

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СРЕД (РАСТВОРОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ПАВ) ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ *

Ю.В. Баяндин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*
С.В. Уваров, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*
Н.В. Савельева, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*
И.А. Банникова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*
Д.Р. Ледон, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*
Д.В. Ефремов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*
Е.В. Крутихин, *АО «Полиэкс»*
В.А. Журавлев, *АО «Полиэкс»*

Для цитирования:

Баяндин Ю.В., Уваров С.В., Савельева Н.В., Банникова И.А., Ледон Д.Р., Ефремов Д.В., Крутихин Е.В., Журавлев В.А. Экспериментальное и теоретическое исследование реологических свойств неньютоновских сред (растворов вязкоупругих ПАВ) при квазистатическом и динамическом нагружениях // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 1. – С. 26–46. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.3>

Объектом исследования являются жидкости на основе вязкоупругого поверхностно активного вещества (ПАВ) марки Д (тип 70–100, производства АО «Полиэкс») и на основе гуара. Данные жидкости применяются для технологии гидроразрыва пласта (ГРП) в качестве пропантонесущей и пропантоудерживающей жидкости ГРП с целью повышения нефтеотдачи, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа. Работа посвящена разработке реологической модели поведения вязкоупругих жидкостей в широком диапазоне скоростей сдвига, характерных для ГРП.

Актуальной научной проблемой является обоснование выбора концентрации вязкоупругого ПАВ при изготовлении жидкости разрыва (ЖР). В отечественной практике принято применение жидкости разрыва с эффективной вязкостью $0,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ($=400 \text{ сП}$) при скорости деформации 100 с^{-1} и температуре, равной среднему арифметическому между температурой пласта и устья. В последние годы в зарубежной литературе всё чаще упоминается об упругой составляющей жидкости разрыва как наиболее адекватной характеристике, коррелирующей с пропантоудерживающей

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590016.

способностью жидкости (невязкая составляющая). В настоящее время востребованы модели поведения пропантонесущих вязкоупругих жидкостей (вязкоупругих растворов ПАВ) в процессах гидроразрыва пласта.

В связи с этим возникает необходимость в разработке математических моделей и методик расчета пропантоудерживающей способности ЖР в зависимости от ее вязкоупругих характеристик.

Целью работы являлось развитие математической модели поведения растворов вязкоупругих ПАВ, разработка подходов и методики идентификации параметров модели Леонова-Прокунина, которая позволяет адекватно описать как процесс стационарного течения жидкости, так и динамическое нагружение в режиме осцилляций и ударно-волновом нагружении. Результатом проекта является методика идентификации параметров модели поведения растворов вязкоупругих ПАВ по данным статических и динамических испытаний, которая может быть использована в коммерческих решателях по гидроразрыву пласта.

***Ключевые слова:** растворы вязкоупругих ПАВ, неньютоновская жидкость, реология, обобщённая модель Максвелла, спектр времён релаксации, ударные волны.*

Введение

Актуальной задачей является обоснование выбора концентрации вязкоупругого ПАВ при приготовлении жидкости разрыва (ЖР). В отечественной практике принято применение жидкости разрыва с эффективной вязкостью $0,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ($=400 \text{ сП}$) при скорости деформации 100 с^{-1} и температуре, равной среднему арифметическому между температурой пласта и устья. В последние годы в зарубежной литературе всё чаще упоминается об упругой составляющей ЖР как наиболее адекватной характеристике, коррелирующей с пропантоудерживающей способностью [1–3] (невязкая составляющая). В связи с этим возникает необходимость в разработке математических моделей и методик расчета пропантоудерживающей способности ЖР в зависимости от ее вязкоупругих характеристик.

Рейнольдс впервые обратил внимание на неньютоновское поведение простых жидкостей при сдвиговом течении [4], которое связывалось с неравновесными (вязкоупругими) эффектами сдвиговой и объемной (локальное изменение плотности) дисторсии, обусловленными структурой жидкости. Молекулярно-динамическое моделирование [5] механизмов переноса в простых жидкостях подтвердило результаты [6] о существовании длинновременных составляющих релаксационного спектра.

Это соответствует данным по измерению сдвиговых модулей и релаксационных спектров при наложении осцилляций на сдвиговое течение простых жидкостей [7], когда эффекты сдвиговой упругости наблюдались при частотах 10^5 Гц .

Присутствие длинновременной части спектра с характерными временами 10^{-5} с связывается с согласованным перемещением и переориентацией групп молекул, что сопряжено с существенно большими характерными временами. Это предположение косвенно подтверждается в [8] при изучении релаксационных явлений в жидкостях на фронте ударных волн, когда для скоростей деформации 10^5 с^{-1} значения вязкости ряда жидкостей оказались аномально высокими и близкими к таковым для твёрдых тел $\sim 10^3\text{--}10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Первые экспериментальные наблюдения и теоретическое обоснование существования вязкостных эффектов в ударно-нагруженных средах были описаны в работах [9–11], в которых получены универсальные асимптотики вязкости исследованных конденсированных (жидких и твердых) сред и времена релаксации простых жидкостей, отличающиеся на шесть порядков от дебаевских. На данный момент исследования релаксационных свойств жидкостей в условиях ударно-волнового нагружения можно связать с

работами [12–15], в которых проведены эксперименты по исследованию прочности жидкостей в условиях импульсного растяжения, реализующегося при взаимодействии треугольного импульса сжатия со свободной поверхностью.

В работе [14] показано, что откольная прочность в глицерине увеличивалась с ростом скорости деформации. В работах [13, 16] разрабатывается теоретическая модель разрушения, учитывающая образование и инерционное расширение пузырей при положительных давлениях, которая описывает экспериментально полученные закономерности явления откола в жидкостях.

Целью данной работы является реализация методики идентификации констант реологических моделей для вязкоупругих жидкостей (растворов ПАВ), методов моделирования реологического поведения в широком диапазоне скоростей деформирования. Определение констант используемой реологической модели проводилось на основе стандартных испытаний с использованием оригинального как ротационного реометра, так и промышленных реометров. Оценка динамических характеристик (модуль накоплений G' и модуль потерь G'') проводилась в режиме осцилляций для диапазона частот, сопоставимых с эксплуатационными временами жидкостей ГРП.

Приведены результаты квазистатических испытаний по определению значений динамической вязкости исследуемых вязкоупругих жидкостей, которые проведены с использованием вискозиметра с падающим шаром, в качестве которого выступает частица пропанта (по методу Стокса). Вязкоупругие свойства жидкостей, в том числе с добавлением частиц пропанта, исследованы с использованием реометров, имеющих измерительную систему «конус-плоскость» и «цилиндр-цилиндр».

Экспериментальное исследование поведения при ударно-волновом нагружении дистиллированной воды, жидкостей на основе гуара и вязкоупругого ПАВ проводились в условиях электровзрыва

провода. Измерения скорости свободной поверхности жидкостей при ударно-волновом нагружении проводились с использованием доплеровской интерферометрии VISAR. По экспериментальным зависимостям скорости свободной поверхности определялись значения амплитуд импульса сжатия и скорости деформации на фронте волны сжатия и разрежения на различных расстояниях от места инициирования взрыва проводника. Определяемые по величине откольного импульса значения динамической прочности могут быть учтены при образовании кавитационных пузырей в возможных зонах разрежения в процессах ГРП.

Экспериментальная установка по исследованию реологических свойств жидкостей

Рассмотрены два состава образцов жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ СУРФОГЕЛЬ® марки Д (тип 70–100 и тип 40–70) и образец жидкости на основе гуара, которые были предоставлены АО «Полиэкс». Исследования проводились на реометре Grace M5600 HC-276 (АО «Полиэкс») с функцией динамических осцилляционных измерений (G', G'') при температуре $+25^\circ\text{C}$ при различных скоростях сдвига от 1 до 1000 1/с. Проведены измерения реологических характеристик при постоянной скорости сдвига (квазистатический тест) и осцилляционные испытания (динамический тест). Получены зависимости сдвигового напряжения от скорости сдвига по данным статических тестов и зависимости модуля накоплений (G') и модуля потерь (G'') при различных частотах в динамических тестах. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что все представленные образцы жидкостей проявляют вязкоупругое поведение.

1. При увеличении скорости сдвига вязкость жидкостей значительно падает.

2. Жидкость на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д (тип 70–100) при амплитуде колебаний 100% на частотах выше 4 Гц ведет себя как упругое тело.

3. Жидкость на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д (тип 40–70) при амплитуде колебаний 100% на частотах выше 1,13 Гц ведет себя как упругое тело.

4. Жидкость на основе гуара при амплитуде колебаний 100% на частотах выше 0,38 Гц ведет себя как упругое тело.

В лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН разработана и собрана оригинальная установка для исследования реологических свойств вязкоупругих жидкостей с измерительной схемой «цилиндр-цилиндр». Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Пространство между двумя коаксиальными цилиндрами 1 и 2 заполнено исследуемой жидкостью 3. Шаговый двигатель 4 приводит 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 отклоняется, деформируя упругий элемент. Степень деформации упругого элемента была предварительно откалибрована с помощью приложения известной силы $F_{\text{калибр}}$ к внутреннему цилиндру. Регистрация угла отклонения внутреннего цилиндра осуществлялась с помощью лазерного дальномера СИКС 7, с разрешением 2 мкм.

Проведено сравнение измеренных значений вязкости для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ при различных скоростях сдвига с использованием оригинальной установки и реометра Grace M5600 при температуре +25°C (рис. 2).

