

УДК 622.244.442.063

**ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
«АНОМАЛЬНОЙ ВЯЗКОСТИ», ОСЛОЖНЯЮЩИЙ
ДОБЫЧУ И ТРАНСПОРТИРОВКУ НЕФТИ**

**PHYSICAL MECHANISM OF «ABNORMAL VISCOSITY»
THAT IMPEDES THE PRODUCTION
AND TRANSPORTATION OF OIL**

В.И. Лесин

**Институт проблем нефти и газа РАН,
г. Москва, Российская Федерация**

Viktor I. Lesin

**Oil and Gas Research Institute of RAS,
Moscow, Russian Federation**

e-mail: vilesin@inbox.ru

Аннотация. Тяжелая нефть представляет неньютоновскую жидкость, поэтому восстановление производительности скважин и трубопроводов после остановки движения нефти является не всегда успешным, требует, как правило, использования методов стимуляции течения и фильтрации. Это связано с тем, что за время остановки вязкость неподвижной нефти может резко возрасть, приобретая «аномально» большую величину.

Цель работы состояла в установлении физической природы «аномальной» вязкости и разработке методов восстановления производительности скважин и трубопроводов. В работе, на основе фрактальной теории вязкости, установлен механизм возникновения «аномальной» вязкости нефти, связанный с изменением строения коллективных структур коллоидных частиц нефти, имеющих фрактальное

строение. Показано, что на основе данных измерения зависимости вязкости от скорости сдвига, полученных на реометрах, можно определять закономерности фильтрации через поровое пространство и течения через капилляры. Продемонстрировано соответствие фрактальной теории вязкости экспериментально наблюдающимся закономерностям фильтрации и течению нефти в капиллярах и трубах большого радиуса.

Проведенные исследования показывают важность учета эволюции структуры фрактальных агрегатов в нефти при решении задач, связанных с необходимостью остановки и восстановления движения нефтяного флюида.

Abstract. Heavy oil is a non-Newtonian liquid, so restoring the productivity of wells and pipelines after stopping oil movement is not always successful, and usually requires the use of flow stimulation and filtration methods. This is due to the fact that during the shutdown, the viscosity of stationary oil can increase sharply, acquiring an abnormal» large value.

The aim of the work was to establish the physical nature of the «abnormal» viscosity and develop methods for restoring the productivity of wells and pipelines. In this paper, based on the fractal theory of viscosity, the mechanism of occurrence of «abnormal» oil viscosity associated with changes in the structure of collective structures of colloidal oil particles with a fractal structure is established. It is shown that the laws of filtration through the pore space and flow through capillaries can be determined based on the measurement data of the dependence of viscosity on the shear rate obtained on rheometers. It is demonstrated that the fractal theory of viscosity corresponds to the experimentally observed regularities of oil filtration and flow in capillaries and pipes of large radius.

The conducted research shows the importance of taking into account the evolution of the structure of fractal aggregates in oil when solving problems related to the need to stop and restore the movement of the oil fluid.

Ключевые слова: нефть; вязкость; аномалия; фрактальные агрегаты коллоидных частиц нефти; фильтрация; течение

Key words: oil; viscosity; anomaly; fractal aggregates of colloidal oil particles; filtration; flow

Введение

Эксплуатация добывающих скважин и трубопроводов требует остановки течения нефти на длительный срок для проведения технологических операций. За время остановки вязкость тяжелой нефти, как правило, приобретает аномальный характер, многократно возрастает. Восстановление производительности скважин и трубопроводов в этом случае требует стимуляции течения методами, например, нагрева, увеличения градиента давления, воздействия колебаниями давления в течение длительного времени. Для вязкости тяжелой нефти характерны неоднозначные реакции на изменения температуры и механических воздействий, которые определяются зависимостью текущей величины вязкости от продолжительности и величины предыдущих изменений температуры скорости сдвига [1, 2]. Цель работы состояла в установлении физического механизма возникновения аномальной вязкости и обосновании выбора методов восстановления производительности скважин и трубопроводов.

Теория

В [3, 4] предложена фрактальная теория вязкости, основанная на особенностях затрат энергии на движение агрегатов коллоидных частиц фрактальной структуры – фрактальных агрегатов (ФА). Согласно теории, текущая вязкость η связана с радиусом инерции R и концентрацией ФА N [см⁻³] уравнением:

$$\eta = \eta_{\infty}(1 + Ka^3N(R/a)^{\lambda}), \quad (1)$$

где η_{∞} – вязкость при полностью разрушенных агрегатах;

a – радиус коллоидной частицы;

$K \geq 0$ и $\lambda \geq 0$ – постоянные, зависящие от физических параметров ФА.

