

УДК 532.135: 532.137.4
PACS 83.60.La; 83.85.Cg

Экспериментальное исследование реологических свойств жидкостей для гидроразрыва пласта

Д. В. Ефремов¹, И. А. Банникова¹, Ю. В. Баяндин¹, Е. В. Крутихин²,
В. А. Журавлёв²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Академика Королёва, 1
email: efremov.d@icmm.ru, buv@icmm.ru

²АО «Полиэкс»
614042, г.Пермь, ул.Гальперина, д.8, корп.1
email: kev@polyex.perm.ru, vaz@polyex.perm.ru

Работа посвящена исследованию реологического поведения жидкостей, применяемых для технологии гидроразрыва пласта (ГРП), в широком диапазоне скоростей деформирования с применением вискозиметров различной конструкции. Вязкоупругие ПАВ применяются в качестве пропантонесущей и пропантоудерживающей жидкости ГРП с целью повышения нефтеотдачи, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа. Исследованию реологических свойств подвергались жидкости на основе гуара и вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д (тип 70–100, производства АО «Полиэкс») с сопоставимой вязкостью при скорости сдвига 128 с^{-1} . Квазистатические эксперименты по определению значений динамической вязкости исследуемых жидкостей проведены с использованием вискозиметра с падающим шаром (по методу Стокса). С помощью вискозиметра оригинального изготовления, состоящего из двух коаксиальных цилиндров (ротационный реометр), была исследована динамическая вязкость вязкоупругого ПАВ в широком диапазоне скоростей сдвига. Вязкоупругие свойства жидкостей исследованы с использованием реометра Physica MCR501, имеющего измерительную систему «конус–плоскость» и позволяющего проводить реологические исследования в ротационном и осцилляционном режимах. Проведено сравнение реологических свойств жидкостей на основе гуара и вязкоупругого ПАВ и установлено, что жидкость на основе вязкоупругого ПАВ имеет более высокую динамическую вязкость и не утрачивает упругие свойства, что является несомненным преимуществом по сравнению с жидкостью на основе гуара.

Ключевые слова: неньютоновская жидкость; сурфогель; гуар; ротационный вискозиметр; вязкоупругость

Поступила в редакцию 12.10.2020; принята к опубликованию 15.12.2020

Experimental study of rheological properties of liquids for hydrofracturing

D. V. Efremov¹, I. A. Bannikova¹, Y. V. Bayandin¹, E. V. Krutikhin², V. A. Zhuravlev²

¹ Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Academica Koroleva St. 1, 614013, Perm
email: efremov.d@icmm.ru, buv@icmm.ru

² POLYEX, jsc, Galperina st. 8, bld.1, 614042, Perm
email: kev@polyex.perm.ru, vaz@polyex.perm.ru

The work is devoted to the study of the rheological behavior of proppant carrier fluids used for hydraulic fracturing (HF) technology in order to increase oil recovery, including from hard-to-recover oil and gas reserves, in a wide range of deformation rates using viscometers of various designs. Rheological properties were studied for proppant carrier fluids based on guar and Surfogel grade D, (type 70–100, produced by JSC “Polyex”) with comparable shear rate 128 s^{-1} . Quasi-static experiments to determine the values of the dynamic viscosity of the liquids under study were carried out using a falling ball viscometer (according to the Stokes method). Using an original viscometer, consisting of two coaxial cylinders (rotary rheometer), the dynamic viscosity of surfogel was investigated in a wide range of shear rates. The viscoelastic properties of surfactants were studied using a Physica MCR501 rheometer, which has a plane-to-plane measuring system and allows rheological studies in rotational and oscillatory modes. A comparison of the rheological properties of fluids based on the guar and the viscoelastic surfactant is carried out and it is established that a fluid based on the viscoelastic surfactant has a higher dynamic viscosity and does not lose its elastic properties, which is an certain advantage over a fluid based on the guar.

Keywords: non-newtonian fluid, surfogel, guar, rotary viscometer, viscoelasticity

Received 12.10.2020; accepted 15.12.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-69-77

1. Введение

Общепризнано, что большинство жидкостей, окружающих человека в промышленности, науке, природе и быту, демонстрируют неньютоновское поведение, например, вязкоупругость, дилатантность, тиксотропность [1–4]. Ввиду этого факта, моделирование поведения неньютоновских жидкостей, которое осложняется нелинейной зависимостью между напряжением сдвига и скоростью сдвига в отличие от ньютоновских жидкостей [2, 3], имеет большой научный и практический интерес.

Помимо классических реологических моделей, состоящих из комбинации элементов Фойгта и Максвелла [2, 3], существует множество других моделей, позволяющих получить более точное описание неньютоновских жидкостей в различных спектрах их применения.