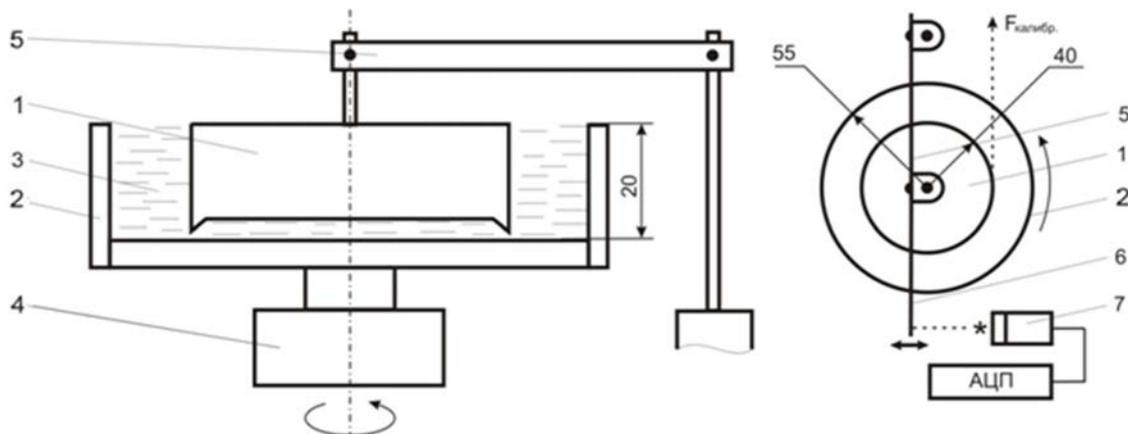


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования реологических свойств жидкости:
1 – внутренний неподвижный цилиндр; 2 – внешний подвижный цилиндр;
3 – жидкость; 4 – электропривод; 5 – упругий элемент; 6 – шторка;
7 – высокоточный лазерный дальномер

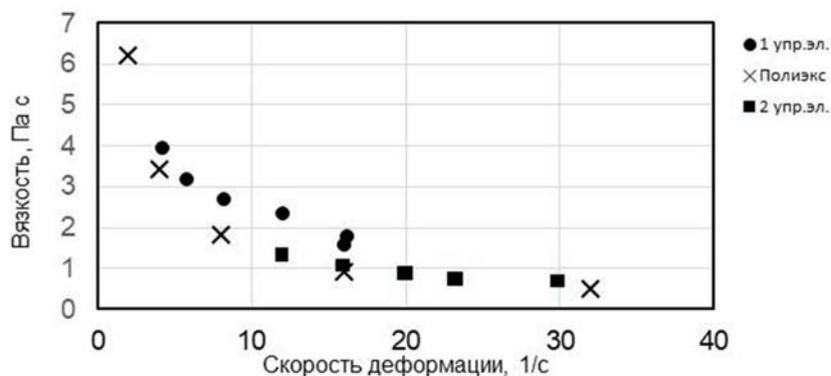


Рис. 2. Сравнение результатов измерения значений вязкости ПАВ «Сурфогеля» марки Д при различных скоростях вращения на оригинальной установке и реометре Grace M5600 при температуре +25°C

Полученные результаты хорошо соотносятся друг с другом, что подтверждает произведенную калибровку лабораторной установки и дальнейшее ее использование. Проведены измерения вязкости для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д (тип 70–100) и жидкости на основе гуара (рис. 3). Установлено, что при низких скоростях деформации (сдвига) вязкость жидкости на основе гуара значительно ниже вязкости жидкости на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д, а при высоких значениях скоростей сдвига вязкость обеих жидкостей приближается к вязкости воды (асимптотической вязкости). Таким образом, реологическое поведение исследуемых жидкостей является нелинейным и проявляет вязкоупругие свойства, что требует применения моделей неньютоновского (максвелловского) типа.

Идентификация констант реологической модели вязкоупругой жидкости

В современных симуляторах гидро-разрыва пласта для эффективности ускорения расчетов используются довольно простые реологические модели [17–19].

Так в большинстве подходов жидкость разрыва представляется ньютоновской (линейно вязкой) или нелинейной квазиньютоновской (псевдопластической) жидкостью с эффективной вязкостью, зависящей как от компонентного состава, так и от параметров процесса. Учет упругой составляющей гелеобразующих реагентов в растворах ПАВ недостаточно исследован, поэтому необходима разработка физически обоснованных моделей, учитывающих их вязкоупругие свойства.

Достаточно большое количество моделей реологического течения было предложено для полимерных растворов, но только некоторые из них используются достаточно широко, другие не используются, возможно, в силу своей громоздкости или сложности идентификации параметров моделей по данным реологических экспериментов. Наиболее распространенные модели, являющимися обобщением теории течения Максвелла: Oldroyd-B [20], К-ВКЗ [21], Giesekus [22], Phan-Thien-Tanner (PTT) [23], Leonov-Prokunin [24, 25], Vinogradov-Pokrovskii (MVP) [26, 27].

В линейной области вязкоупругости большинство моделей дают близкие результаты как для статических значений

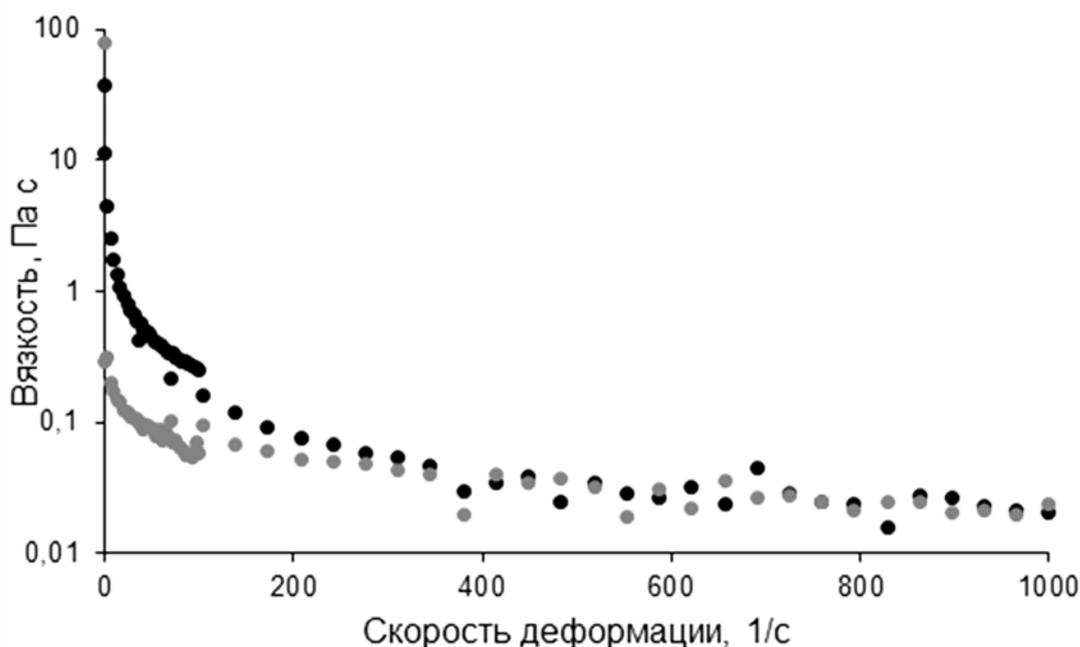


Рис. 3. Вязкость жидкостей на основе ПАВ «Сурфогеля» марки Д (маркеры ●) и на основе гуара (маркеры ●)

вязкости, так и для динамических характеристик (компонент комплексного модуля упругости G' и G''). Различия наблюдаются в нелинейной области проявления вязкоупругости. Модель Oldroyd-B описывает поведение линейной вязкоупругой среды и применима в основном для жидкостей с постоянной сдвиговой вязкостью.

Остальные указанные модели учитывают нелинейные эффекты вязкости. Модели типа Giesekus и РТТ допускают формулировку определяющих соотношений в дифференциальной форме с одним или двумя параметрами нелинейности, соответственно, и позволяют использовать разделение тензора вязких напряжений на вклад полимера и растворителя. Реологическая модель К-ВКЗ сформулирована в интегральной форме и является наиболее используемой для простых течений, например сдвиговых. Недостатком последней является трудность определения интегрального ядра для сложных течений жидкостей. Модели Виноградова-Покровского и Леонова-Прокунина менее распространены, так как описание трехмерных течений вызывает определенные трудности в идентификации параметров.

Гелеобразующие реагенты представляют собой мицеллярный раствор вязкоупругого ПАВ. Мицеллярные растворы являются термодинамически устойчивыми системами и состоят из неполярных углеводородных цепей молекул ПАВ. Таким образом, механические свойства (в частности реологические) вязкоупругих

растворов ПАВ можно рассматривать с тех же позиций, что и растворы полимеров. Для описания вязкоупругой реологии жидкости применялась модель Леонова-Прокунина, так как в ней явно учитываются упругие и вязкие составляющие деформации цепочек молекул ПАВ с позиций неравновесной термодинамики.

Преимуществом моделей данного типа является термодинамическое описание упругого вклада явным введением потенциальной энергии взаимодействия полимерных цепочек, которая в свою очередь зависит от внутренних переменных, характеризующих их деформационные свойства. Структурно-механическая модель представляет собой множество параллельно соединенных цепочек Максвелла с заданными значениями времени релаксации и модуля сдвига (рис. 4).