Концентрация N [см⁻³] равна концентрации коллоидных неорганических примесей оксидов металлов – центров адсорбции асфальтенов и других углеводородов нефти.

Под действием градиента скорости V жидкости $-\text{grad}(V) = G$ происходит разрушение и деформация ФА, что выражается в зависимости радиуса от скорости сдвига G :

$$R/a \sim (G_0/G)^h, \quad (2)$$

где $h > 0$ и G_0 – параметры, зависящие от сил взаимного притяжения коллоидных частиц и пространственной структуры ФА.

С учетом (2) зависимость стационарной вязкости от скорости сдвига приобретает вид:

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

Принимая $\lambda h = \alpha \geq 0$ и $B = K_1a^3N(G_0)^{\lambda h}$, получаем:

$$\eta = \eta_{\infty}(1 + BG^{-\alpha}). \quad (3)$$

ФА больших размеров – $R/a \gg 1$ представляет слоистую структуру [5], поскольку механизмы роста и разрушения ФА зависят от сил взаимного притяжения коллоидных частиц, концентрации коллоидных частиц, скорости сдвига, продолжительности механических воздействий, температуры. Слоистая структура проявляется в том, что вязкость η ходе увеличения/уменьшения R при воздействии скорости сдвига G изменяется таким образом, что $B_i = \text{const}$ и $\alpha_i = \text{const}$ для определенных интервалов значений G :

$$\eta = \eta_{\infty} (1 + B_i G^{-\alpha_i}), \text{ для } G_{i-1} \leq G \leq G_{i+1}. \quad (4)$$

Зависимость $\eta(G)$ представляет непрерывную функцию, где $B_i G^{-\alpha_i} \rightarrow 0$ при $G \rightarrow \infty$. Параметры B_i , α_i , η_∞ и интервалы G определяются из экспериментально получаемых зависимостей вида [2–4]:

$$\ln(\eta/\eta_\infty - 1) = \ln(B_i) - \alpha_i \ln(G). \quad (5)$$

Параметр α характеризует устойчивость ФА к механическим воздействиям. При $\alpha = 0$ вязкость не зависит от скорости сдвига, поскольку в этом случае не происходит ни деформации, ни разрушения ФА, ни присоединения к ФА отдельных мелких частиц из коллоидного раствора.

Эмпирическое уравнение вида (3) для $\alpha = \text{const}$ во всем диапазоне G было ранее предложено для смазочных масел [6]. В некоторых случаях оно дает удовлетворительные результаты для расчета расхода жидкости при течении через трубу.

Экспериментальные результаты и их анализ

В работе исследовались зависимости вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига в области температур, где происходит возникновение и рост коллоидных частиц. Измерения производились с помощью вискозиметра Physica MCR 301 фирмы Anton Paar (Австрия) с измерительной ячейкой в геометрии конус-плита. В качестве образца для исследований была выбрана нефть с содержанием асфальтенов 3,2 %, смол 7,6 %.

Перед измерениями образец находился в покое при комнатной температуре более 30 сут. Навеска нефти распределялась по измерительной ячейке, затем образец охлаждался/нагревался до заданной температуры. Через некоторое время после достижения заданной температуры измерялись полные реологические кривые – зависимости вязкости η [Па•с] и напряжения сдвига τ [Па] от скорости сдвига $G = dV/dx$ [с⁻¹]: $\eta(G)$ и $\tau(G) = G\eta$. При получении полных реологических кривых величины η и τ регистрировались через интервалы времени, достаточные для достижения

стационарных значений η и τ после установления заданной скорости сдвига G . В области малых значений G от $0,1 \text{ c}^{-1}$ до 10 c^{-1} интервалы времени составляли от 20 мин до 3 мин. Для $G > 10 \text{ c}^{-1}$ интервалы составляли от 200 с до 50 с.

Критерием соответствия измерениям стационарных значений η служила зависимость $\text{Ln}(\eta/\eta_\infty - 1)$ от $\text{Ln } G$ в виде ломаной, образованной прямыми линиями.

Стационарные зависимости $\eta(G)$ при всех температурах представляли монотонно убывающие функции степенного вида, которые стремились к постоянной величине с ростом.

