

РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ РАСТВОРОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ПАВ
ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Баяндин Ю.В., Билалов Д.А., Наймарк О.Б., Крутихин Е.В., Журавлёв В.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН

АО "Полиэкс"

Работа посвящена разработке и обоснованию реологической модели растворов вязкоупругих ПАВ, которые применяются в качестве пропантоудерживающей жидкости для гидроразрыва пласта (ГРП) с целью повышения нефтеотдачи, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа. При проектировании дизайна ГРП одним из ключевых параметров является давление нагнетания на устье скважины:

$$P_{уст} = P_{ГРП} + P_{тр} - P_{гидростат},$$

где $P_{ГРП}$ – давление ГРП пласта (определяется свойствами пласта); $P_{тр}$ – потери давления на трение в трубах; $P_{гидростат}$ – гидростатическое давление столба жидкости в скважине. Потери давления $P_{тр}$ в основном определяются реологическими свойствами пропантоудерживающей жидкости, поэтому 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 Па·с (=400 сПз) 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 жидкости (невязкая составляющая). В связи с этим возникает необходимость в разработке математических моделей и методик расчета пропантоудерживающей способности ЖР в зависимости от ее вязкоупругих характеристик.

Зависимость механических свойств от соотношения между релаксационными временами среды и характерными временами нагружения, как показывают эксперименты, является не только свойством твердого тела, но справедлива и для жидкостей в широком диапазоне скоростей деформирования. Исследование вязкоупругого поведения жидкостей, обнаруживающих конечные упругие деформации, предполагает обобщение известных термодинамических подходов для существенно неравновесных систем, разработку методов моделирования лабораторных реометрических тестов. Принципиально важным является

создание нового оборудования для верификации определяющих соотношений поведения жидкостей в широком диапазоне скоростей деформирования с учетом механизмов развития неустойчивостей течения. Решение перечисленных задач является основой для моделирования условий эффективного гидроразрыва пластов, проектирования насосно-прессового оборудования для повышения нефтеотдачи пластов.

Целью настоящей работы является разработка и реализация подходов и методик определения констант реологических моделей для ряда растворов ПАВ, методов моделирования реологического поведения в широком диапазоне скоростей деформирования. Идентификация параметров реологической модели проводится на основе стандартных испытаний с использованием ротационного реометра. Оценка динамических характеристик (действительная G' и мнимая G'' (модуль потерь) части модуля упругости) проводится в режиме осцилляций для диапазона частот, характерных эксплуатационным временам. Моделирование процессов, протекающих при ГРП, позволит сократить стоимость проведения натуральных экспериментов, а также затрат, связанных с возможными ошибками при некорректной оценке свойств используемых растворов вязкоупругих ПАВ.

Модели вязкоупругой жидкости

В современных симуляторах гидроразрыва пласта для эффективности ускорения расчетов используются довольно простые реологические модели [Peirce A. Modeling multi-scale processes in hydraulic fracture propagation using the implicit level set algorithm //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2015. – Т. 283. – С. 881-908., 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. – Т. 313. – С. 53-84., Linkov A. M. Modern theory of hydraulic fracture modeling with using explicit and implicit schemes //arXiv preprint arXiv:1905.06811. – 2019.]. 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 в жидкостях –пропантоносителях на основе вязкоупругих 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. Отметим лишь наиболее распространенные модели, являющимися обобщением теории течения Максвелла: Oldroyd-B [Olroyd J.G. On the

Formulation of Rheological Equation of State / J.G. Olroyd // Proc. Roy. Soc. — 1950. — Vol. A200. — P. 523–541.], K-BKZ [Mitsoulis E. 50 years of the K-BKZ constitutive relation for polymers // ISRN Polymer Science. — 2013. — Т. 2013.], Giesekus [Giesekus H. A simple constitutive equation for polymer fluids based on the concept of deformation-dependent tensorial mobility // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. — 1982. — Vol. 11, Is. 1/2. — P. 69–109.], Phan–Thien–Tanner (PTT) [Phan-Thien N. A new constitutive equation derived from network theory / N. Phan-Thien, R.I. Tanner // J. Non-Newtonian Fluid Mech. — 1977. — V. 2 (4). — P. 353–365.], Leonov-Prokunin [Leonov A. I. Nonequilibrium thermodynamics and rheology of viscoelastic polymer media // Rheologica acta. — 1976. — Т. 15. — №. 2. — С. 85-98., Leonov A. I. et al. Theoretical and experimental investigation of shearing in elastic polymer liquids // Rheologica Acta. — 1976. — Т. 15. — №. 7-8. — С. 411-426.], Vinogradov-Pokrovskii (MVP) [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, no. 6. — P. 1061–1084., Pyshnograï G.V. Constitutive Equations for Weakly Entangled Linear Polymers / G.V. Pyshnograï, A.S. Gusev, V.N. Pokrovskii // J. Non-Newtonian Fluid Mech. — 2009. — Vol. 163, is. 1–3. — P. 17–28.]. В линейной области вязкоупругости большинство моделей дают близкие результаты, как для статических значений 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 Giesekus и PTT допускают формулировку определяющих соотношений в дифференциальной форме с одним и 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 Vinogradov-Pokrovskii и Leonov-Prokunin менее распространены, так как описание трехмерных течений вызывает определенные трудности в идентификации параметров.