Ниже приведены разрешающие зависимости для стационарного напряжения течения в зависимости от сдвиговой скорости деформации

$$\frac{\sigma}{G} = s\Gamma + \sum_{k=1}^N v_k \frac{2\Gamma\lambda_k}{1 + \sqrt{1 + 4\lambda_k^2\Gamma^2}}, \quad (1)$$

где σ – напряжение сдвига, $\Gamma = \dot{\gamma}\theta$ – безразмерная скорость сдвига, s , v_k , λ_k – безразмерные параметры модели. Здесь вязкость всей системы определяется как $\eta = G\theta$, G – модуль сдвига, θ – время релаксации, параметр $0 \leq s < 1$ характеризует вклад линейной (ньютоновской) вязкости, дополнительные слагаемые под суммой определяют нелинейный вклад в

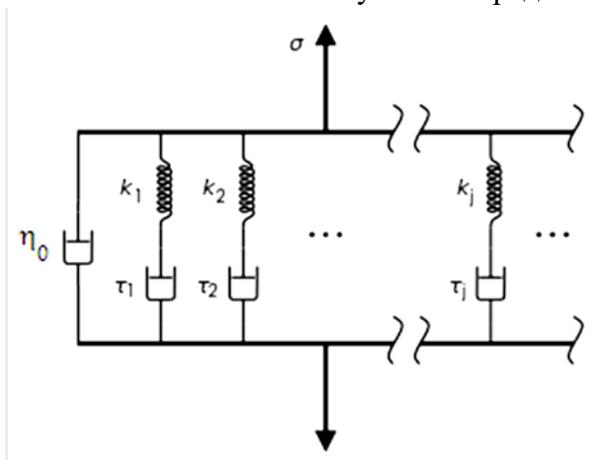


Рис. 4. Структурно-механическая схема реологической модели

вязкость, а безразмерные параметры задают отношение времен релаксации $\lambda_k = \theta_k / \theta$ и модулей сдвига $\nu_k = G_k / G$ для N параллельно соединенных максвелловских элементов, соответственно.

На основе уравнений модели Леонова-Прокунина сформулирована задача идентификации параметров модели в форме минимизации невязки между расчетными и экспериментальными значениями напряжений течения и динамических модулей (G' и G''). Задача решалась таким образом, чтобы подобрать параметры модели, которые достаточно хорошо аппроксимируют оба вида испытаний – статический и осцилляционный. Таким образом, задача определения неизвестных безразмерных параметров $\theta_k, \nu_k, \theta, s$ по данным статических экспериментов имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^M |\sigma(\theta_k, \nu_k, \theta, s, \dot{\gamma}_i) - \sigma^{\text{exp}}(\dot{\gamma}_i)|^2 \rightarrow \min \\ \theta_k \geq 0, k = 1, \dots, N \\ \nu_k \geq 0, k = 1, \dots, N \\ \theta \geq 0 \\ 0 \leq s \leq 1 \end{array} \right. , (2)$$

где $\sigma^{\text{exp}}(\dot{\gamma}_i)$ – экспериментально измеренное сдвиговое напряжение при заданной скорости сдвига $\dot{\gamma}_i$, M – количество экспериментальных точек. N было принято равным 2, что является достаточным для описания нелинейного характера поведения рассматриваемых жидкостей. Установлено, что $N < 2$ является недостаточным для удовлетворительной аппроксимации экспериментальных данных, а $N > 2$ не даёт лучшего результата для рассматриваемых жидкостей.

Установлено, что для описания реологического поведения рассматриваемых жидкостей достаточно использовать два максвелловских элемента, соединенных параллельно с классическим ньютоновским элементом, характеризующим асимптотическую вязкость. По-

ставленная задача оптимизации решалась численно методом прямого поиска. Задача идентификации реализована в виде отдельного программного модуля в пакете прикладных программ MATLAB. Входными данными являются экспериментальные зависимости сдвигового напряжения от скорости деформации (сдвига) и зависимости динамических модулей G' и G'' от частоты осцилляций. Результаты задачи идентификации параметров модели представлены в таблице и на графиках (рис. 5).

Таблица

Физические параметры модели, определенные из задачи идентификации для жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д и на основе гуара

| Параметр модели | ПАВ «Сурфогель» марки Д | Гуар |
|-------------------|-------------------------|--------|
| η_0 , [Па·с] | 0,012 | 0,0001 |
| η_1 , [Па·с] | 30 | 4,3 |
| τ_1 , [с] | 0,84 | 3,2 |
| η_2 , [Па·с] | 0,8 | 0,6 |
| τ_2 , [с] | 0,05 | 0,007 |
| ω^* , [Гц] | 1,2 | 0,3 |
| α | 2 | 1 |

Построенная методика идентификации параметров модели позволила адекватно описать реологические свойства жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д и жидкости на основе гуара. С целью верификации определенных параметров модели было произведено сопоставление характерных частот колебаний ω^* , которые обратно пропорциональны характерным временам релаксации максвелловских элементов и приведены также в таблице. Полученные численные значения частот достаточно хорошо согласуются с экспериментально установленными значениями.

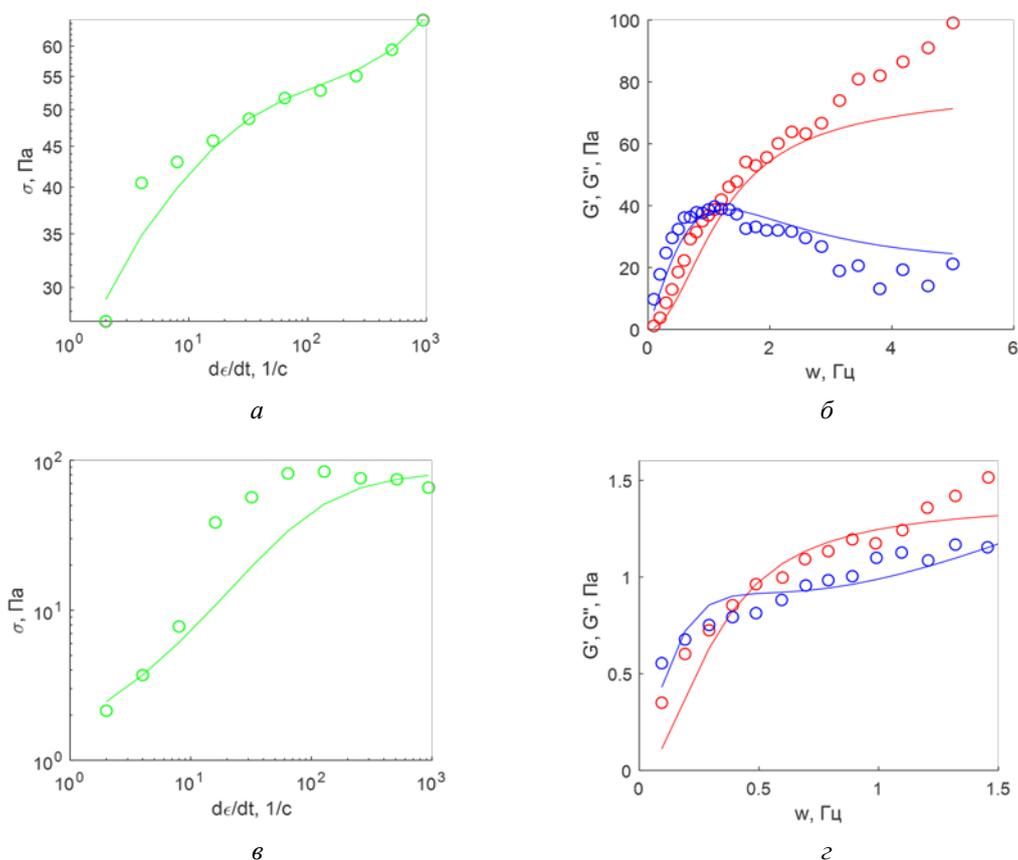


Рис. 5. Сравнение теоретических кривых с экспериментальными данными:

а – зависимость напряжения течения для ПАВ «Сурфогеля» марки Д,

б – зависимости модулей G' и G'' для ПАВ «Сурфогеля» марки Д,

в – зависимость напряжения течения для гуара, г – зависимости модулей G' и G'' для гуара

Определение констант используемой реологической модели проведено на основе стандартных испытаний с использованием ротационного реометра. Оценка динамических характеристик (модуль накоплений G' и модуль потерь G'') проводилась в режиме осцилляций для диапазона частот, сопоставимых с эксплуатационными временами жидкостей ГРП. Проведены экспериментальные исследования двух жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д и гуара с использованием реометра Grace M5600 НРНТ.

Показана применимость реологической модели вязкоупругой жидкости Леонова–Прокунина как для статических реологических тестов, так и для осцилляционных (динамических) испытаний. Установлено, что в осцилляционном тесте до 0,3 Гц (точка пересечения зависимостей G' и G'') жидкость на основе гуара ведет себя как ньютоновская, а для частот

больше 0,3 Гц – как максвелловская жидкость, соответственно. Для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д характерная частота перехода к вязкоупругому поведению в осцилляционном тесте принимает большее значение, равное 4 Гц.

Реологические свойства жидкостей ГРП с учетом влияния пропанта

Вязкоупругие свойства жидкостей исследованы с использованием реометров, имеющих измерительную систему «конус-плоскость» и «цилиндр-цилиндр», в том числе с помощью реометра оригинального изготовления по типу коаксиальных цилиндров, описанного выше. Реологические свойства жидкости на основе вязкоупругого ПАВ, в том числе с добавлением расклинивающего наполнителя – пропанта, исследовались с помощью реометра RheolabQS (Anton Paar

GmbH, Австрия), имеющего измерительную систему по типу коаксиальных цилиндров и реометра Physica MCR501 (Anton Paar GmbH, Австрия), имеющего измерительную систему «конус–плоскость» с диаметром конуса $d=25$ мм, углом $\alpha=1$, реометры с такой измерительной системой применяют для измерения зависимости вязкости от скорости сдвига у вязкоупругих жидкостей, т.е. проявляющих ярко выраженный неньютоновский характер течения [28, 29].