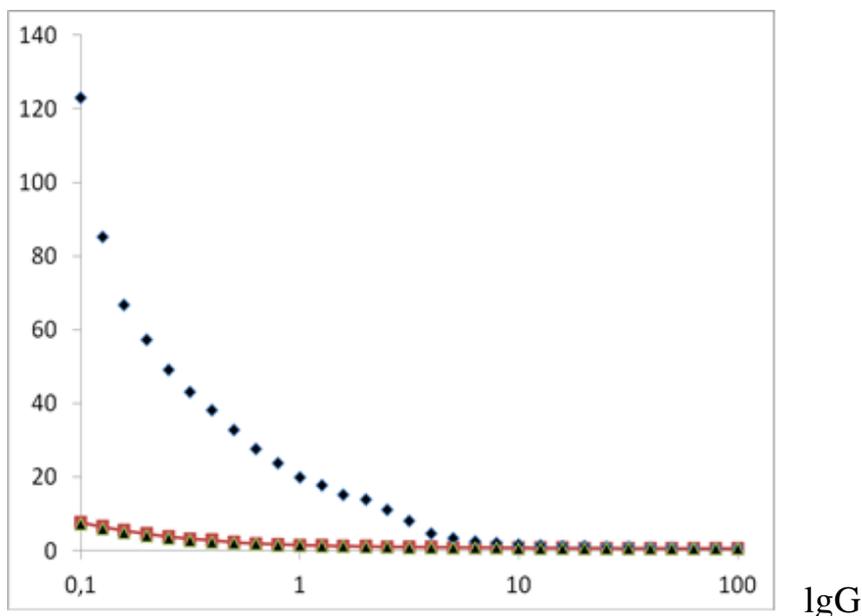
На рисунке 1 приведены зависимости $\eta(G)$, полученные при температуре $5 \text{ }^\circ\text{C}$ при непрерывном изменении G :

◆ – $\eta(G)$ после состояния покоя в течение 45 мин при увеличении G от $0,1 \text{ c}^{-1}$ до 100 c^{-1} ;

■ – $\eta(G)$ при снижении G от 100 c^{-1} до $0,1 \text{ c}^{-1}$;

▲ – $\eta(G)$ и при росте G от $0,1 \text{ c}^{-1}$ до 100 c^{-1} .

η



Экспериментальные точки:

◆ – зависимость $\eta(G)$ при росте G от $0,1 \text{ c}^{-1}$ до 100 c^{-1} , снятая после 45 мин пребывания образца в покое;

■ – $\eta(G)$ – снижение G от 100 c^{-1} до $0,1 \text{ c}^{-1}$ через 0,5 мин после достижения 100 c^{-1} ;

▲ – $\eta(G)$ – рост G от $0,1 \text{ c}^{-1}$ до 100 c^{-1} через 0,5 мин после достижения $G = 0,1 \text{ c}^{-1}$

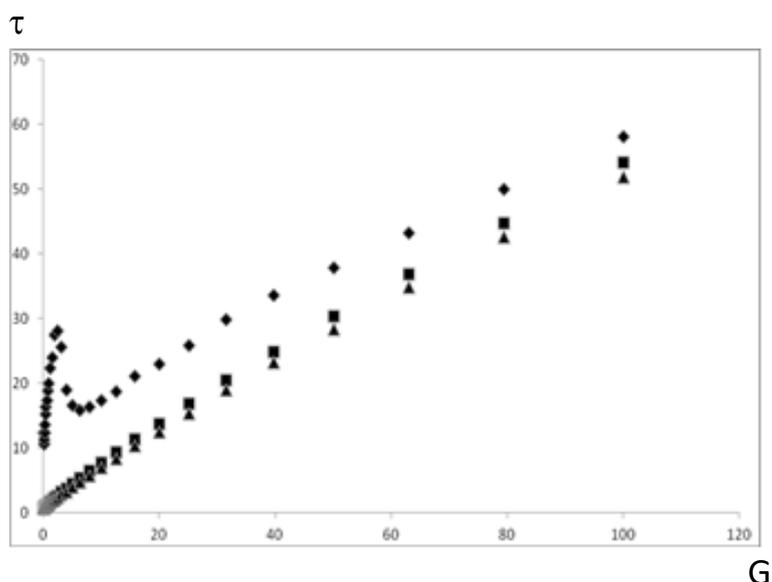
Рисунок 1. Зависимости η [Па·с] от $\lg G$ [c^{-1}] для образца нефти при температуре $5 \text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 1 показывает, что непрерывное воздействие скорости сдвига приводит к многократному снижению вязкости в области малых значений G .

На рисунке 2 показаны зависимости $\tau(G)$, соответствующие зависимостям $\eta(G)$, показанным на рисунке 1:

- ◆ – $\tau(G)$ после состояния покоя при росте G от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до 100 с^{-1} ;
- – $\tau(G)$ при снижении G от 100 с^{-1} до $0,1 \text{ с}^{-1}$;
- ▲ – $\tau(G)$ при росте G от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до 100 с^{-1} .

Как видно из рисунков 1 и 2, при непрерывном воздействии скорости сдвига гистерезис зависимостей $\eta(G)$ и $\tau(G)$ практически исчезает: разница между $\eta(G)$ и, соответственно, $\tau(G)$ составляет не более 5 %.



