Малкин А.Я., Хаджиев С.Н. О реологии нефти (обзор) // Нефтехимия. 2016. Т. 56. № 4. С. 303–314. <https://doi.org/10.7868/S0028242116040109>
2. Келбалиев Г.И., Тагиев Д.Б., Расулов С.Р. и др. Реология структурированных нефтяных дисперсных систем // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51, № 5. С. 582–588. <https://doi.org/10.7868/s0040357117050050>
3. 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, No. 1. P. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.09.038>
4. Rahmani N.H.G., Dabros T., Masliyah J.H. Fractal structure of asphaltene aggregates // Journal of Colloid and Interface Science. 2005. Vol. 285. P. 599–608. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.11.068>
5. Rahmani N.H.G., Dabros T., Masliyah J.H. Online optical monitoring of asphaltene aggregation // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2005. Vol. 44, No. 1. P. 75–84. <https://doi.org/10.1021/ie049689x>
6. Kane M., Djabourov M., Volle J.-L. Rheology and structure of waxy crude oil in quiescent and shearing conditions // Fuel. 2004. Vol. 83, No. 11–12. P. 1591–1605. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.01.017>
7. Лесин В.И. Математическая модель вязкости тяжелой нефти, содержащей примеси коллоидных наночастиц оксидов металлов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2019. № 2. С. 199–216. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-2-199-216>
8. Лесин В.И. Физические основы обработки магнитным полем коллоидных систем, участвующих в процессах добычи, транспортировки и подготовки нефти // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 1(20). С. 25. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art25>
9. Tung N.P., Vinh, N.Q., Phong N.T.P. et al. Perspective for using Nd–Fe–B magnets as a tool for the improvement of the production and transportation of Vietnamese crude oil with high paraffin content // Physica B: Condensed Matter. 2003. Vol. 327, No. 2–4. P. 443–447. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)01788-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)01788-X)
10. Sonntag R.C., Russel W.B. Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses: I. Shear experiments // Journal of Colloid and Interface Science. 1986. Vol. 113, No. 2. P. 399–413. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(86\)90175-X](https://doi.org/10.1016/0021-9797(86)90175-X)
11. Sisko A.W. The flow of lubricating greases // Industrial and Engineering Chemistry. 1958. Vol. 50, No. 12. P. 1798–1792. <https://doi.org/10.1021/ie50588a042>
12. Huang A.Y., Berg J.C. Aggregate restructuring by polymer solvency effects // Journal of Colloid and Interface Science. 2004. Vol. 279, No. 2. P. 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.06.088>
13. Barthelmes G., Prastinis S.E., Buggisch H. Particle size distribution and viscosity of suspensions undergoing shear-induced coagulation and fragmentation // Chemical Engineering Science. 2003. Vol. 58, No. 13. P. 2893–2902. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(03\)00133-7](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(03)00133-7)