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/с до 314 рад/с) и осцилляционном режиме (с частотой колебания конуса от 10^{-7} рад/с до 628 рад/с) с заданной погрешностью измерения не более 3%. Исследования течения жидкостей в стационарном режиме приведены в статье [30], в осцилляционном режиме – в работе [31].

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 также вызывает его вра-

щение. Кольцевой зазор между цилиндрами реометра имеет постоянную толщину, испытания могут проводиться с образцами жидкости, содержащими частицы, размер которых менее $1/3$ величины зазора.

Результаты измерения динамической вязкости жидкости на основе вязкоупругого ПАВ, полученные с помощью реометра Physica MCR501, оригинального вискозиметра и определённые по методу Стокса при скоростях деформации, близких к нулю, представлены на рис. 6 в зависимости от скорости деформации. Полученные данные достаточно хорошо согласуются с результатами численного моделирования, проведенного на первом этапе выполнения проекта (первый раздел) [32].

Дополнительно проводились реологические исследования жидкости ГРП на основе вязкоупругого ПАВ, с добавлением расклинивающего материала – пропанта в виде алюмосиликатных шариков со средним диаметром 1,041 мм «Пропант 16/20» в концентрации 10 и 20% по массе, с использованием реометра RheolabQS (Anton Paar GmbH, Австрия) с измерительной геометрией в виде коаксиальных цилиндров с подвижным внутренним цилиндром, имеющим погрешность измерения 3–4%. Результаты измерения динамической вязкости жидкости на основе вязкоупругого ПАВ без пропанта и с

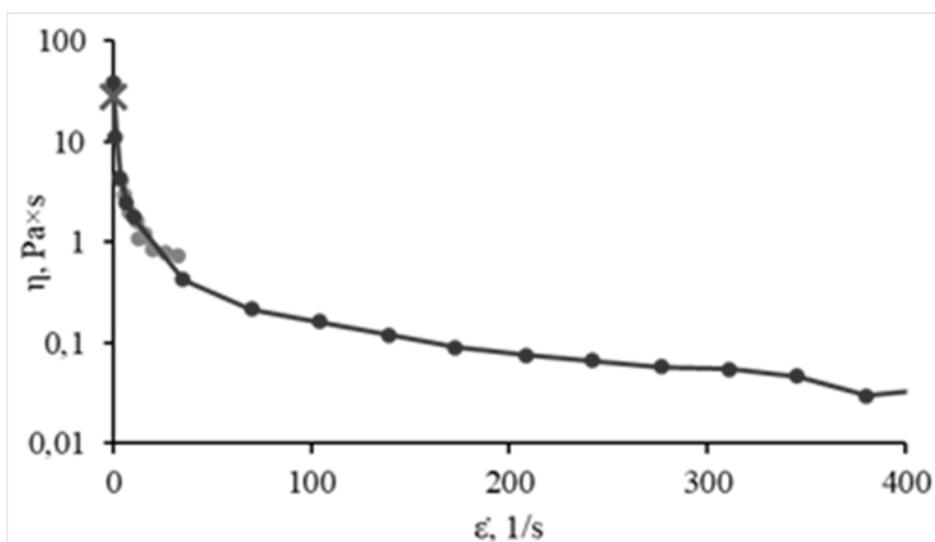


Рис. 6. Зависимости вязкости от скорости деформации (вертикальная ось логарифмическая) для жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (● – реометр Physica MCR501; ● – реометр оригинального изготовления; X – метод Стокса)

добавлением пропанта представлены на рис. 7. На рис. 8 представлены кривые течения (сдвиговое напряжение – скорость деформации) исследуемой жидкости. В проведённых исследованиях жидкость на основе вязкоупругого ПАВ показала стабильные реологические свойства в широком диапазоне скоростей деформации, в том числе с добавлением пропанта в концентрации 10 и 20% по массе.

Однако, стоит отметить, что при добавлении пропанта в исследуемую жидкость на кривых течения появляется «зуб текучести», аналогично кривым течения свойственным твёрдым кристаллическим телам [28]. При концентрации пропанта 20% начало кривой течения резко «поднялось», что свидетельствует о появлении предельных напряжений, вероятно, вызванных седиментацией и коагуляцией (слипанием) пропанта [33].

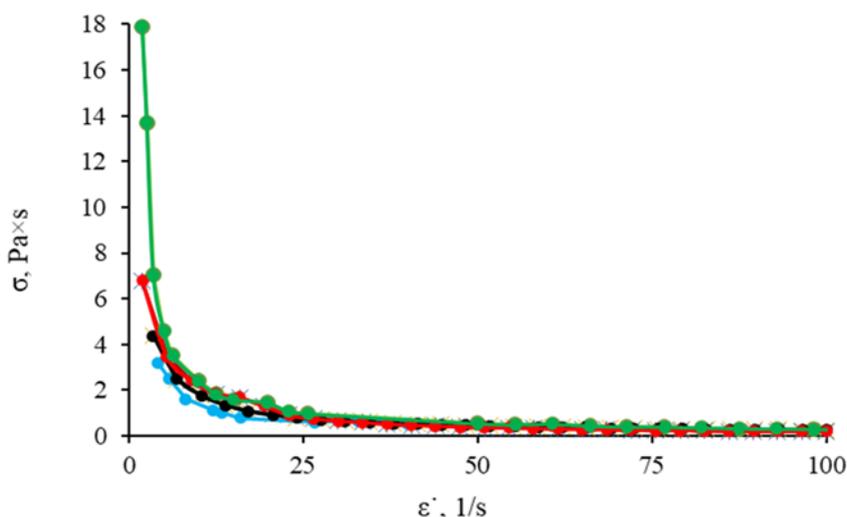


Рис. 7. Кривые вязкости жидкости на основе вязкоупругого ПАВ в зависимости от скорости деформации: ● – без пропанта, реометр RheolabQS; ● – с добавлением пропанта в концентрации 10 % реометр RheolabQS; ● – с добавлением пропанта в концентрации 20 % реометр RheolabQS; ● – с добавлением пропанта в концентрации 20 %, реометр оригинального изготовления

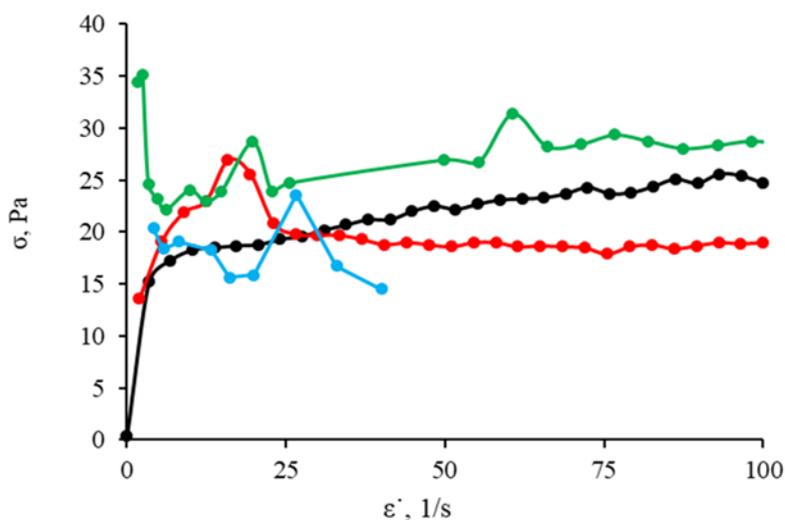


Рис. 8. Кривые течения жидкости на основе вязкоупругого ПАВ в зависимости от скорости деформации, на графике отмечено: ● – без пропанта, реометр RheolabQS; ● – с добавлением пропанта в концентрации 10 % реометр RheolabQS; ● – с добавлением пропанта в концентрации 20 % реометр RheolabQS; ● – с добавлением пропанта в концентрации 20 %, реометр оригинального изготовления

Проведено исследование реологического поведения жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ марки Д (тип 70–100, производства АО «Полиэкс») и на основе гуара в широком диапазоне скоростей деформирования. Квазистатические эксперименты по определению значений динамической вязкости исследуемых жидкостей проведены с использованием вискозиметра с падающим шаром (по методу Стокса). Вязкоупругие свойства жидкостей исследованы с использованием реометра Physica MCR501, имеющего измерительную систему «конус-плоскость» и с помощью реометра оригинального изготовления по типу коаксиальных цилиндров.

Реологические свойства жидкости на основе вязкоупругого ПАВ с добавлением расклинивающего наполнителя – пропанта, с целью предотвращения смыкания образовавшейся трещины, исследовались с помощью реометра RheolabQS имеющего измерительную систему по типу коаксиальных цилиндров. Проведён анализ реологических свойств жидкости на основе вязкоупругого ПАВ и установлено, что исследуемая жидкость имеет стабильные реологические свойства на всём интервале скоростей деформирования в том числе с добавлением пропанта в концентрации до 20%.