Жидкости-пропантоносители на основе вязко-упругих ПАВ представляют собой мицеллярный раствор, состоящий из мицелл различной конфигурации. Мицеллярные растворы являются термодинамически устойчивыми системами и состоят из пространственных цепей молекул ПАВ. Таким образом, механические свойства (в частности реологические) вязкоупругих растворов ПАВ можно рассматривать с тех же позиций, как и

растворы полимеров. Для описания вязкоупругой реологии жидкости будет использоваться модель Leonov-Prokunin, так как в ней явно учитываются упругие и вязкие составляющие деформации цепочек молекул ПАВ с позиций неравновесной термодинамики.

В работе были рассмотрены два типа жидкостей разрыва: на основе вязко-упругого ПАВ «Сурфогель» марки Д (9,51 % масс. «Сурфогель» марки Д (ПАВ основа, тип 70-100), 1,81 % масс. «Сурфогель» марки Д (Активатор), 88,68 % дистиллированная вода) и гуара (0.32% гуар марки HydraGEL 8F, 0.36% сшиватель марки HydraXW-2, 99,32% дистиллированная вода). Исследования были проведены на реометре Grace M5600 при температуре +25°C. Скорость сдвига в статических экспериментах задавалась в диапазоне от 1 до 1000 с⁻¹. Получены зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига. Осцилляционные испытания проводились для жидкости на основе гуара при температуре +25°C с амплитудами ±0,02 (100 %) и ±0,1 (500 %) от длины окружности ротора. Получены зависимости модуля накопления G' и модуля потерь G'' .

Основные уравнения модели представлены в работах авторов [Leonov A. I. Nonequilibrium thermodynamics and rheology of viscoelastic polymer media //Rheologica acta. – 1976. – Т. 15. – №. 2. – С. 85-98., Leonov A. I. et al. Theoretical and experimental investigation of shearing in elastic polymer liquids //Rheologica Acta. – 1976. – Т. 15. – №. 7-8. – С. 411-426.], 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. 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 вязкость, а безразмерные параметры задают отношение времен релаксации $\lambda_k = \theta_k / \theta$ и модулей сдвига $v_k = G_k / G$ для N параллельно соединенных максвелловских элементов, соответственно.

Определение констант модели

Задача решалась таким образом, чтобы подобрать параметры модели, которые достаточно хорошо аппроксимируют оба вида испытаний – статический и осцилляционный. Таким образом, задача определения неизвестных параметров $\theta_k, \nu_k, \theta, s$ по данным статических экспериментов имеет следующий вид:

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

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, которое является достаточным для описания нелинейного характера поведения рассматриваемых жидкостей. Показано, что $N < 2$ является недостаточным для удовлетворительной аппроксимации экспериментальных данных, а $N > 2$ не даёт лучшего результата для рассматриваемых жидкостей.

Поставленная задача оптимизации решалась численно методом поиска. Результаты задачи идентификации параметров модели представлены на графиках 1-4. Значения констант для раствора на основе **Сурфогель м.Д**: $\theta_1 = 0,0189$ с, $\theta_2 = 1,41$ с, $\nu_1 = 0,064$, $\nu_2 = 14,24$, $\theta = 0,067$ с, $G = 93,3$ Па, $s = 0,43$; для раствора на основе **гуара**: $\theta_1 = 3,92$, $\theta_2 = 0,294$, $\nu_1 = 1,122$, $\nu_2 = 2,5$, $\theta = 0,067$ с, $G = 22,5$ Па, $s = 0,0$.