14. *Sontag R.C., Russel W.B.* Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses: II. Theory // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1987. Vol. 115, No. 2. P. 378–389. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(87\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(87)90053-1)
15. *Долгоносков Б.М.* Параметры равновесного спектра частиц в коагулирующей системе с распадом агрегатов // *Коллоидный журнал*. 2001. Т. 63, № 1. С. 39–42.
16. *Ролдугин В.И.* Свойства фрактальных дисперсных систем // *Успехи химии*. 2003. Т. 72, № 11. С. 1027–1054.
17. *Logan B.E., Kilps J.R.* Fractal dimensions of aggregates formed in different fluid mechanical environments // *Water Research*. 1995. Vol. 29, No. 2. P. 443–453. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00186-B](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00186-B)
18. *Bushella G.C., Yan Y.D., Woodfield D.* et al. On techniques for measurement of the mass fractal dimension of aggregates // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2002. Vol. 95, No 1. P. 1–50. [https://doi.org/10.1016/s0001-8686\(00\)00078-6](https://doi.org/10.1016/s0001-8686(00)00078-6)
19. *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, No. 2. P. 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.10.062>
20. *Asnaghi D., Carpinetib M., Giglio M., Sozzi M.* Coagulation kinetics band aggregate morphology bin the intermediate regimes between diffusion limited and reaction limited cluster aggregation // *Physical Review A*. 1992. Vol. 45, No. 2. P. 1018–1023. <https://doi.org/10.1103/physreva.45.1018>
21. *Nassar N.N., Betancur S., Franco C.A.* et al. Development of a population balance model to describe the influence of shear and nanoparticles on the aggregation and fragmentation of asphaltene aggregates // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2015. Vol. 54, No. 33. P. 8201–8211. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02075>
22. *Aristizabal-Fontal J.E., Cortés F.B., Franco C.A.* Viscosity reduction of extra heavy crude oil by magnetite nanoparticle-based ferrofluids // *Adsorption Science & Technology*. 2018. Vol. 36, No. 1–2. P. 23–45. <https://doi.org/10.1177/0263617417704309>
23. *Taborda E.A., Franco C.A., Alvarado V., Cortés F.B.* A new model for describing the rheological behavior of heavy and extra heavy crude oils in the presence of nanoparticles // *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 12. P. 2064. <https://doi.org/10.3390/en10122064>
24. *Fan H.H., Zhou H.B., Pen Q.G., Zhai Y.H.* A generalized hydraulic calculation model for non-newtonian fluid pipe flow and its application evaluation // *SOCAR Proceedings*. 2014. No. 2. P. 23–31. <https://doi.org/10.5510/OGP20140200195>
25. *Бахтюзин Р.Н., Каримов Р.М., Мастобаев Б.Н.* Обобщенная кривая течения и универсальная реологическая модель нефти // *SOCAR Proceedings*. 2016. № 2. С. 43–46. <https://doi.org/10.5510/OGP20160200277>
26. *Tao R., Tang H.* Reducing viscosity of paraffin based crude oil with electric field for oil production and transportation // *Fuel*. 2014. Vol. 118. P. 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.056>
27. *Evdokimov I.N., Kornishin K.A.* Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil // *Energy & Fuels*. 2009. Vol. 23, No. 8. P. 4016–4020. <https://doi.org/10.1021/ef900296e>
28. *Евдокимов И.Н., Елисеев Н.Ю.* Долгоживущие метастабильные состояния коллоидных структур нефтяных остатков // *Химия и технология топлив и масел*. 2005. № 3. С. 45–47.

29. *Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Печков А.А.* Ультразвуковое оборудование для восстановления продуктивности нефтяных скважин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 3. С. 12–17.

30. *Лоскутова Ю.В., Прозорова И.В., Юдина Н.В., Рикконен С.В.* Изменение реологических свойств нефтяных дисперсных систем при вибрационной обработке // Коллоидный журнал. 2005. Т. 67, № 5, С. 663–667.

31. *Ануфриев Р.В., Волкова Г.И.* Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 10. С. 50–58.

32. *Жюльен Р.* Фрактальные агрегаты // Успехи физических наук. 1989. Т. 157, № 2. С. 339–357. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0157.198902d.0339>

Fractal theory of non-Newtonian oil viscosity based on the mutual interaction of colloidal particles: a review and new results

V.I. Lesin

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow
E-mail: vilesin@inbox.ru

Abstract. To describe the viscosity of oil, the author proposed a theory based on a new physical model, which takes into account the interaction of individual colloidal particles and their aggregates of fractal structure. This process is accompanied by the addition of individual particles to aggregates and by their separation under the action of shear stress, which is reflected in the energy consumption of the fluid movement and manifests itself as a dependence of the viscosity on the shear rate.

The purpose of the review is to demonstrate the application of fractal viscosity theory to interpret the results of known experimental studies. The review also contains the results of new experimental studies of a model sample of oil to illustrate a number of statements of the theory. The detailed parameters of the physical model are specified, on the basis of which a fractal theory of viscosity is proposed; a system of two equations is obtained that allows to describe the dependence of viscosity on the shear rate and time.

It is demonstrated that the conclusions drawn from the theory correspond to the known and newly obtained experimental data. The regularities of viscosity relaxation predicted experimentally by the theory with increasing and decreasing shear rates are confirmed. A methodology based on the laws of thermodynamics is proposed that allows to select the mode of shear rate action on heavy oil to reduce its viscosity.