Экспериментальные данные:

- ◆ – зависимость $\tau(G)$, снятая при увеличении G от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до 100 с^{-1} , после 60 мин пребывания образца в покое;
- – $\tau(G)$, снятая при снижении G от 100 с^{-1} до $0,1 \text{ с}^{-1}$;
- ▲ – $\tau(G)$, снятая при росте G от $0,1 \text{ с}^{-1}$ до 100 с^{-1}

Рисунок 2. Зависимости τ [Па] от G [с^{-1}] при температуре $5 \text{ }^\circ\text{C}$

Представленный на рисунке 2 вид аномальной зависимости $\tau(G)$ (◆), полученный после остановки течения, характеризуется большой величиной вязкости в области малых значений G и наличием участка, где $d\tau/dG \leq 0$. Такой вид зависимости наблюдался в диапазоне температур $5\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$.

При повышении температуры значение G_{\max} , при котором достигался локальный максимум зависимости $\tau(G)$, смещался в сторону меньших значений G : при температуре $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $G_{\max} = 5\text{ c}^{-1}$, при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $G_{\max} = 0,1\text{ c}^{-1}$.

Увеличение G при аномальной вязкости сопровождается появлением диапазона значений G , где $d\tau/dG \leq 0$:

$$d\tau/dG = \eta_{\infty}(1 + (1 - \alpha_i)B_i G^{-\alpha_i}) \leq 0. \quad (6)$$

Как следует из (6), участок, в котором $d\tau/dG < 0$ возможен, если $(1 - \alpha_i)B_i G^{-\alpha_i} < -1$.

Определенная из зависимости (5) функция $\eta(G)$, соответствующая аномальной вязкости, приведенной на рисунке 1, имеет вид:

$$\eta(G) = 0,4(1 + BG^{-\alpha}),$$

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

$$B_1 = 3,92 \text{ и } \alpha_1 = 0,65 \text{ для } 0,1\text{ c}^{-1} \leq G \leq 2,5\text{ c}^{-1};$$

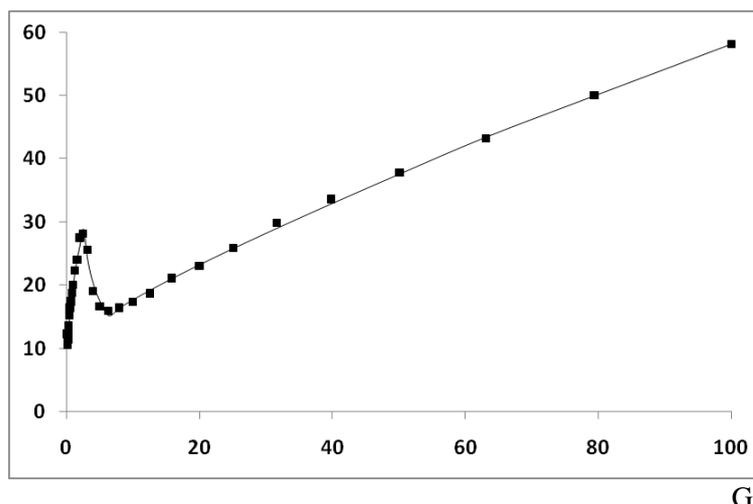
$$B_2 = 5,0 \text{ и } \alpha_2 = 1,84 \text{ для } 2,5\text{ c}^{-1} \leq G \leq 6,3\text{ c}^{-1};$$

$$B_3 = 3,2 \text{ и } \alpha_3 = 0,85 \text{ для } 6,3\text{ c}^{-1} \leq G \leq 63\text{ c}^{-1};$$

$$B_4 = 3,9 \text{ и } \alpha_4 = 1,02 \text{ для } 63\text{ c}^{-1} \leq G \leq 100\text{ c}^{-1}.$$

На рисунке 3 сплошной линией показана зависимость $\tau(G)$, рассчитанная по вышеприведенной зависимости $\eta(G)$. Как видно из рисунка 3, рассчитанная зависимость хорошо совпадает с экспериментальными данными.

τ



■ - экспериментальные данные;
 сплошная линия – теоретически рассчитанная зависимость $\tau(G)$

Рисунок 3. Зависимость напряжения сдвига τ [Па] от скорости сдвига G [с^{-1}], полученная для образцов нефти при температуре $5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рассмотрим механизм появления аномальной вязкости с точки зрения фрактальной теории.