Например, в работах [4–6] проведено моделирование процесса нестационарного естественного конвективного теплопереноса в полостях различной формы, заполненных неньютоновской жидкостью при наличии локального источника энергии. Рассмотренные в данных работах процессы имеют практическое применение в различном теплообменном оборудовании, трубопроводах, солнечных коллекторах.

В [7, 8] методом конечных элементов произведено моделирование потока неньютоновских жидкостей в областях сложной формы. Было показано, что характер движения неньютоновских жидкостей зависит от реологических свойств жидкости и геометрии формы, что необходимо учитывать в процессах литья пластмасс и создании композиционных материалов.

В [9] представлен численный алгоритм расчёта установившегося ламинарного течения неньютоновской вязкопластичной жидкости в кольцевых

каналах с эксцентриситетом и вращением внутреннего цилиндра. Представленный алгоритм позволяет описывать данный класс течений в широком диапазоне изменений параметров кольцевого канала и режимов течения. Данные исследования имеют большой практический интерес, так как течение в кольцевых каналах широко распространено во многих технологических процессах: в теплообменниках, подшипниках скольжения, центрифугах, при бурении скважин. В работах [10, 11] данная модель хорошо распространена на турбулентное течение неньютоновских жидкостей, которое встречается гораздо чаще ламинарного течения.

В настоящее время, в виду остро вставшего вопроса разработки низкопроницаемых нефтяных пластов, извлечение нефти из которых традиционными способами нерентабельно, стала популярна технология гидроразрыва пласта (ГРП). ГРП – это технологический процесс, при котором в горных породах под воздействием избыточного давления, создаваемого закачкой в скважину жидкости разрыва, образуются трещины, открывающие высокопроводящие пути, позволяющие легко проходить пластовому флюиду через плотные горные породы в ствол скважины. Для предотвращения смыкания трещины вместе с жидкостью в скважину подают расклинивающий наполнитель – пропант (отсев кварцевого песка, керамические шарики и другие материалы фракции 0.5–1.5 мм), который удерживает трещину от смыкания после снятия избыточного давления и обеспечивает приток пластовой жидкости в скважину.

К жидкостям разрыва применяется ряд требований, основным из которых является удерживающая способность расклинивающего материала. Для достижения требуемых параметров скорости осаждения расклинивающего материала обычно в качестве рабочей жидкости ГРП применяют растворы с использованием высокомолекулярных

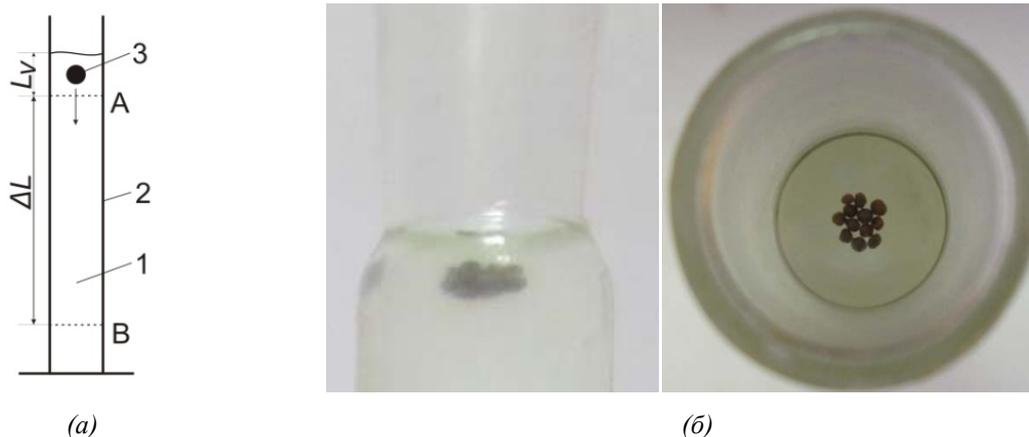


Рис. 1. Вискозиметр с падающим шаром: а – схема; б – пропант в гуаре в подвешенном состоянии

полимеров, такие жидкости разрыва являются неньютоновскими.

В [12, 13] рассмотрены реологические и пескоудерживающие свойства жидкости для гидроразрыва пласта на основе вязкоупругого ПАВ. Исследованию подвергались жидкости разрыва на основе вязкоупругих ПАВ производства АО «Полиэкс» – Сурфогель марки Д, тип 70–100, которые показали перспективность использования в операциях ГРП. Для них характерны высокая проводимость пропантной упаковки (в среднем в 2.7 раза больше, по сравнению с стандартной жидкостью ГРП на гуаровой основе), низкая коагулирующая способность (способность проникать в поры и трещины горных пород) в виду отсутствия полимерной фазы, длительное сохранение заданных свойств, лёгкость растворения.