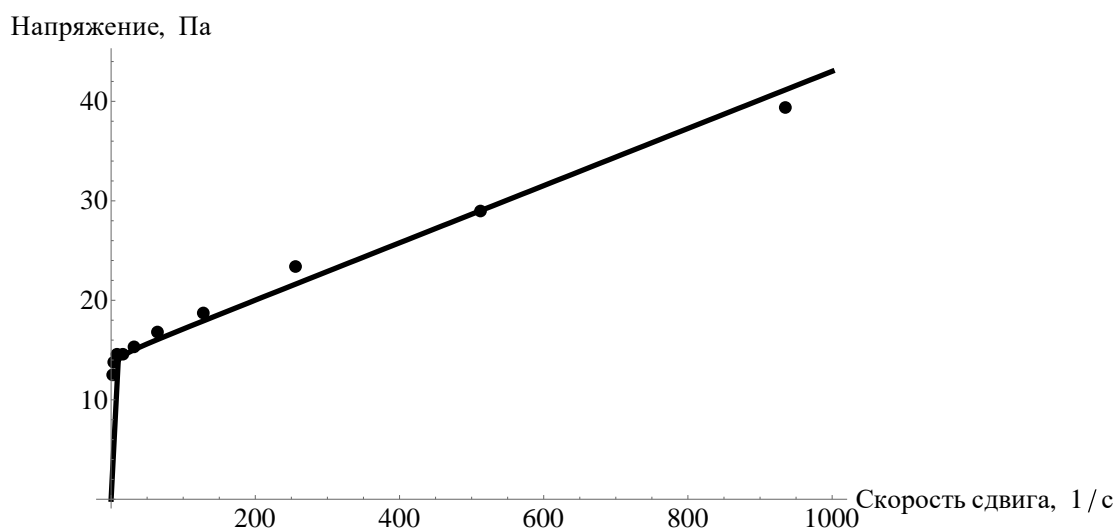


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига («Сурфогель» марки Д)

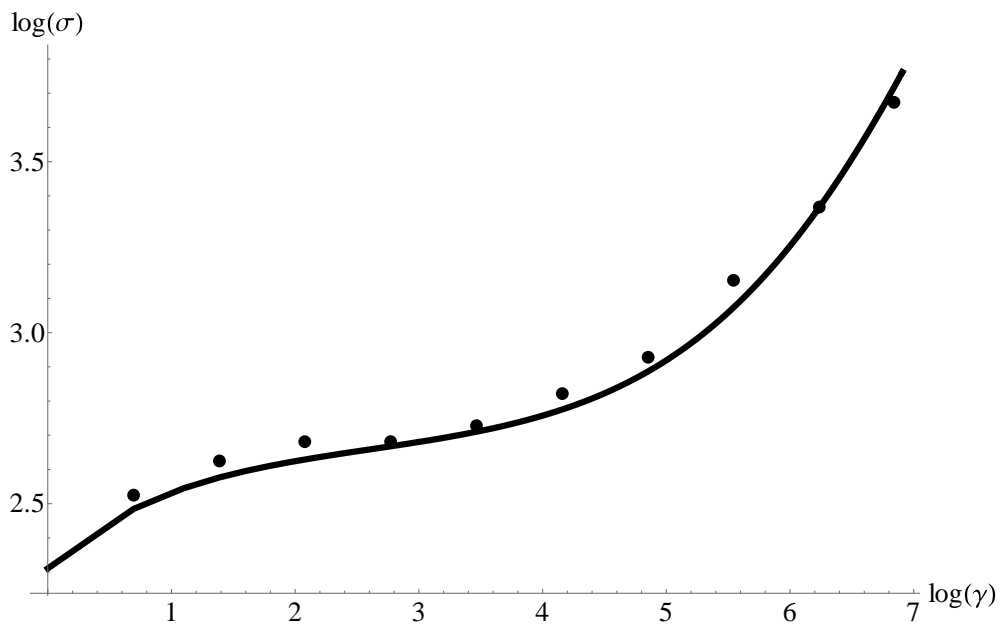


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в логарифмических осях («Сурфогель» марки Д)