Экспериментальная установка по электровзрыву проводника

В настоящем разделе приведены экспериментальные исследования поведения жидкостей в условиях динамического нагружения под действием электрического взрыва проводника. Анализ экспериментальных данных проводится на основе результатов измерения профилей скорости свободной поверхности с использованием доплеровского измерителя скорости свободной поверхности жидкости VISAR. По профилям скорости свободной поверхности оценивались амплитуда импульса сжатия, откольная прочность жидкостей, скорость деформирования на фронте волны сжатия и разрежения, сдвиговая вязкость жидкостей.

Механические свойства жидкостей зависят от соотношений между временами релаксации среды и характерными временами нагружения аналогично твёрдым телам [7, 10, 34–38]. При интенсивных кратковременных воздействиях поведение среды нечувствительно к её агрегатному состоянию, следовательно, физические механизмы, отвечающие за реакцию на воздействие среды в этих условиях, должны быть подобными. Представляет значительный научный интерес описание поведения жидкостей при интенсивных кратковременных воздействиях на основе анализа кинетики флуктуаций, индуцированных структурными переходами. В настоящем разделе приведено экспериментальное исследование дистиллированной воды и вязкоупругих растворов ПАВ (на основе гуара и вязкоупругого ПАВ «Сульфогель» марки Д) в условиях ударно-волнового нагружения.

В работе ударно-волновое нагружение реализовывалось в лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН на установке электрического взрыва проволоки (ЭВП) в жидкости [39]. Для исследования образцы жидкости (растворы ПАВ) были предоставлены компанией АО «Полиэкс».

Экспериментальная установка ЭВП (рис. 9) состоит из цилиндрической кюветы (высота 8,5 см, диаметр 24 см, объемом ~5 литров), с вертикально установленным в центре проводником (длиной 20 мм, диаметром 0,1 мм), системы конденсаторов ($C_0=0,022 \pm 0,44$ мкФ), источ-

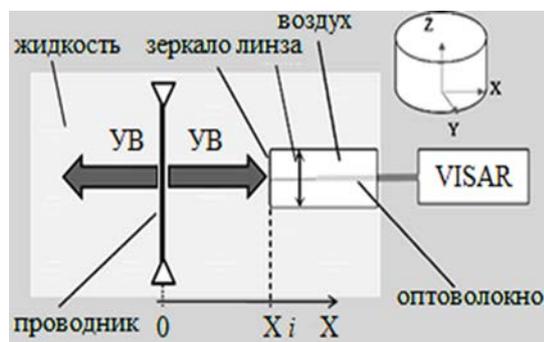


Рис. 9. Схема экспериментальной установки ЭВП [39]

ника высокого напряжения (ИВН, $U_0=1\div 30$ кВ), системы разряда на проволоку, заземляющего устройства, шунта (пояса Роговского).

Комплекс для измерения скорости свободной поверхности жидкости состоит из интерференционной системы VISAR Martin Froeschner & Associates Optoelectronics FDVI Mark IV-3000 (США) и цифрового осциллографа Tektronix DPO 7254 Digital Phosphor Oscilloscope (США). Скорость свободной поверхности регистрировалась с использованием установленного на некотором расстоянии от проводника оптического отражателя (датчика измерения скорости), состоящего из трубки и мембраны (фольга с титановым напылением диаметром 1 см). В центре цилиндрической кюветы вертикально устанавливалась проволока, а датчик - на некотором расстоянии X от места инициирования ЭВП. Затем в кювету заливалась исследуемая жидкость. В результате разряда на проводник с системы конденсаторов ($C_0=0,44$ мкФ), заряженной от ИВН (источника высокого напряжения, $U_0 = 15$ кВ), в жидкости от места ЭВП в радиальном направлении распространялась волна сжатия.

С помощью интерференционной доплеровской измерительной системы VISAR регистрировались зависимости скорости свободной поверхности на различных расстояниях X . С использованием ранее разработанной программы [40] сигналы с осциллографа обрабатывались и строились профили скорости свободной поверхности жидкости (скорость движения мембраны). Для сравнения проводились измерения профилей скорости свободной поверхности на различных расстояниях в дистиллированной воде ($X = 35; 45$ мм), жидкостях на основе гуара ($X = 35; 45$ мм) и на основе вязкоупругого ПАВ ($X = 35; 45; 60$ мм).

Несмотря на то что датчик отличался от того, что использовался в работе [39], осциллографом регистрировалось несколько импульсов: импульс от разрядника, импульс от электровзрыва проволоки

и от процессов на свободной поверхности жидкости под действием УВ нагружения. Определение интересующего сигнала V_{sf} не было затруднено, так как известны расстояние X и время Δt , за которое должна пройти звуковая волна в жидкости от места инициирования взрыва до датчика (скорость звука $c_0=1480$ м/с) [39]. Температура жидкостей во время эксперимента соответствовала температуре лабораторного помещения (20°C).

Результаты ударно-волнового нагружения жидкостей

Перед нагружением жидкостей ПАВ проведены тестовые эксперименты в дистиллированной воде. Вид профилей скорости свободной поверхности для воды не отличались от полученных авторами ранее в работах [39]. В основном, были получены профили скорости свободной поверхности на расстояниях $X=35$ мм и 45 мм. На рис. 10 приведены профили для воды, жидкостей на основе гуара и на основе вязкоупругого ПАВ. Практически на всех профилях в жидкостях на фронте волны разрежения перед откольным импульсом присутствуют изломы, что связывается с предразрушенным состоянием в жидкости, когда появляются пузырьки воздуха после прохождения УВ, размер которых намного меньше откольной пластины (вследствие образования большой полости – пузыря). И, соответственно, поры имеют разную скорость роста.

На профилях (например, для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ в точках от места инициирования взрыва проволоки, $X=35$ и 45 мм) амплитуда откольного импульса превышает амплитуду импульса сжатия. Похожее поведение наблюдалось в воде при меньших расстояниях X [39]. Это связано, как численно показано в работе [41], с ростом пористости среды (гомогенного зародышеобразования) при сжатии, вызванной инерционным расширением пузырей при смене знака давления вследствие отражения волны от свободной поверхности.

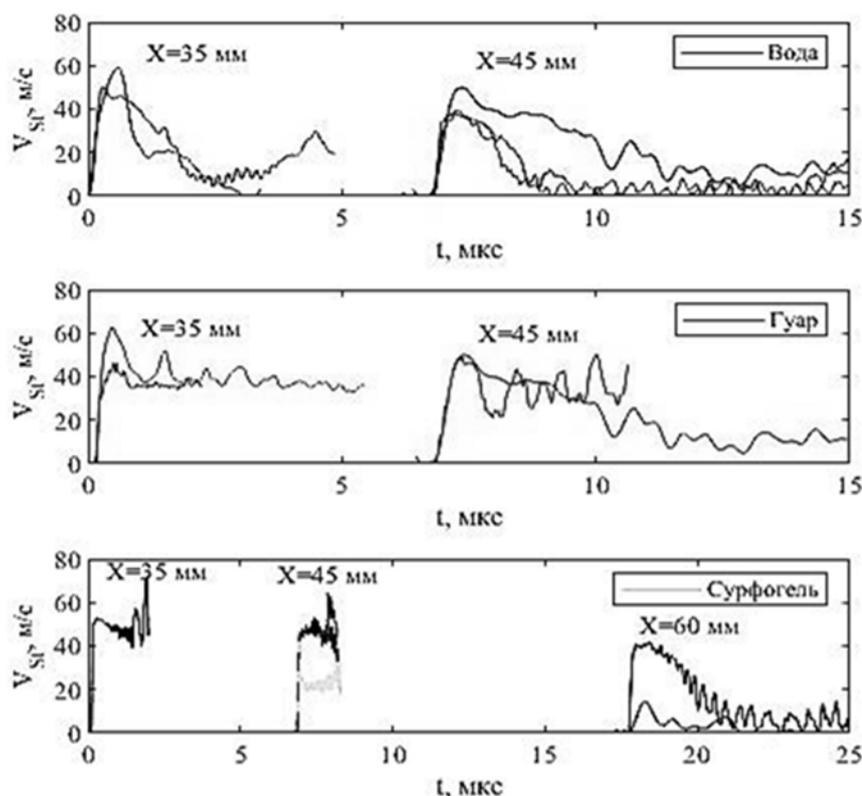


Рис. 10. Профили скорости свободной поверхности жидкостей, полученные на разных расстояниях X от места инициирования ЭВП

Последующие реверберации на профилях связаны с прохождением волн между откольной поверхностью (поверхностью пузыря – большой полости) и поверхностью мембраны датчика. Подобные реверберации (см. данные для гуара) наблюдаются в откольных пластинах на профилях скорости свободной поверхности твердых тел [15]. Отличительной особенностью полученных профилей $V_{sf}(t)$ является наличие колебаний (паразитных), возможно, связанных с колебанием самой мембраны измерительного датчика.

Отдельное внимание представляет исследование значений скорости звука в представленных жидкостях. В процессе регистрации профилей скорости свободной поверхности жидкостей системой VISAR, были получены сигналы, содержащие несколько импульсов. Первый сигнал отвечал за электромагнитный импульс от разрядника с заряженной системы конденсаторов на проводник, а второй – за профиль скорости свободной поверхности. Второй импульс

приходил после начала первого через время, равное отношению расстояния от места инициирования ЭВП до мембраны установленного датчика скорости свободной поверхности X к значению ударной скорости звука D в жидкости.