Keywords: oil, viscosity, fractal theory, physical model, dependence of viscosity on shear rate, dependence of viscosity on time.

Citation: *Lesin V.I.* Fractal theory of non-Newtonian oil viscosity based on the mutual interaction of colloidal particles: a review and new results // Actual Problems of Oil and Gas. 2021. Iss. 1(32). P. 26–46. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-32.art3> (In Russ.).

References

1. *Malkin A.Ya., Khadzhiev S.N.* On the rheology of oil (review) // Petroleum Chemistry. 2016. Vol. 56, No. 7. P. 541–551. <https://doi.org/10.1134/S0965544116070100>
2. *Kelbaliyev G.I., Tagiyev D.B., Rasulov S.R.* et al. Rheology of structural oil disperse systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. Vol. 51, No. 5. P. 729–735. <https://doi.org/10.1134/S0040579517050293>
3. *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, No. 1. P. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.09.038>
4. *Rahmani N. H. G., Dabros T., Masliyah J. H.* Fractal structure of asphaltene aggregates // Journal of Colloid and Interface Science. 2005. Vol. 285. P. 599–608. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.11.068>

5. *Rahmani N.H.G., Dabros T., Masliyah J.H.* Online optical monitoring of asphaltene aggregation // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2005. Vol. 44, No. 1. P. 75–84. <https://doi.org/10.1021/ie049689x>
6. *Kane M., Djabourov M., Volle J.-L.* Rheology and structure of waxy crude oil in quiescent and shearing conditions // *Fuel*. 2004. Vol. 83, No. 11–12. P. 1591–1605. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.01.017>
7. *Lesin V.I.* Viscosity mathematical model of heavy oil containing the metal oxides colloidal particles // *Electronic Scientific Journal Oil and Gas Business*. 2019. No. 2. P. 200–227. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-2-199-216> (In Russ.).
8. *Lesin V.I.* Physical basis of magnetic field treatment of colloidal systems involved in oil and gas industry processes // *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018. Iss. 1(20). P. 25. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art25> (In Russ.).
9. *Tung N.P., Vinh, N.Q., Phong N.T.P.* et al. Perspective for using Nd–Fe–B magnets as a tool for the improvement of the production and transportation of Vietnamese crude oil with high paraffin content // *Physica B: Condensed Matter*. 2003. Vol. 327, No. 2–4. P. 443–447. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)01788-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)01788-X)
10. *Sonntag R.C., Russel W.B.* Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses: I. Shear experiments // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1986. Vol. 113, No. 2. P. 399–413. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(86\)90175-X](https://doi.org/10.1016/0021-9797(86)90175-X)
11. *Sisko A.W.* The flow of lubricating greases *Industrial and engineering chemistry*. 1958. Vol. 50, No. 12. P. 1798–1792. <https://doi.org/10.1021/ie50588a042>
12. *Huang A.Y., Berg J.C.* Aggregate restructuring by polymer solvency effects // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No. 2. P. 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.06.088>
13. *Barthelmes G., Prastinis S.E., Buggisch H.* Particle size distribution and viscosity of suspensions undergoing shear-induced coagulation and fragmentation // *Chemical Engineering Science*. 2003. Vol. 58, No 13. P. 2893–2902. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(03\)00133-7](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(03)00133-7)
14. *Sonntag R.C., Russel W.B.* Structure and breakup of flocs subjected to fluid Stresses: II. Theory // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1987. Vol. 115, No. 2. P. 378–389. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(87\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(87)90053-1)
15. *Dolgonosov B.M.* Parameters of equilibrium spectrum of particles in coagulating system with aggregate disintegration // *Colloid Journal*. 2001. Vol. 63, No. 1. P. 34–37. <https://doi.org/10.1023/A:1009434023132>
16. *Roldughin V.I.* The characteristics of fractal disperse system // *Russian Chemical Review*. 2003. Vol. 72, No. 11. P. 913–937. <https://doi.org/10.1070/RC2003v072n11ABEH000829>
17. *Logan B.E., Kilps J.R.* Fractal dimensions of aggregates formed in different fluid mechanical environments// *Water Research*. 1995. Vol. 29, No. 2. P. 443–453. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00186-B](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00186-B)
18. *Bushella G.C., Yan Y.D., Woodfield D.* et al. On techniques for measurement of the mass fractal dimension of aggregates // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2002. Vol. 95, No 1. P. 1–50. [https://doi.org/10.1016/s0001-8686\(00\)00078-6](https://doi.org/10.1016/s0001-8686(00)00078-6)