Величина α_i характеризует устойчивость к разрушению (уменьшению R) ФА под действием скорости сдвига: чем больше α_i , тем легче разрушается слой ФА. Плотность ρ ФА зависит от расстояния до центра инерции [5]: $\rho \sim r^{-f_i}$ ($0 \leq f_i \leq 2$ для $r_{i-1} \leq r \leq r_{i+1}$). Плотный слой $f_i = 0$, $f_i = 2$ соответствует линейной структуре ФА. Величина f_i зависит от величины и продолжительности воздействий скорости сдвига, температуры, электромагнитных полей. При воздействии большой скорости сдвига G (большом напряжении сдвига $\sim \pi r_s a G \eta_{\infty}$, где r_s – расстояние от центра вращения до поверхности ФА) присоединение происходит только в случае, когда сила притяжения коллоидной частицы к поверхности превышает напряжение сдвига. При медленном снижении скорости сдвига формируются плотные ФА сферической формы и минимальной пористости. Плотная поверхность снижает интенсивность процесса прилипания/отрыва коллоидных частиц от ФА, что и вызывает дополнительные потери энергии на движение ФА в коллоидном растворе. Воздействие скорости сдвига создает условия, при которых формируются плотные агрегаты, которые

слабо взаимодействуют с отдельными коллоидными частицами, что в соответствии с фрактальной теорией приводит к снижению вязкости во всем диапазоне скоростей сдвига [7].

После воздействия малых скоростей сдвига, вызванных отбором образца и помещением его в ячейку на поверхности образца в отсутствие механических воздействий, образуется рыхлый слой, который под действием температуры начинает уплотняться с поверхности, обеспечивая снижение свободной энергии – E_f коллоидной системы. Снижение E_f достигается уменьшением площади контакта «коллоидная частица – вмещающая жидкость», т.е. снижением площади поверхности ФА $S = a(R/a)^d$, где $d \geq 2$, $d = 2$ ($f_i = 0$) соответствует сферической поверхности – минимуму E_f . При этом формируется внешний прочный слой, что соответствует большой величине $BG^{-\alpha}$ и $\alpha < 1$ в уравнении (4). Прилегающий к внешнему слою внутренний слой сохраняет рыхлую структуру, что выражается в большой величине $\alpha > 1$. При увеличении скорости сдвига, которое сопровождается снижением радиуса R ФА (удалением внешнего слоя ФА), разрушение рыхлого слоя при дальнейшем росте скорости сдвига сопровождается снижением напряжения сдвига, поскольку $(1 - \alpha) < 0$. Зависимость $\eta(G)$ представляет, как видно из рисунка 1, монотонно убывающую степенную функцию с переменным показателем степени, тогда как зависимость $\tau(G)$ может приобретать S-образную форму. Непрерывное воздействие скоростью сдвига препятствует формированию «рыхлого» поверхностного слоя и его последующего уплотнения, поскольку условия роста и разрушения в ходе циклических изменений скорости сдвига не создают необходимых условий для формирования рыхлых структур, закрепленных на поверхности ФА. Величина $\alpha > 1$ возникает, когда деформация ФА сопровождается снижением пористости и, как следствие, увеличением общего объема свободной жидкости. Масса и инерциальный радиус R ФА, участвующего во вращательно-поступательном движении, при этом снижаются не только

за счет отрыва коллоидных частиц, но и за счет удаления из ФА захваченной в поровом пространстве вмещающей жидкости. Увеличение мощности работы сил напряжения сдвига $\eta G a^3 (R/a)^D$ (где D – размерность массы ФА) с ростом G не компенсирует снижение затрат энергии, вызванных снижением $(R/a)^\lambda$ (см. уравнение (1)).

Формулы для свободной энергии и направление изменения σ

Такой рыхлый слой, прилегающий к поверхности более плотного внешнего слоя ФА, образуется только тогда, когда нефть не подвергается даже слабому механическому воздействию. Постоянное воздействие скорости сдвига не создает условий для создания такого слоя, поэтому постоянное воздействие скорости сдвига достаточно большой величины позволяет добиться как снижения зависимости вязкости от скорости сдвига, так и постоянства $\eta(G)$ во времени.

Рисунки 1 и 2 иллюстрируют многократное снижение вязкости и напряжения сдвига и стабилизацию зависимостей $\eta(G)$ и $\tau(G)$ во времени при непрерывном циклическом воздействии растущей и снижающейся во времени скорости сдвига. Из рисунков 1, 2 видно, что в области $G < 10 \text{ c}^{-1}$ и вязкость, и напряжение сдвига многократно уменьшаются.