Целью работы является разработка и калибровка оригинального вискозиметра (ротационного реометра) для исследования реологического поведения жидкостей ГРП на основе вязкоупругого ПАВ и на основе гуара в широком диапазоне скоростей сдвига, в том числе проведение экспериментов по методу Стокса, позволяющих определять значения динамической вязкости практически при нулевой скорости, так как ротационный реометр в диапазоне малых скоростей сдвига может давать существенную погрешность. Также проведена валидация экспериментальных данных, полученных с помощью оригинальной установки по измерению вязкости неньютоновских жидкостей, как при низких, так и при высоких скоростях сдвига. Проводимые исследования имеют большое значение для дальнейшего использования на практике и определения параметров разрабатываемой математической модели, описывающей поведение жидкостей на основе вязкоупругих ПАВ [14].

2. Измерение вязкости методом Стокса

Вискозиметр с падающим шаром (по методу Стокса) используется для измерения вязкости прозрачных систем, таких как газы и жидкости с низкой или средней вязкостью [1]. Схема такого вискозиметра показана на рис. 1. Исследуемую жидкость 1 помещают в стеклянную измерительную трубку 2, на которой нанесены отметки А и В на расстоянии ΔL друг от друга. Шарик (частица пропанта) 3 опускали в трубку с жидкостью. При движении от исходного положения, в начале трубки, шарик ускоряет движение на участке L_v , а затем начинает двигаться равномерно с постоянной скоростью. Измеряли время Δt , необходимое шару для прохождения расстояния между отметками А и В. Измеренную величину Δt использовали для расчёта динамической вязкости по формуле:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_1 - \rho_2)g \frac{R^2}{\Delta L} \Delta t, \quad (1)$$

где η – вязкость жидкости, R – радиус шара; ρ_1 – плотность шара, ρ_2 – плотность исследуемой жидкости, g – ускорение свободного падения.

Дополнительно была проведена оценка плотности жидкостей ГРП на основе вязкоупругого ПАВ и гуара, и получены их значения $1004 \pm 29 \text{ кг/м}^3$ и $1141 \pm 29 \text{ кг/м}^3$, соответственно. Оценка плотности частиц пропанта дала значение $\rho_1 \sim 3659 \text{ кг/м}^3$, средний диаметр частиц пропанта $2R \sim 1.041 \text{ мм}$. Используя формулу (1), определяли значение динамической вязкости жидкости на основе вязкоупругого ПАВ, равное $\sim 28.1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, и значение динамической вязкости жидкости на основе гуара, равное $\sim 1.1 \text{ Па}\cdot\text{с}$. В отличие от гуара в

испытаниях с вязкоупругим ПАВ было отмечено, что частицы пропанта в жидкости на его основе может находиться долгое время во взвешенном состоянии (один час и более). Это связано с формированием градиента плотности (расслоением жидкости) по высоте в течение эксперимента. При этом жидкость на основе гуара оказалась менее стабильной и не подлежит долгому хранению в отличие от жидкости на основе вязкоупругого ПАВ, которая в закрытом состоянии сохраняет технологические параметры долгое время.

В работе проведена оценка числа Рейнольдса Re жидкостей вблизи падения шарика по формуле

ра скорость получалась равной $v \sim 1.1 \times 10^{-3}$ м/с и число Рейнольдса $Re \sim 5.1 \times 10^{-4}$. Установлено, что полученные значения числа Рейнольдса значительно меньше 1, что говорит об отсутствии турбулентного течения.

3. Измерение вязкости с помощью системы коаксиальных цилиндров

В лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН был изготовлен оригинальный вискозиметр с системой коаксиальных цилиндров

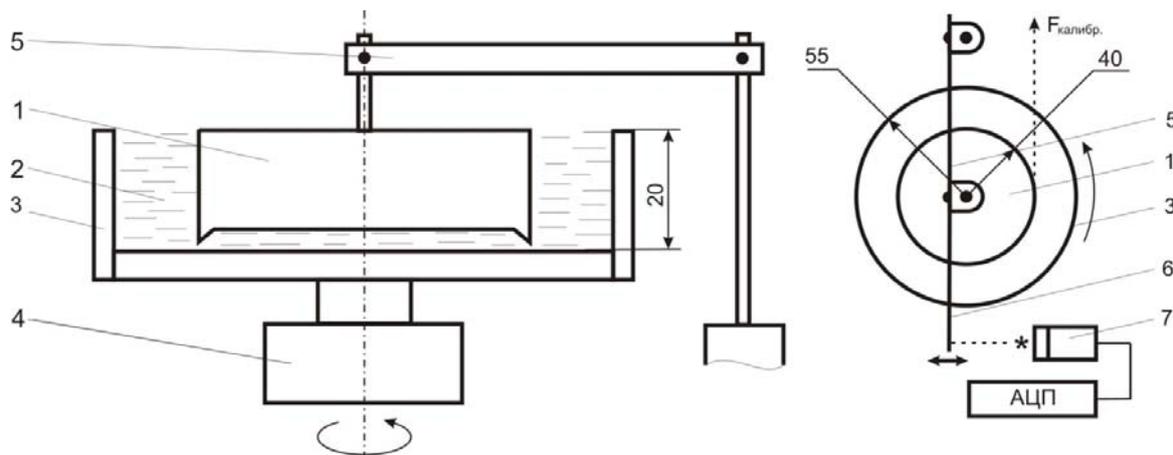


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования реологических свойств жидкостей: 1 – внутренний неподвижный цилиндр; 2 – исследуемая жидкость; 3 – внешний подвижный цилиндр; 4 – электропривод внешнего цилиндра; 5 – упругий элемент; 6 – шторка; 7 – высокоточный лазерный дальномер



Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки

$$Re = \rho_2 R \frac{V}{\eta}. \quad (2)$$

Для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ скорость движения пропанта была равна значению $v \sim 4.4 \times 10^{-5}$ м/с, тогда по формуле (2) число Рейнольдса $Re \sim 8.9 \cdot 10^{-7}$, для жидкости на основе гуа-

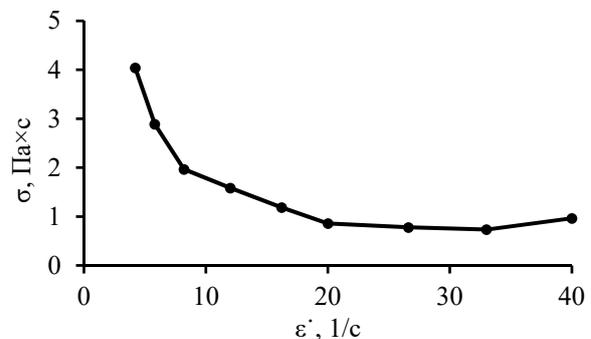


Рис. 4. Зависимость вязкости жидкости на основе вязкоупругого ПАВ от скорости сдвига, полученная на оригинальной установке (ротационный реометр) [1]. Ротационные вискозиметры позволяют измерить истинную или абсолютную вязкость как ньютоновских, так и неньютоновских (структурированных или реологических) сред. Схема установки представлена на рис. 2. Эксперименты проводились только с жидкостью на основе вязкоупругого ПАВ, а

динамическая вязкость жидкости на основе гуара данным методом не исследовалась, так как он обладает ярко выраженным эффектом Вайсенберга [1]. В конструкции движущее усилие прикладывается к внешнему цилиндру, вращение которого вызывает течение жидкости в кольцевом зазоре. Из-за сопротивления жидкости,

подвергаемой сдвигу, крутящий момент передаётся на внутренний цилиндр и так же вызывает его вращение. В измерительных системах куэртговского типа сохраняется ламинарный режим течения в широком интервале скоростей сдвига, поэтому такие реометры подходят для измерений при низких и высоких скоростях сдвига, при низких и высоких температурах, для жидкостей с низкой и высокой вязкостью. Кольцевой зазор между цилиндрами реометра имеет постоянную толщину, испытания могут проводиться с образцами жидкости, содержащими частицы, размер которых менее $1/3$ величины зазора [1].

Пространство между двумя коаксиальными цилиндрами 1 и 3 заполнялось исследуемой жидкостью 2. Шаговый двигатель 4 приводил во вращение внешний цилиндр с регулируемой линейной скоростью от 0.005 до 40 см/с, внутренний цилиндр закреплён через упругий элемент 5 к основанию. При приведении в движение внешнего цилиндра, за счёт вязких напряжений в исследуемой жидкости, внутренний цилиндр отклонялся, деформируя упругий элемент. Степень деформации упругого элемента предварительно была откалибрована с помощью приложения известной силы $F_{\text{калибр.}}$, приложенной к внутреннему цилиндру. Регистрация угла отклонения внутреннего цилиндра осуществлялась с помощью лазерного дальномера SIKC 7, с разрешением 2 мкм. Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 3.

Результаты измерения динамической вязкости жидкости на основе вязкоупругого ПАВ с исполь-

зованием оригинальной установки представлены на рис. 4.

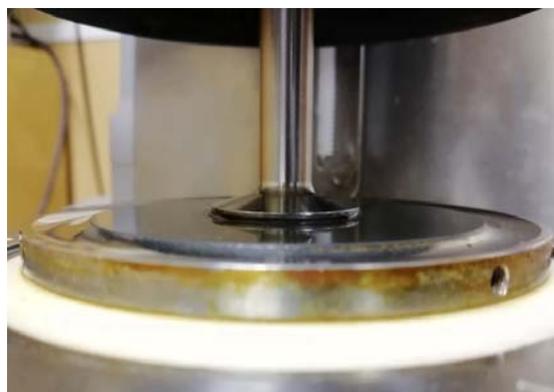
4. Измерение вязкости с помощью реометра типа «конус–плоскость»