Показано, что чем дальше от места инициирования ЭВП, тем меньше ударная скорость звука. Таким образом, если скорость звука в воде при 20°C равна 1480 м/с , то, на примере гуара, в точке $X=35\text{ мм}$, $\Delta t=23,6\text{ мкс}$, а в $X=45\text{ мм}$, $\Delta t=30,4\text{ мкс}$, то за $\Delta X=10\text{ мм}$ в течении $\Delta t_{45-35}=6,8\text{ мкс}$ ($30,4-23,6=6,8\text{ мкс}$) скорость звука в жидкости на основе гуара претерпевает изменение и становится равной $\sim 1471 \pm 21\text{ м/с}$. Таким образом, если оценивать скорость ударной волны в каждой точке X , измеренной датчиком VISAR: $D = c_0 + Su$, где $u = \frac{V_0}{2}$, $D_{35} \sim 1480 + 1,99 \cdot 90 / 2 \sim 1570\text{ м/с}$, $D_{45} \sim 1480 + 1,99 \cdot 20 / 2 \sim 1500\text{ м/с}$, получим,

что за 6,8 мкс ударная волна в гуаре снизила свою скорость на ~ 70 м/с.

Тоже самое для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ: $\Delta t_{45-35}=29,68-23,35=6,33$ мкс, скорость звука изменилась и стала $\sim 1580 \pm 25$ м/с. Скорость ударной волны в жидкости на основе вязкоупругого ПАВ в соответствующих точках регистрации импульса $D_{35} \sim 1480 + 1,99 \cdot 38/2 \sim 1518$ м/с, $D_{45} \sim 1480 + 1,99 \cdot 6,43/2 \sim 1486$ м/с, тогда скорость ударной волны уменьшилась примерно на 31 м/с за 6,33 мкс. В воде $\Delta t_{45-35}=30,4-23,6=6,8$ мкс, $D_{35} \sim 1480 + 1,99 \cdot 44,23/2 \sim 1524$ м/с, $D_{45} \sim 1480 + 1,99 \cdot 34,52/2 \sim 1514$ м/с. Оценка показала, что в воде релаксация скорости ударной волны незначительна, значение D за данный промежуток времени изменилось примерно на 10 м/с.

Релаксационные свойства сплошной среды при ударно-волновом нагружении определялись с помощью анализа профилей скорости свободной поверхности, используя приведенные методики и формулы в работах [12, 39, 42, 43]. На рис. 11 приведены зависимости скорости деформации на фронте волны сжатия от амплитуды импульса сжатия $\dot{\epsilon}^*(P_0)$ (рис. 11, а), зависимости значений откольной прочности жидкостей от скорости деформации

$P_S(\dot{\epsilon}')$ (рис. 11, б). Значения $\dot{\epsilon}^*(P_0)$ для всех жидкостей располагаются на диаграмме примерно в одной области. Ранее в [39] на дистиллированной воде получена степенная зависимость $\dot{\epsilon}^*(P_0)$ со степенью 3,2 при скоростях деформации $\dot{\epsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$ 1/с.

Если провести интерполяцию по всем данным $\dot{\epsilon}^*(P_0)$, полученным в настоящей работе для трех жидкостей, то для значений $\dot{\epsilon}^* \geq 10^5$ 1/с степень в зависимости $\dot{\epsilon}^* \sim (P_0)^\beta$ имела значение $\beta \sim 4,5$ и уменьшалась до 0,7 при учетывании всех данных (в том числе $< 10^5$ 1/с). Для воды $\dot{\epsilon}^*$ с $6,2 \cdot 10^4$ до $9,9 \cdot 10^4$ 1/с значения амплитуды импульса сжатия P_0 увеличивалось от 29 до 37 МПа. Для жидкости на основе гуара в интервале $\dot{\epsilon}^*$ от $4,5 \cdot 10^4$ до $18,8 \cdot 10^4$ 1/с амплитуда импульса сжатия увеличилась от 8 до 34 МПа. Для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ: в интервале от $9,9 \cdot 10^4$ до $43,7 \cdot 10^4$ 1/с значение амплитуды импульса сжатия от 31 до 43 МПа.

Оценка откольной прочности жидкостей показала следующее (рис. 11, б). С увеличением скорости деформации на фронте волны разрежения $\dot{\epsilon}'$ от $0,8 \cdot 10^4$ до $1,5 \cdot 10^4$ 1/с откольная прочность P_S дистиллированной воды слабо менялась и была примерно равной 27 ± 3 МПа. Для жидкости на основе гуара откольная прочность

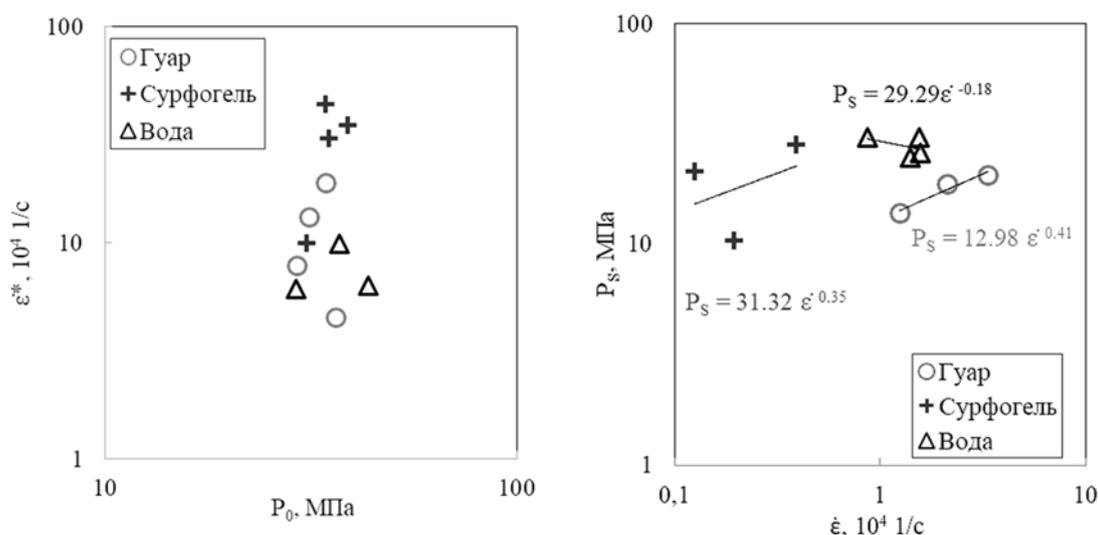


Рис. 11. Зависимость скорости деформации на фронте волны сжатия от амплитуды импульса сжатия $\dot{\epsilon}^*(P_0)$ (а), оси логарифмические; зависимость значений откольной прочности жидкостей от скорости деформации $P_S(\dot{\epsilon}')$ (б). Данные для воды (Δ), гуара (\circ) и Сурфогеля марки Д (+)

P_S изменялась от 13,8 до 20,6 МПа в интервале скоростей деформации $\dot{\epsilon}$ от $1,3 \cdot 10^4$ до $3,3 \cdot 10^4$ 1/с, для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ ($X = 35; 45; 60$ мм) P_S изменилась с 10 до 28 МПа, в интервале скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от $0,13 \cdot 10^4$ до $0,39 \cdot 10^4$ 1/с. Сравнивая с результатами ранних работ авторов [12, 39], полученные значения откольной прочности всех жидкостей входят в интервал значений откольной прочности для дистиллированной воды в интервале скоростей деформации $10^3 \div 10^5$ 1/с.

Сдвиговая вязкость жидкостей

В условиях плоского высокоскоростного деформирования перенос импульса происходит за счет пластичности среды. Сдвиговая вязкость по [7, 44, 45] находилась как произведение времени релаксации на сдвиговой модуль упругости. В настоящей работе сдвиговая вязкость оценивалась по экспериментально полученным профилям скорости свободной поверхности и кривым ударных адиабат жидкостей (брали данные для воды, $S = 1,99$), используя следующую формулу [42]:

$$\eta^* \sim \frac{3 S (P_0)^2}{4 \rho_0 c_0^2 \dot{\epsilon}^*} \quad (3)$$

На рис. 12 приведены зависимости оценочных значений сдвиговой вязкости жидкостей от скорости деформации на

фронте волны сжатия. Сдвиговая вязкость для жидкости на основе гуара (кружки) η^* уменьшилась с 7,5 до 4,3 Па·с в интервале скорости деформации $\dot{\epsilon}^* \sim 7,8 \cdot 10^4 - 18,8 \cdot 10^4$ 1/с (в точках $X = 35; 45$ мм), для дистиллированной воды (треугольники) в интервале скорости деформации $\dot{\epsilon}^* \sim 6,2 \cdot 10^4 - 9,4 \cdot 10^4$ 1/с сдвиговая вязкость η^* уменьшилась с 20,4 до 9,2 Па·с (в точках $X = 35; 45$ мм).

Для жидкости на основе вязкоупругого ПАВ оценочные значения сдвиговой вязкости уменьшились с 6,5 до 1,8 Па·с в интервале скорости деформации от $9,3 \cdot 10^4$ до $43,7 \cdot 10^4$ 1/с (в точках $X = 35; 45; 60$ мм). Когда имеет место уменьшение сдвиговой вязкости с увеличением скорости деформации, то жидкости проявляют псевдопластический характер. Чем дальше от места инициирования ЭВП, тем сдвиговая вязкость жидкостей ближе к значению, полученному в статике.