При ламинарном течении в капилляре нефть подвергается действию скорости сдвига в диапазоне от 0 c^{-1} до некоторой конечной величины G вблизи поверхности капилляра. S-образные зависимости скорости течения Q [cm^3/c] от градиента давления $\text{grad}(P) = \Delta P/L$ (ΔP – перепад давления на длине капилляра L) наблюдаются и при измерении зависимости Q ($\text{grad}P$) нефти и других коллоидных растворов при использовании капиллярных вискозиметров [8, 9]. При построении кривых $\tau(G)$, полученных при таких измерениях, принимается $G = Q/\pi R_c^3$, $\tau = \Delta P R_c / 2\pi L$, где R_c – радиус капилляра. Диапазон значений G , где $d\tau/dG < 0$ ($(d(\text{grad}P)/dQ) < 0$)

соответствует росту объемной скорости течения через капилляр при снижении градиента давления.

Рассмотрим случай течения через капилляр нефти с аномальной вязкостью, когда $BG^{-\alpha} \gg 1$. Используя зависимость $\eta(G)$ для скорости сдвига $G(r_c)$, получаем:

$$G(r_c) = (\Delta P r_c) / (2\eta_{\infty} B L G^{-\alpha}).$$

Откуда

$$G = (\Delta P r_c) / (\eta_{\infty} B 2L)^m,$$

где $m = 1/(1-\alpha)$;

r_c – расстояние от оси капилляра.

Объемная скорость течения жидкости через кольцевое пространство, ограниченное радиусами r_{c1} , r_{c2} :

$$Q(r_{c1}, r_{c2}) = (\Delta P / \eta_{\infty} B 2L)^m (\pi / m + 1) (1/B^m) (1/m + 3) (r_{c2}^{(m+3)} - r_{c1}^{(m+3)}). \quad (7)$$

Параметры уравнения (7) m , η_{∞} , B определяются из измерений $\eta(G)$ на ротационном вискозиметре, что дает возможность расчета зависимости $Q(\Delta P)$ для капилляра.

Как видно из формулы (7), при $m = 1$, что соответствует ньютоновской жидкости с постоянным значением вязкости ($\alpha = 0$), мы получаем известный закон течения с параболическим типом распределения скоростей по сечению капилляра. Радиусы r_{c1} и r_{c2} соответствуют значениям G_1 и G_2 , ограничивающим диапазон скоростей сдвига, где $m = \text{const}$. При $m > 0$ ($\alpha < 1$), принимая $r_{c2} = R_c$, $r_{c1} = 0$, получаем:

$$Q \sim \Delta P^m \quad (8)$$

При учете зависимости m от скорости сдвига G расчетная кривая демонстрирует S-образный вид зависимости $Q(\Delta P)$, аналогичный виду $\tau(G)$, получаемому на ротационном вискозиметре. Течение нефти через капилляр в таком случае может сопровождаться пульсациями Q , поскольку в

диапазоне малых скоростей течения одному значению перепада давления $\Delta P \sim \tau$ может соответствовать от 2-х до 3-х значений Q .

Исследования течения нефти и других неньютоновских жидкостей через поровое пространство горной породы показывают, что фрактальная теория вязкости и вытекающие из нее уравнения соответствуют наблюдаемым зависимостям скорости фильтрации от градиента давления.

В работе [10] при исследовании фильтрации нефти (содержание асфальтенов 0,1 %, смол 3,8 %, парафинов 6 %) через образец горной породы было установлено, что $\Delta P = A Q^n$ или $Q \sim P^{1/n}$. Величина n принимала значения 0,58; 0,63; 0,47 при изменении направлений фильтрации. Авторы объяснили полученные результаты воздействием скорости сдвига на линейные структуры длиной $\approx 1,3$ мкм, образованные коллоидными частицами асфальтенов размерами порядка 3–5 нм. В [11] показано, что асфальтены образуют надмолекулярные структуры (коллоидные частицы размером 3–5 нм) вплоть до температуры 90 °С.

S-образные и степенные зависимости скорости фильтрации нефти Q от градиента давления P ($\text{grad}(P)$) наблюдались в [12] для горных пород с низкой проницаемостью и в [13] для фильтрации полимерного раствора через поровое пространство. Экспериментальные зависимости $Q \sim \Delta P^m$, полученные авторами [10, 12–14], соответствуют использованию фрактальной теории сдвига, если ввести понятие эффективного среднего радиуса капилляра для пористой среды $R_{\text{ср}}$. С учетом радиуса R ФА, который может достигать 100 мкм, скорость сдвига G и, как следствие, вязкость неньютоновской нефти $\eta(G)$, протекающей в поровом пространстве, можно считать почти постоянной величиной при $R \rightarrow R_{\text{ср}}$, равной $G \approx Q/\pi(R_{\text{ср}})^3$.

Для горной породы с низкой пористостью [12] в зависимости проницаемости от градиента скорости сдвига действительно наблюдались участки, где $(dQ/dP) < 0$, что подтверждает возможность применения фрактальной теории вязкости для описания фильтрации нефти.