19. Eggersdorfer M.L., Kadau D., Herrmann H.J., Pratinis S.E. and restructuring of soft-agglomerates under shear // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2010. Vol. 342, No. 2. P. 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.10.062>
20. Asnaghi D., Carpinetib M., Giglio M., Sozzi M. Coagulation kinetics and aggregate morphology in the intermediate regimes between diffusion limited and reaction limited cluster aggregation // *Physical Review A*. 1992. Vol. 45, No. 2. P. 1018–1023. <https://doi.org/10.1103/physreva.45.1018>
21. Nassar N.N., Betancur S., Acevedo S. et al. Development of a population balance model to describe the influence of shear and nanoparticles on the aggregation and fragmentation of asphaltene aggregates // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2015. Vol. 54, No. 33. P. 8201–8211. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02075>
22. Aristizabal-Fontal J.E., Cortés F.B., Franco C.A. Viscosity reduction of extra heavy crude oil by magnetite nanoparticle-based ferrofluids // *Adsorption Science & Technology*. 2018. Vol. 36, No. 1–2. P. 23–45. <https://doi.org/10.1177/0263617417704309>
23. Taborda E. A., Franco C.A., Alvarado V., Cortés F.B. A new model for describing the rheological behavior of heavy and extra heavy crude oils in the presence of nanoparticles // *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 12. P. 2064. <https://doi.org/10.3390/en10122064>
24. Fan H.H., Zhou H.B., Peng Q., Zhai Y.H. A generalized hydraulic calculation model for non-Newtonian fluid pipe flow and its application evaluation // *SOCAR Proceedings*. 2014. No. 2. P. 23–31. <https://doi.org/10.5510/OGP20140200195>
25. Bakhtizin R.N., Karimov R.M., Mastobayev B.N. The general form of the flow curve of oil and universal rheological model // *SOCAR Proceedings*. 2016. No. 2. P. 43–46. <https://doi.org/10.5510/OGP20160200277> (In Russ.).
26. Tao R., Tang H. Reducing viscosity of paraffin based crude oil with electric field for oil production and transportation // *Fuel*. 2014. Vol. 118. P. 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.056>
27. Evdokimov I.N., Kornishin K.A. Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil // *Energy & Fuels*. 2009. Vol. 23, No. 8. P. 4016–4020. <https://doi.org/10.1021/ef900296e>
28. Evdokimov I.N., Eliseev N. Yu. Colloidal structures of petroleum residues long-lived in metastable states // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. Vol. 41, No. 3. P. 230–235. <https://doi.org/10.1007/s10553-005-0055-y>
29. Mullakayev M.S., Abramov V.O., Pechkov A.A. An ultrasonic technology for productivity restoration in low-flow boreholes // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 45, No. 3–4. P. 203–210. <https://doi.org/10.1007/s10556-009-9171-6>
30. Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V., Rikkonen S.V. Change in the rheological properties of oil disperse systems upon a vibrational treatment // *Colloid Journal*. 2005. Vol. 67, No. 5. P. 602–605. <https://doi.org/10.1007/s10595-005-0138-9>
31. Anufriev R.V., Volkova G.I. Influence of ultrasonic treatment on structural and mechanical properties of oil and sedimentation // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016. Vol. 327, No. 10. P. 50–58. (In Russ).
32. Jullien R. Fractal aggregates // *Comm. Cond. Mat. Phys. (Comm. Mod. Phys. Pt B)*. 1987. Vol. 13, No 4. P. 177–205.