Так как динамическая вязкость жидкостей отличалась на порядки (в воде 0,001 Па·с, в жидкости на основе гуаре 28,5 Па·с, в жидкости на основе вязкоупругого ПАВ 1,1 Па·с), то и после взрыва проводника в жидкости наблюдались различные картины в месте инициирования ЭВП. На рис. 13 приведена фотография жидкости на основе вязкоупругого ПАВ после ЭВП. Здесь непрозрачное, неоднородное «облако» примесей от взрыва и

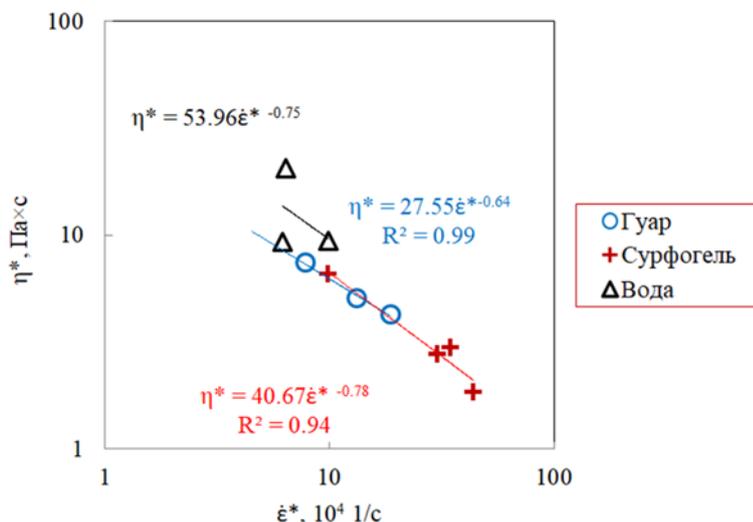


Рис. 12. Зависимости сдвиговой вязкости дистиллированной воды (Δ), гуара (\circ) и ПАВ «Сурфогеля» марки Д (+) от скорости деформации

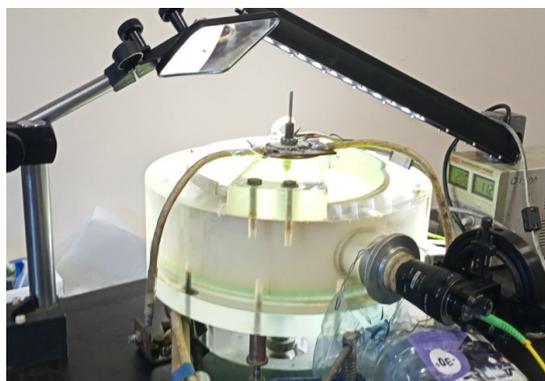


Рис. 13. Вид жидкости на основе вязкоупругого ПАВ после электрического взрыва проводника в жидкости

продуктов горения всплыло на поверхность и растеклось в небольшом диапазоне, в радиусе ~ 2 см. Для жидкости на основе гуара (рис. 14) примеси от взрыва и продуктов горения жидкости всплывали в виде щупалец с вихрями, отстоящих по периметру на одинаковых расстояниях друг от друга.



Рис. 14. Вид жидкости на основе гуара после ЭВП в жидкости



а

Измерения с использованием высокоскоростной камеры

В работе проведена высокоскоростная съемка камерой Photron FASTCAM SA-Z 2100K (частота $6 \cdot 10^4$ кадров/с) поверхности жидкости. Под углом к поверхности устанавливалось зеркало (рис. 15, а) и на небольшом расстоянии от кюветы устанавливалась высокоскоростная камера, так чтобы была видна поверхность жидкости. Так как в гуаре пропант тонул со скоростью $\sim 4,5 \cdot 10^{-5}$ м/с, то пропант высыпался непосредственно перед разрядом на проводнике (0,3 мкс). На рис. 15 б приведена фотография поверхности гуара после нагружения ЭВП.

На рис. 16 приведена серия кадров, на которых видно как в течение короткого времени сразу после разряда на проводнике от каждого шарика расходятся волны. Оценено расстояние между волнами, оно равно двум средним диаметрам частицы пропанта $d_p \sim 2 \pm 0,1$ мм. Для вязкоупругой жидкости справедлива связь между вязкостью, модулем сдвига и характерным временем релаксации $t = d_p / C_0$. Таким образом можно сделать оценку модуля сдвига для исследуемых жидкостей $G \sim 10^6$ Па.

По экспериментальным зависимостям скорости свободной поверхности вычислены значения амплитуд импульса сжатия и скорости деформации на фронте волны сжатия и разрежения на различных расстояниях



б

Рис. 15 – Камера с жидкостью (а). Вид жидкости на основе гуара после его нагружения ЭВП, на поверхности которой находится пропант (б)

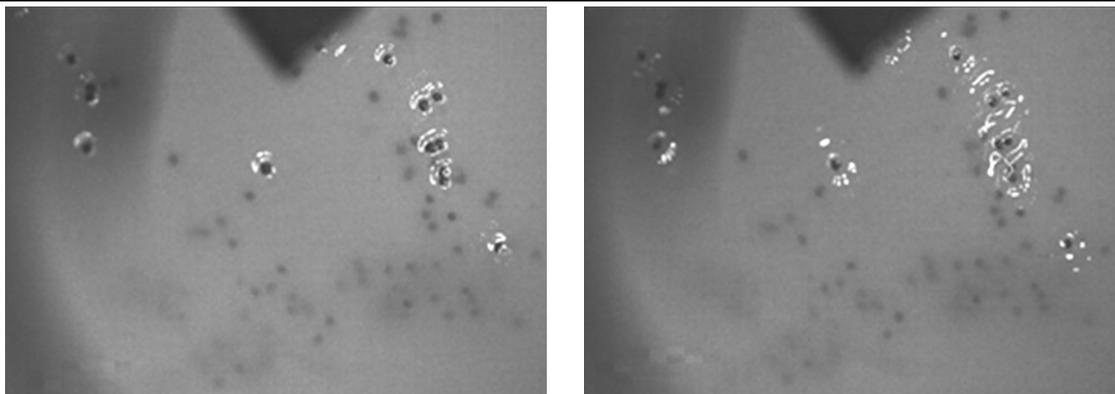


Рис. 16. Колебания вокруг частичек пропанта в различные моменты времени при прохождении волны сжатия

от места инициирования ЭВП. По профилям скорости определялись значения сдвиговой вязкости и откольной прочности исследованных жидкостей. Установлено, что исследуемые жидкости проявляют псевдопластические (неньютоновские) свойства, когда сдвиговая вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации на фронте волны сжатия (при давлениях 30–40 МПа). Также определены значения откольной прочности, которые могут быть учтены при образовании кавитационных пузырей в возможных зонах разрежения в процессах ГРП. Высокоскоростная съемка позволила обнаружить колебания жидкости вокруг частиц пропанта при прохождении волны сжатия, которые обусловлены вязкоупругими свойствами жидкости.

Заключение

Проведена валидация оригинального вискозиметра, 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 реологические 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). Полученные 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.

Проведены эксперименты по нагружению дистиллированной воды, жидкостей на основе гуара и на основе вязкоупругого ПАВ в условиях электровзрыва проводника. Получены профили скорости свободной поверхности жидкостей и оценены их релаксационные свойства. По экспериментальным зависимостям скорости свободной поверхности вычислены значения амплитуд импульса сжатия и скорости деформации на фронте волны сжатия и разрежения на различных расстояниях от места инициирования ЭВП. По профилям скорости определялись зна-

чения сдвиговой вязкости и откольной прочности исследованных жидкостей.

Установлено, что исследуемые жидкости проявляют псевдопластические (неньютоновские) свойства, когда сдвиговая вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации на фронте волны сжатия (при давлениях 30–40 МПа). Также определены значе-

ния откольной прочности, которые могут быть учтены при образовании кавитационных пузырей в возможных зонах разрежения в процессах ГРП. Высокоскоростная съемка позволила обнаружить колебания жидкости вокруг частиц пропанта при прохождении волны сжатия, которые обусловлены вязкоупругими свойствами жидкости.

Библиографический список

1. *Gomaa A.M., Gupta D.V.S., Carman P.* Proppant Transport? Viscosity Is Not All It's Cracked Up To Be // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference: Conference Proceedings. – USA. – OnePetro, 2015.
2. *Dogon D.* Partical Flow In Fractures Eindhoven. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2016. – 125 p.
3. *Arnipally S.K., Kuru E.* Settling velocity of particles in viscoelastic fluids: a comparison of the shear-viscosity and elasticity effects // SPE Journal. – 2018. – Vol. 23. – № 5. – P. 1689–1705.
4. *Evans D.J., Hanley H.J.M., Hess S.* Non-Newtonian phenomena in simple fluids // Physics Today. – 1984. – Vol. 37. – № 1. – P. 26–33.
5. *Kawasaki K., Gunton J.D.* Theory of nonlinear transport processes: Nonlinear shear viscosity and normal stress effects // Physical Review A. – 1973. – Vol. 8. – № 4. – P. 2048–2064.
6. *Yamada T., Kawasaki K.* Nonlinear effects in the shear viscosity of a critical mixture // Progress Theoretical Physics. – 1967. – Vol. 38. – № 8. – P. 1031–1051.
7. *Derjaguin B.V., Bazaron U.B., Lamazhapova Kh.D., Tsidypov B.D.* Shear elasticity of low-viscosity liquids at low frequencies // Progress in Surface Science. – 1992. – Vol. 40. – № 1–4. – P. 462–465.
8. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. – Л: Изд-во «Наука», 1975. – 592 с.
9. *Минеев В.Н., Зайдель Р.М.* Вязкость воды и ртути при ударном нагружении // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1968. – Т. 54. – № 6. – С. 1634–1639.
10. *Сахаров А.Д., Зайдель Р.М., Минеев В.Н., Олейник А.Г.* Экспериментальное исследование устойчивости ударных волн и механических свойств вещества при высоких давлениях и температурах // Доклады Академии Наук СССР. – 1964. – Т. 159. – № 5. – С. 1019–1022.
11. *Минеев В.Н., Савинов Е.В.* Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и хлористого натрия при ударном сжатии // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1967. – Т. 52. – № 3. – С. 629–636.
12. *Богач А.А., Уткин А.В.* Прочность воды при импульсном растяжении // Прикладная Механика и Техническая Физика. – 2000. – Т. 41. – № 4. – С. 198–205.
13. *Уткин А.В.* Влияние кинетики разрушения материалов на амплитуду откольного импульса // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52. – № 1. – С. 185–193.
14. *Сосиков В.А., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Особенности разрушения воды вблизи температуры замерзания при импульсном растяжении // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2008. – Т. 133. – № 5. – С. 1036–1041.
15. *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 248 с.
16. *Игнатова О.Н., Раевский В.А., Целиков И.С.* Модель откольного разрушения в жидкости // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: труды международной конференции «XVII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – С. 386–390.
17. *Peirce A.* Modeling multi-scale processes in hydraulic fracture propagation using the implicit level set algorithm // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2015. – Vol. 283. – P. 881–908.
18. *Dontsov E.V., Peirce A.P.* A multiscale implicit level set algorithm (ILSA) to model hydraulic fracture propagation incorporating combined viscous, toughness, and leak-off asymptotics // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2017. – Vol. 313. – P. 53–84.
19. *Linkov A.M.* Modern theory of hydraulic fracture modeling with using explicit and implicit schemes [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1905/1905.06811.pdf>
20. *Olroyd J.G.* On the Formulation of Rheological Equation of State // Proc. Roy. Soc. – 1950. – Vol. A200. – P. 523–541.