При установлении распределения давления вблизи скважины участки коллектора, где $dQ/d(\Delta P) < 0$ могут занять значительное пространство призабойной зоны скважины, значительно снизить ее производительность в результате снижения проницаемости призабойной зоны, вызвать пульсацию дебита скважины. Как известно, пульсации дебита часто наблюдаются для скважин, работающих в режиме естественного напора.

Для восстановления производительности, как правило, используются колебания давления, которые, как следует из фрактальной теории, могут снизить вязкость нефти за счет разрушения ФА под действием скорости сдвига. Перспективным методом снижения вязкости является использование электромагнитных полей, которые, воздействуя на электрически заряженные магнитные коллоидные частицы оксидов железа, являющихся составными частями ФА, способны разрушить ФА [7]. В [15] показано, что применение импульсного электрического поля позволяет многократно снизить вязкость нефти. Использование постоянного магнитного поля для снижения вязкости перспективно для обработки нефти в трубопроводе [7].

Выводы

На основе фрактальной теории вязкости установлен механизм возникновения «аномальной» вязкости нефти, связанный с изменением строения коллективных структур коллоидных частиц нефти, имеющих фрактальное строение. Показано, что на основе данных измерения зависимости вязкости от скорости сдвига, полученных на реометрах, можно определять закономерности фильтрации через поровое пространство и течения через капилляры. Продемонстрировано соответствие фрактальной теории вязкости экспериментально наблюдающимся закономерностям фильтрации и течению нефти в капиллярах и трубах большого радиуса.

Проведенные исследования показывают важность учета эволюции структуры фрактальных агрегатов в нефти при решении задач, связанных с необходимостью остановки и восстановления движения нефтяного флюида.

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»).

Список используемых источников

1. Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu. Colloidal Structures of Petroleum Residues Long-Lived in Metastable States // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2005. Vol. 41. Issue 3. P. 230-235. DOI: 10.1007/s10553-005-0055-y.

2. Лесин В.И., Алексеева Ю.А. Эволюция структуры фрактальных агрегатов нефти под действием напряжения сдвига // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 3 (22). URL: http://oilgasjournal.ru/issue_22/lesin.pdf (дата обращения: 17.08.2020). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art28.

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. Issue 1. P. 88-94. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.09.038.

4. Лесин В.И. Математическая модель вязкости тяжелой нефти, содержащей примеси коллоидных наночастиц оксидов металлов // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 2. С. 199-216. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2019/ogbus_2_2019_p199-216.pdf (дата обращения: 18.08.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-199-216.

5. Roldugin V.I. The Characteristics of Fractal Disperse System // Russian Chemical Review. 2003. Vol. 72. No. 11. P. 913-937. DOI: 10.1070/RC2003v072n11ABEH000829.

6. Sisko A.W. The Flow of Lubricating Greases // Industrial and Engineering Chemistry. 1958. Vol. 50. No. 12. P. 1789-1792.

7. Лесин В.И., Лесин С.В. Анализ способов снижения вязкости неньютоновской нефти на основе фрактальной теории // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 6. С. 212-237. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2019/ogbus_6_2019_p212-237.pdf (дата обращения: 18.08.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-6-212-237.

8. Абитова А.Ж. Реологические особенности некоторых неньютоновских нефтей месторождений Западного Казахстана // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2011. № 3. С. 48-51. DOI: 10.5510/OGP20110300081.

9. Khilko S.L., Titov E.V., Fedoseeva A.A., Petrenko A.G., Fedoseev R.A. On the Possibility of Using Two Models of the Viscosity Superanomaly Effect for Analyzing the Flow Curves of Structured Disperse Systems // Colloid Journal. 2006. Vol. 68. No. 1. P. 106-114. DOI: 10.1134/S1061933X06010145.

10. Гальцев В.Е., Аметов И.М., Дзюбенко Е.М., Кузнецов А.М., Ковалев А.Г., Сальников Д.И. Влияние образования надмолекулярных структур на фильтрацию нефти в пористой среде // Коллоидный журнал. 1995. Т. 57. № 5. С. 660-665.

11. Galtsev V.E., Ametov I.M., Grinberg O.Y. Asphaltene Association in Crude Oil as Studied by ENDOR // Fuel. 1995. Vol. 74. Issue 5. P. 670-673. DOI: 10.1016/0016-2361(94)00009-G.

12. Михайлов Н.Н., Туманова Е.С., Зайцев М.В. Степенной закон фильтрации и его следствия для низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2020. № 4. С. 34-37. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-4-34-37.

13. Сулейманов Б.А. Особенности фильтрации гетерогенных систем. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 354 с.

14. 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. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.11.068.

15. 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. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.056.