Ротационные вискозиметры, изготовленные по типу «конус–плоскость» обеспечивают однородность скорости сдвига в измерительном зазоре. Такие вискозиметры применяют для измерения зависимости вязкости от скорости сдвига у вязкоупругих жидкостей, т.е. проявляющих ярко выраженный неньютоновский характер течения [1, 15]. Так, на базе кафедры физики фазовых переходов ПГНИУ (г. Пермь) с помощью реометра Physica MCR501 (Anton Paar GmbH, Австрия), имеющего измерительную систему «конус–плоскость» с диаметром конуса $d = 25$ мм, углом $\alpha = 1$, были исследованы вязкоупругие свойства жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ и на основе гуара. Данный реометр способен работать как в режиме контроля скорости сдвига, так и в режиме контроля напряжения сдвига и позволяет проводить реологические исследования в ротационном режиме (с угловой скоростью от 10^{-9} рад/сек до 314 рад/сек) и осцилляционном режиме (с частотой колебания конуса от 10^{-7} рад/сек до 628 рад/сек).

Результаты измерения динамической вязкости η жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ и на основе гуара, полученные разными методами, представлены на рис. 6 в зависимости от скорости деформации $\dot{\epsilon}$. Получено хорошее согласование с результатами измерений вязкости на оригинальной установке с коаксиальными цилиндрами. Определенные по формуле Стокса значения динамической вязкости для обеих жидкостей (крестики на рис. 6) близки к значениям, полученным на реометре при скоростях деформации близких к нулю. С увеличением скорости деформации значения динамической вязкости уменьшаются.



а)



б)

Рис. 5. Ротационный вискозиметр: а – внешний вид реометра Physica MCR501; б – исследуемая жидкость, помещённая между подвижным диском и столиком

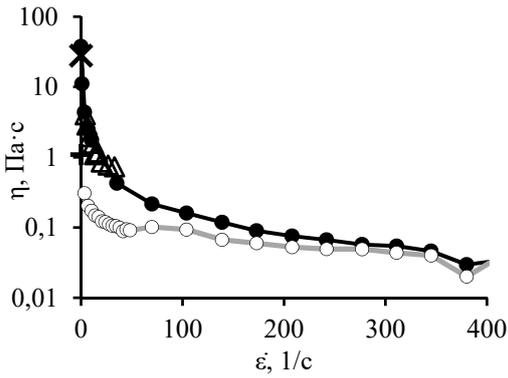


Рис. 6. Кривые вязкости жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (● – реометр Physica MCR501; X – метод Стокса; Δ – метод измерения вязкости с помощью коаксиальных цилиндров) и на основе гуара (○ – реометр Physica MCR501; + – метод Стокса) в зависимости от скорости деформации (вертикальная ось логарифмическая)

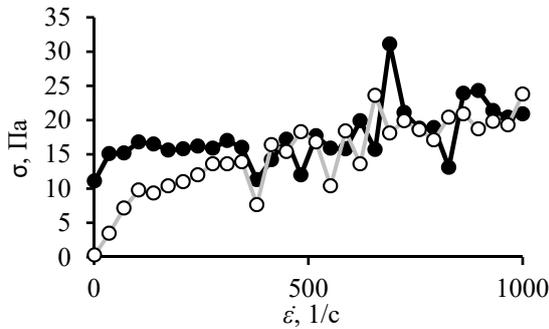


Рис. 7. Кривые течения жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (●) и на основе гуара (○)

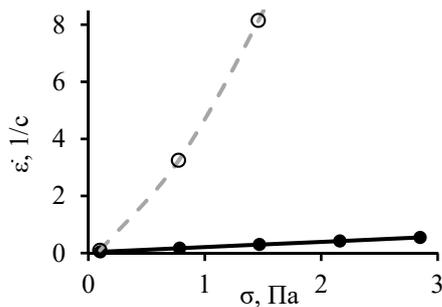


Рис. 8. Кривые текучности жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (сплошная) и на основе гуара (штриховая), полученные в эксперименте с заданным напряжением сдвига

На рис. 7 представлены кривые течения (сдвиговое напряжение σ , скорость деформации $\dot{\epsilon}$), которые иллюстрируют неустойчивое поведение

при скорости деформации более 380 с^{-1} , возможно, связанное с расслоением исследуемой жидкости или турбулизацией потока.

На рис. 8 представлены кривые текучности жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ и гуара, полученные в экспериментах с заданным напряжением σ . Диаграмма иллюстрирует отсутствие предельных напряжений в исследуемых жидкостях.

Испытания с осциллирующими напряжениями (динамические испытания) позволяют получить данные о вязкой и упругой реакциях образца жидкости в зависимости от скорости воздействия на него, иными словами, получить зависимость осциллирующего напряжения или деформации от заданной угловой скорости или частоты.