21. Mitsoulis E. 50 years of the K-BKZ constitutive relation for polymers // ISRN Polymer Science. – 2013. – Vol. 2013. – P. 952379(22).
22. Giesekus H. A simple constitutive equation for polymer fluids based on the concept of deformation-dependent tensorial mobility // J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics. — 1982. — Vol. 11. – № 1/2. – P. 69–109.
23. Phan-Thien N., Tanner R.I. A new constitutive equation derived from network theory // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1977. – Vol. 2. – № 4. – P. 353–365.
24. Leonov A.I. Nonequilibrium thermodynamics and rheology of viscoelastic polymer media // Rheologica acta. – 1976. – Vol. 15. – № 2. – С. 85-98.
25. Leonov A.I., Lipkina E.H., Pashkin E.D., Prokunin A.N. Theoretical and experimental investigation of shearing in elastic polymer liquids // Rheologica Acta. – 1976. – Vol. 15. – № 7-8. – С. 411–426.
26. Vinogradov G.V., Malkin A.Ya., Yanovskii Yu.G., Borisenkova E.K., Yarlykov B.V., Berezhnaya G.V. Viscoelastic properties and flow of narrow polybutadienes and polyisoprenes // Journal of Polymer Science: Part A-2. – 1972. – Vol. 10. – № 6. – P. 1061–1084.
27. Pyshnograï G.V., Gusev A.S., Pokrovskii V.N. Constitutive Equations for Weakly Entangled Linear Polymers // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 2009. – Vol. 163. – № 1–3. – P. 17–28.
28. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. – М.: КолосС, 2003. – 312 с.
29. Скульский О.И. Особенности течения концентрированных суспензий твердых частиц // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14. – № 2. – С. 210–219.
30. 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.
31. Efremov D.V., Bannikova I.A., Bayandin Yu.V., Krutihin E.V., Zhuravlev V.A. Study of Viscoelastic Properties of Fluids for Hydraulic Fracturing // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1945. – P. 012003.
32. Bayandin Yu., Bilalov D., Naimark O., Krutihin E., Zhuravlev V. Rheological model of viscoelastic surfactants under quasistatic and dynamic influences // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2216. – P.020001.
33. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2003. – 527 с.
34. Минеев В.Н., Фунтиков А.И. Измерения вязкости воды при ударно-волновом сжатии // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. – № 1. – С. 136–145.
35. Swegle J.W., Grady D.E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // Journal Applied Physics. – 1985. – Vol. 58. – № 2. – P. 692–701.
36. Barker L.M. Behavior of dense media under high dynamic pressures. – New York: Gordon and Breach, 1968. – 482 p.
37. Naimark O.B. Defect Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure in Multifield Continua // In: Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure / Ed. G. Capriz and P. Mariano, Birkhäuser, Boston, 2004. – P. 75–114.
38. Grady D.E. Structured shock waves and the fourth-power law // Journal Applied Physics. – 2010. – Vol. 107. – P. 013506(1–13).
39. Bannikova I.A., Uvarov S.V., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. An experimental study of non-Newtonian properties of water under electroexplosive loading // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol. 40. – № 9. – P. 766–768.
40. Банникова И.А., Баяндин Ю.В., Уваров С.В., Изюмов Р.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615995 от 09.06.2014 г.
41. Уткин А.В. Влияние кинетики разрушения материалов на амплитуду откольного импульса // Прикладная Механика и Техническая Физика. – 2011. – Т. 52. – №1. – С. 185–193.
42. Uvarov S.V., Bannikova I.A., Naimark O.B. Pulse loading of glycerol by electric explosion of wire // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – P. 012034(1–5).
43. Bannikova I.A., Zubareva A.N., Utkin A.V. Shock-wave pulse compression and stretching of dodecane and mineral oils // Technical Physics. – 2018. – Vol. 63. – № 4. – P. 498–505.
44. Базарон У.Б., Будаев О.Р., Дерягин Б.В., Ламажапова Х.Д. О низкочастотной сдвиговой упругости жидкостей // Доклады Академии наук СССР. – 1990. – Т. 315. – С. 595–599.
45. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984. – 403 с.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY
OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF NON-NEWTONIAN MEDIA
(SOLUTIONS OF VISCOELASTIC SURFACTANTS)
UNDER QUASI-STATIC AND DYNAMIC LOADING

Yu.V. Bayandin¹, S.V. Uvarov¹, N.V. Saveleva¹, I.A. Bannikova¹, D.R. Ledon¹,
D.V. Efremov¹, E.V. Krutikhin², V.A. Zhuravlev²

¹*Institute of Continuum Mechanics UB RAS*

²*JSC «Polyex»*

For citation:

Bayandin Yu.V., Uvarov S.V., Saveleva N.V., Bannikova I.A., Ledon D.R., Efremov D.V., Krutikhin E.V., Zhuravlev V.A. Experimental and theoretical study of the rheological properties of non-newtonian media (solutions of viscoelastic surfactants) under quasi-static and dynamic loading // Perm Federal Research Center Journal. – 2022. – № 1. – P. 26–46. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.3>

The object of the study are liquids based on a viscoelastic surfactant brand D (type 70–100, produced by JSC «Polyex») and based on guar. These fluids are used for hydraulic fracturing technology as a proppant-carrying and proppant-retaining fluid for hydraulic fracturing in order to increase oil recovery, including hard-to-recover oil and gas reserves. The work is devoted to the development of a rheological model for the behavior of viscoelastic fluids in a wide range of shear rates typical for hydraulic fracturing. An urgent scientific problem is the substantiation of the choice of concentration of viscoelastic surfactant in the manufacture of fracturing fluid. In domestic practice, it is customary to use a fracturing fluid with an effective viscosity of 0,4 Pa·s (=400 cP) at a strain rate of 100 s⁻¹ and a temperature equal to the arithmetic mean between the formation and wellhead temperatures. In foreign literature, the elastic component of the fracturing fluid is increasingly mentioned as the most adequate characteristic that correlates with the proppant-retaining capacity of the fluid (non-viscous component). At present, models of the behavior of proppant-bearing viscoelastic fluids (viscoelastic surfactant solutions) in the processes of hydraulic fracturing are in demand. In this regard, there is a need to develop mathematical models and methods for calculating the proppant-retaining capacity of a fracturing fluid depending on its viscoelastic characteristics.

The aim of the work was to develop a mathematical model for the behavior of viscoelastic surfactant solutions, to develop approaches and methods for identifying the parameters of the Leonov-Prokunin model, which makes it possible to adequately describe both the process of a stationary fluid flow and dynamic loading in the oscillation mode and shock wave loading. The result of the project is the method for identifying the parameters of the behavior model of viscoelastic surfactant solutions according to static and dynamic tests, which can be used in commercial hydraulic fracturing solvers.

Keywords: viscoelastic surfactant solutions, non-Newtonian fluid, rheology, generalized Maxwell model, relaxation time spectrum, shock waves.

Сведения об авторах

Баяндин Юрий Витальевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: buv@icmm.ru

Уваров Сергей Витальевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: usv@icmm.ru

Савельева Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: saveleva@icmm.ru

Банникова Ирина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: malgacheva@icmm.ru

Ледон Дмитрий Рудольфович, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: ledon@icmm.ru

Ефремов Денис Викторович, инженер лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: malgacheva@icmm.ru

Крутихин Евгений Валерьевич, кандидат химических наук, начальник лаборатории, АО «Полиэкс», 614042, г. Пермь, ул. Гальперина, д. 8, оф. 301; e-mail: kev@polyex.perm.ru

Журавлев Вадим Александрович, кандидат технических наук, заместитель директора по инвестициям и инновациям, АО «Полиэкс», 614042, г. Пермь, ул. Гальперина, д. 8, оф. 301; e-mail: vaz@polyex.perm.ru

Материал поступил в редакцию 01.02.2022 г.