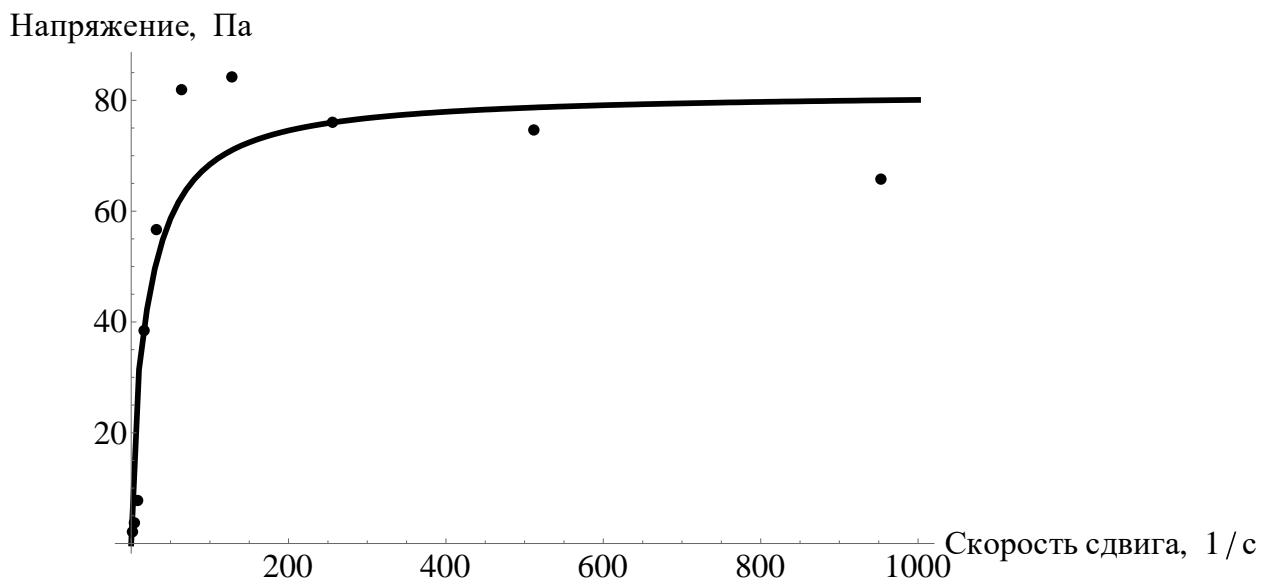


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига гуар)

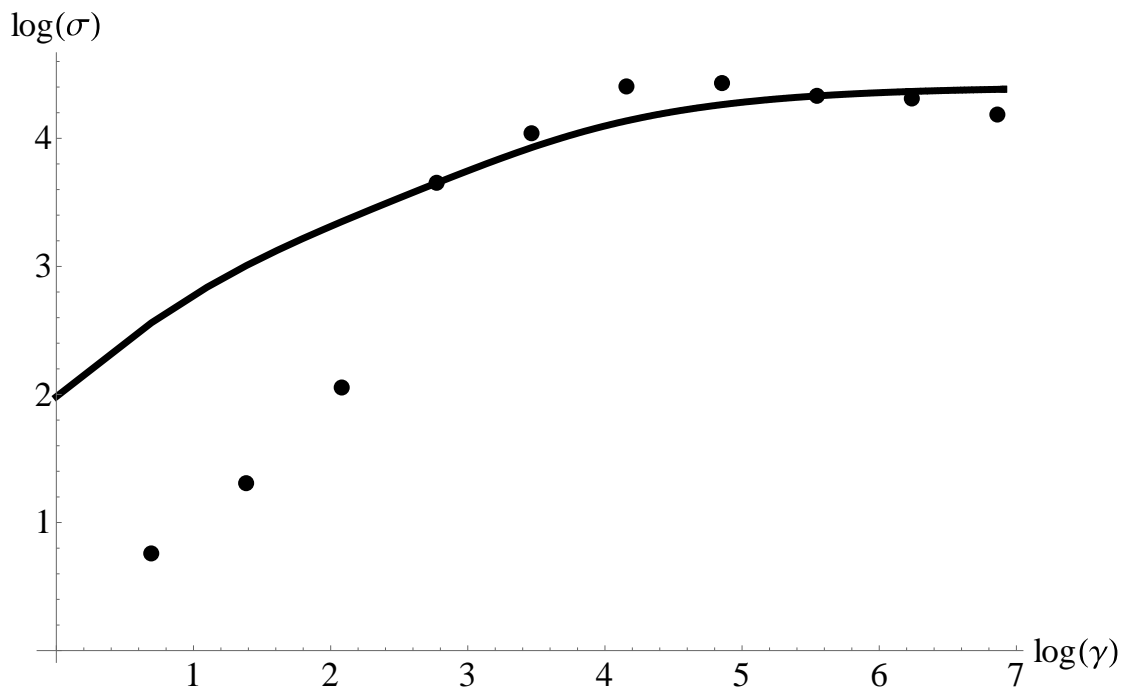


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в логарифмических осях (гуар)