Динамические испытания позволяют исследовать комплексную вязкость, отражающую общее сопротивление динамическому сдвигу. Её можно разложить на две компоненты – запасенную (мнимую) вязкость (упругая компонента) и динамическую вязкость (вязкая компонента) [1].

На рис. 9 и 10 представлены результаты динамических исследований жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ и гуара. Эксперимент представляет из себя осцилляционный тест с колебаниями конуса реометра с фиксированной частотой 1 Гц в диапазоне изменения амплитуды колебаний от 0° до 2° .

На рис. 9 можно заметить, что область линейной вязкоупругости заканчивается (сплошные линии с кружками) примерно при скорости деформации 2 с^{-1} для обеих исследуемых жидкостей. При превышении порога вязкоупругости физические связи между молекулами и агрегатами исследуемого вещества разрушаются, наступает сдвиговое разжижение, и большая часть вводимой энергии необратимо переходит в тепло.

Также на рис. 9 можно заметить увеличение угла сдвига фаз у обеих исследуемых жидкостей (сплошные линии с треугольниками), что свидетельствует об изменении реакции от более упругой к более вязкой. В случае жидкости на основе вязкоупругого ПАВ это изменение особенно ярко выражается при возрастании скорости сдвига выше 2 с^{-1} .

На рис. 11 и 12 представлен аналогичный осцилляционный тест с фиксированной амплитудой колебания конуса реометра равной 1° в диапазоне частот от 1 до 10 Гц. Из графика на рисунке 11 видно, что угол сдвига фаз для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ слабо зависит от частоты колебания конуса в отличие от гуара, угол сдвига фаз которого увеличивается, а при частоте колебаний 5.5 Гц (скорость деформации 35 с^{-1}) становится равным 90° , что свидетельствует о полной потере

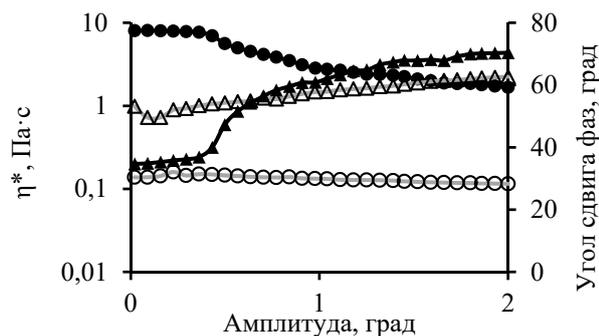


Рис. 9. Зависимость комплексной вязкости жидкостей от амплитуды колебаний конуса реометра (частота колебаний 1 Гц): комплексная вязкость жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (●) и на основе гуара (○), угол сдвига фаз жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (▲) и на основе гуара (Δ)

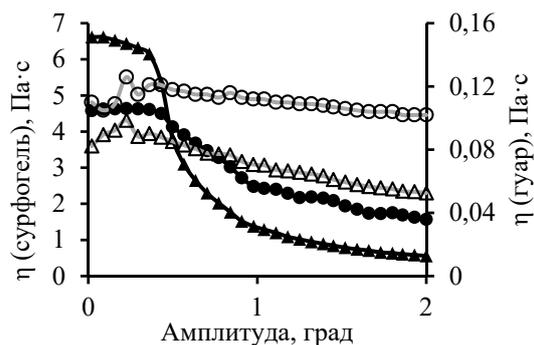


Рис. 10. Зависимость составляющих комплексной вязкости жидкостей от амплитуды колебаний конуса реометра (частота колебаний 1 Гц): вязкая для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (●) и на основе гуара (○), упругая для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (▲) и на основе гуара (Δ)

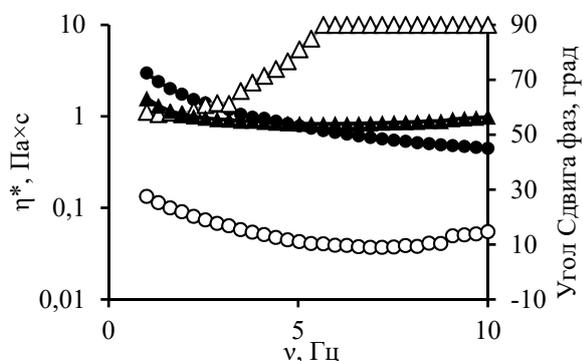


Рис. 11. Зависимость комплексной вязкости жидкостей от частоты колебаний конуса реометра (амплитуда колебаний 1°): комплексная вязкость жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (●) и на основе гуара (○), угол сдвига фаз жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (▲) и на основе гуара (Δ)