References

1. Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu. Colloidal Structures of Petroleum Residues Long-Lived in Metastable States. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2005, Vol. 41, Issue 3, pp. 230-235. DOI: 10.1007/s10553-005-0055-y.

2. Lesin V.I., Alekseeva Yu.A. Evolyutsiya struktury fraktal'nykh agregatov nefti pod deistviem napryazheniya sdviga [Evolution of the Structure of Fractal Oil Aggregates Under the Action of Shear Stress]. *Aktual'nye problemy nefti i gaza – Actual Problems of Oil and Gas*, 2018, Issue 3 (22). URL: http://oilgasjournal.ru/issue_22/lesin.pdf (accessed 17.08.2020). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art28. [in Russian].

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, Issue 1, pp. 88-94. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.09.038.

4. Lesin V.I. Matematicheskaya model' vyazkosti tyazheloi nefti, sodержashchei primesi kolloidnykh nanochastits oksidov metallov [Viscosity Mathematical Model of Heavy Oil Containing the Metal Oxides Colloid Nanoparticles Impurity]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 2, pp. 199-216. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2019/ogbus_2_2019_p199-216.pdf (accessed 18.08.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-199-216. [in Russian].

5. Roldugin V.I. The Characteristics of Fractal Disperse System. *Russian Chemical Review*, 2003, Vol. 72, No. 11, pp. 913-937. DOI: 10.1070/RC2003v072n11ABEH000829.
6. Sisko A.W. The Flow of Lubricating Greases. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1958, Vol. 50, No. 12, pp. 1789-1792.
7. Lesin V.I., Lesin S.V. Analiz sposobov snizheniya vyazkosti nen'yutonovskoi nefti na osnove fraktal'noi teorii [Analysis of Ways to Reduce Non-Newtonian Oil Viscosity Based on Fractal Theory]. *Setevoe izdanie «Neftgazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 6, pp. 212-237. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2019/ogbus_6_2019_p212-237.pdf (accessed 18.08.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-6-212-237. [in Russian].
8. Abitova A.Zh. Reologicheskie osobennosti nekotorykh nen'yutonovskikh neftei mestorozhdenii Zapadnogo Kazakhstana [Rheological Features of Certain Non-Newtonian Oils of Western Kazakhstan Fields]. *Nauchnye trudy NIPi Neftgaz GNKAR – SOCAR Proceedings*, 2011, No. 3, pp. 48-51. DOI: 10.5510/OGP20110300081. [in Russian].
9. Khilko S.L., Titov E.V., Fedoseeva A.A., Petrenko A.G., Fedoseev R.A. On the Possibility of Using Two Models of the Viscosity Superanomaly Effect for Analyzing the Flow Curves of Structured Disperse Systems. *Colloid Journal*, 2006, Vol. 68, No. 1, pp. 106-114. DOI: 10.1134/S1061933X06010145.
10. Galtsev V.E., Ametov I.M., Dzyubenko E.M., Kuznetsov A.M., Kovalev A.G., Sal'nikov D.I. Vliyanie obrazovaniya nadmolekulyarnykh struktur na fil'tratsiyu nefti v poristoi srede [Effect of Supermolecular Structure on the Oil Filtration in a Porous Medium]. *Kolloidnyi zhurnal – Colloid Journal*, 1995, Vol. 57, No. 5, pp. 660-665. [in Russian].
11. Galtsev V.E., Ametov I.M., Grinberg O.Y. Asphaltene Association in Crude Oil as Studied by ENDOR. *Fuel*, 1995, Vol. 74, Issue 5, pp. 670-673. DOI: 10.1016/0016-2361(94)00009-G.

12. Mikhailov N.N., Tumanova E.S., Zaitsev M.V. Stepennoi zakon fil'tratsii i ego sledstviya dlya nizkopronitsaemykh kollektorov [Power Law of Filtration and its Consequences for Low-Permeable Reservoirs]. *Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 2020, No. 4, pp. 34-37. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-4-34-37. [in Russian].
13. Suleimanov B.A. *Osobennosti fil'tratsii geterogennykh sistem* [Features of Filtering Heterogeneous Systems]. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2006. 354 p. [in Russian].
14. Rahmani N.H.G., Dabros T., Masliyah J.H. Fractal Structure of Asphaltene Aggregates. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, Vol. 285, pp. 599-608. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.11.068.
15. Tao R., Tang H. Reducing Viscosity of Paraffin Based Crude Oil with Electric Field for Oil Production and Transportation. *Fuel*, 2014, Vol. 118, pp. 69-72. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.056.

Сведения об авторе

About the author

Лесин Виктор Иванович, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа Российской Академии наук (ИПНГ РАН), г. Москва, Российская Федерация

Viktor I. Lesin, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

e-mail: vilesin@inbox.ru