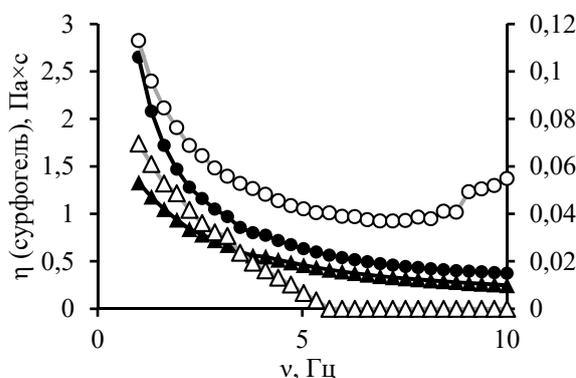


Рис. 12. Зависимость составляющих комплексной вязкости жидкостей от частоты колебаний конуса реометра (амплитуда колебаний 1°): вязкая для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (●) и на основе гуара (○), упругая для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ (▲) и на основе гуара (Δ)

упругой реакции и переходу к абсолютно вязкой жидкости. В [13] показано, что именно упругие свойства определяют несущую способность расклинивающего материала.

5. Заключение

В результате работы был осуществлён комплекс испытаний по определению реологических свойств жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д и на основе гуара. Проведена валидация вискозиметра оригинального изготовления, состоящего из соосных коаксиальных цилиндров и позволяющего измерять динамическую вязкость в широком диапазоне скоростей

сдвига, а также осуществлять визуальное наблюдение за исследуемой жидкостью. С использованием реометра Physica MCR501 исследованы вязкоупругие свойства жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ и на основе гуара. Жидкость на основе вязкоупругого ПАВ показала более высокую стабильность реологических свойств, заключающуюся в слабой зависимости от амплитуды осцилляций и частоты осцилляций в отличие от жидкости на основе гуара, утратившей упругие свойства при частоте осцилляций 5.5 Гц. Проведены квазистатические эксперименты по определению значений динамической вязкости жидкостей на основе ПАВ и гуара с использованием вискозиметра с падающим шаром (по методу Стокса). По-

лученные значения динамической вязкости хорошо согласуются между собой во всех типах используемых вискозиметров.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что использование применяемой в качестве пропантонесущей и пропантоудерживающей жидкости ГРП на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д (тип 70–100, производства АО «Полиэкс»), продемонстрировавшего более стабильные вязкоупругие свойства, является более перспективным, в отличие от популярных на сегодняшний день жидкостей ГРП на основе гуара.

Проведенные исследования реологических свойств жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ имеют большое прикладное и теоретическое значение в усовершенствовании технологии ГРП для добычи нефти и газа из трудноизвлекаемых источников. Реологические свойства жидкостей на основе вязкоупругих ПАВ при квазистатических и динамических нагружениях могут быть использованы при моделировании поведения таких жидкостей в процессах ГРП.

Авторы статьи выражают признательность АО «Полиэкс» за предоставление образцов исследуемых жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ и на основе гуара; сотруднику кафедры Физики фазовых переходов ПГНИУ Гилеву Валерию Григорьевичу за оказанную помощь при проведении исследования реологических свойств жидкостей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Пермского края (проект № 19-48-590016) и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (№ гос. рег. АААА-А19-119013090021-5).

Список литературы

1. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.
2. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.
3. Астарита Дж., Марруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 312 с.
4. Gongawane K. M., Manikandan B. Laminar natural convection characteristics in an enclosure with heated hexagonal block for non-Newtonian power law fluids // Chin. J. Chem. Eng. 2017. Vol. 25. P. 555–571.
5. Лоенко Д. С., Шеремет М. А. Численное моделирование естественной конвекции неньютоновской жидкости в замкнутой полости // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 1. С. 59–72. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-59-72
6. Zhang H., Kang Y., Xu T. Study on heat transfer of non-Newtonian power law fluid in pipes with different cross section // Procedia Engineering. 2017. Vol. 205. P. 3381–3388.
7. Димитриенко Ю. И., Шугуан Ли. Конечно-элементное моделирование неизотермического стационарного течения неньютоновской жидкости в сложных областях // Математическое моделирование и численные методы. 2018. № 2. С. 70–95.
8. Димитриенко Ю. И., Захарова Ю. В., Богданов И. О. Математическое и численное моделирование процесса фильтрации связующего в тканевом композите при RTM методе изготовления // Университетский научный журнал. 2016. № 19. С. 33–43.
9. Гаврилов А. А., Минаков А. В., Дектерев А. А., Рудняк В. Я. Численный алгоритм для моделирования установившихся ламинарных течений неньютоновских жидкостей в кольцевом зазоре с эксцентриситетом // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17. № 1. С. 44–56
10. Гаврилов А. А., Рудняк В. Я. Моделирование коэффициента молекулярной вязкости вязкопластичных жидкостей в турбулентных течениях // Доклады АН ВШ РФ. 2013. Т. 21. № 2. С. 55–66
11. Гаврилов А. А., Рудняк В. Я. Прямое численное моделирование турбулентных течений степенных жидкостей в круглой трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 4. С. 489–503
12. Шипилов А. И., Бабкина Н. В., Меньшиков И. А. Исследование свойств технологической жидкости для гидроразрыва пласта на основе вязкоупругих ПАВ // Нефтяное хозяйство. 2018. № 3. С. 30–31. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-3-30-32
13. Шипилов А. И., Крутихин Е. В., Гоголишвили О. Ш. Исследования вязкоупругих и пескоудерживающих свойств жидкости гидроразрыва пласта на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ // Нефтепромысловое дело. 2019. Т. 509. № 5. С. 17–23
14. Bayandin Y., Bilalov D., Naimark O., Krutikhin E., Zhuravlev V. Rheological model of viscoelastic surfactants under quasistatic and dynamic influences // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2216, 020001. DOI: 10.1063/5.0005279
15. Скульский О. И. Реометрические течения концентрированных суспензий твёрдых частиц // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 3. С. 269–278. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.21

References

1. Shramm G. *Osnovy prakticheskoy reologii i reometrii* (Fundamentals of practical rheology and rheometry). Moscow: Koloss, 2003. 312 p. (In Russian)
2. Wilkinson W. L. *Non-Newtonian fluids*. New York: Pergamon Press, 1960. 138 p.
3. Astarita Dzh., Marruchchi Dzh. *Osnovy gidromekhaniki nen'yutonovskih zhidkostej* (Fundamentals of hydro-mechanics of non-Newtonian fluids). Moscow: Mir, 1978. 312 p.
4. Gongawane K. M., Manikandan B. Laminar natural convection characteristics in an enclosure with heated hexagonal block for non-Newtonian power law fluids. *Chin. J. Chem. Eng.* 2017. vol. 25, pp. 555–571.
5. Loenko D. S., Sheremet M. A. Numerical simulation of natural convection of a non-Newtonian fluid in a closed cavity. *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 25, pp. 555–571. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-59-72
6. Zhang H., Kang Y., Xu T. Study on heat transfer of Non-Newtonian power law fluid in pipes with different cross section. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 205, pp. 3381–3388.
7. Dimitrienko Yu.I., Shuguan Li. Finite-element modeling of non-isothermal steady flow of a non-Newtonian fluid in complex areas. *Mathematical Modeling and Numerical Methods*. 2018, no. 2, pp. 70–95 (In Russian).
8. Dimitrienko Yu. I., Zaharova Yu. V., Bogdanov I. O. Mathematical and numerical modeling of the process of filtering a binder in a fabric composite with the RTM method of manufacturing. *University Scientific Journal*. 2016, no. 19, pp. 33–43 (In Russian).
9. Gavrilov A. A., Minakov A. V., Dekterev A. A., Rudnyak V. Ya. A numerical algorithm for modeling steady-state laminar flows of non-Newtonian fluids in an eccentric annular gap. *Computational Technologies*, 2012, vol. 17. no 1, pp. 44–56 (In Russian).
10. Gavrilov A. A., Rudnyak V. Ya. Modeling of molecular viscosity coefficient of viscoplastic fluids in turbulent flows. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2013, vol. 21, no.2, pp. 55–56 (In Russian).
11. Gavrilov A. A., Rudnyak V. Ya. Direct numerical simulation of turbulent flows of power-law fluids in a circular tube. *Thermal Physics and Aeromechanics*. 2016. vol. 23. no. 4, pp. 489–503.
12. Shipilov A. I., Babkina N. V., Menshikov I. A. Research of technological composition for hydrofracturing based on viscoelastic surfactants. *Oil Industry*. 2018. no. 3, pp. 30–31. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-3-30-32 (In Russian).
13. Shipilov A. I., Krutihin E. V., Gogolishvili O. Sh. Studies of the viscoelastic and sand-retaining properties of a hydraulic fracturing fluid based on viscoelastic surfactants. *Oilfield Business*, 2019, vol. 509. no. 5, pp. 17–23 (In Russian).
14. Bayandin Y., Bilalov D., Naimark O., Krutihin E., Zhuravlev V. Rheological model of viscoelastic surfactants under quasistatic and dynamic influences; *AIP Conference Proceedings*. 2020, vol. 2216, 020001. DOI: 10.1063/5.0005279
15. Skul'skiy O.I. Rheometric flows of concentrated suspensions of solid particles. *Computational Continuum Mechanics*, 2020. vol. 13, pp. 269–278. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.21 (In Russian)

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ефремов Д. В., Банникова И. А., Баяндин Ю. В., Крутихин Е. В., Журавлёв В. А. Экспериментальное исследование реологических свойств жидкостей для гидроразрыва пласта // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 4. С. 69–77. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-69-77

Please cite this article in English as:

Efremov D. V., Bannikova I. A., Bayandin Y. V., Krutihin E. V., Zhuravlev V. A. Experimental study of rheological properties of liquids for hydrofracturing. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 4, pp. 69–77. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-69-77