Дополнительно для жидкости на основе гуара исследовались динамические характеристики по данным осцилляционных тестов на цилиндрическом реометре Grace M5600. Зависимость модуля накопления G' и модуля потерь G'' задавалась в следующем виде

$$G'(\omega) = \omega^2 \sum_{k=1}^N \frac{v_k \lambda_k^2}{1 + \lambda_k^2 \omega^2},$$

$$G''(\omega) = s\omega + \omega \sum_{k=1}^N \frac{v_k \lambda_k}{1 + \lambda_k^2 \omega^2},$$
(2)

где G' – модуль накоплений, G'' – модуль потерь, ω – частота колебаний. Аналогичные соотношения были предложены в модели К-ВКЗ [Mitsoulis E. 50 years of the K-BKZ constitutive relation for polymers // ISRN Polymer Science. – 2013. – Т. 2013.]. Подставив в выражения для G' и G'' константы, найденные ранее для раствора на основе гуара, получившиеся зависимости сравнивались с экспериментальными данными с целью верификации модели. Иллюстрация представлена на рисунке 5. Следует отметить, что определенное по стационарному тесту характерное время релаксации $\theta_1 = 3,92\text{с}$ соответствует частоте 0.3 Гц, после которой образец жидкости на основе Гуара ведет себя как упругое тело.

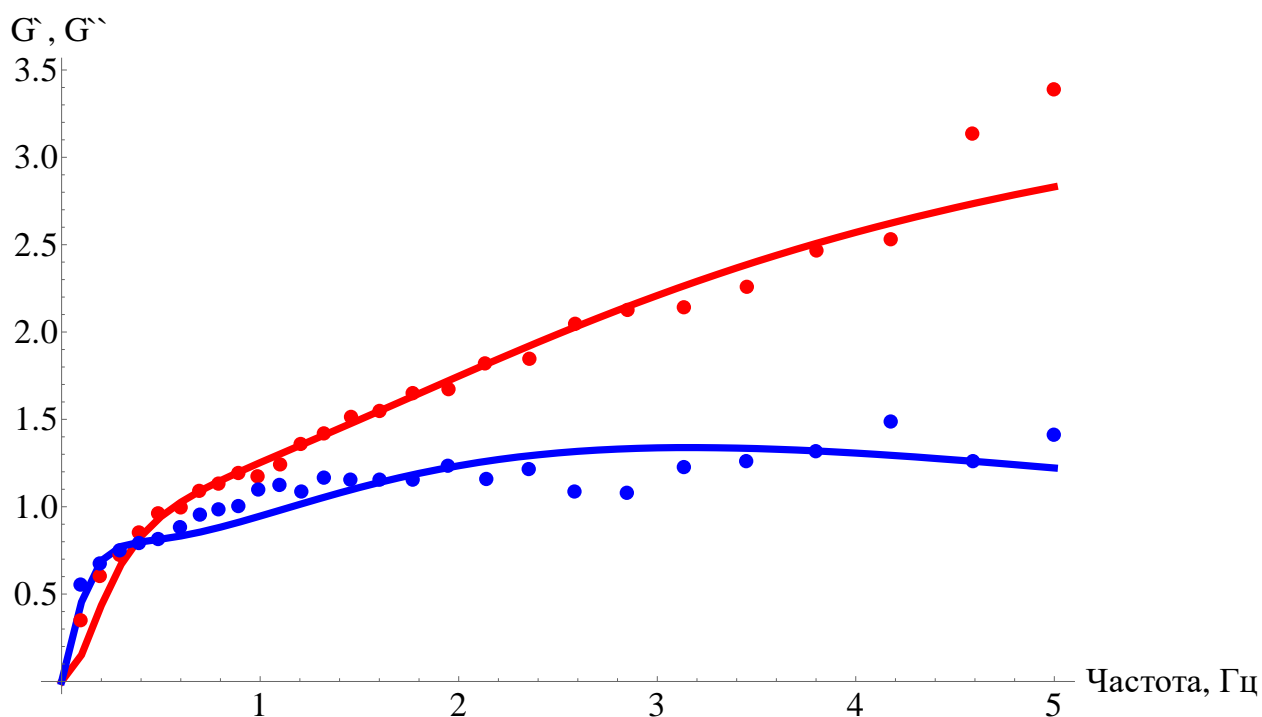


Рис. 5. Зависимость G' (красная линия) и G'' (синяя линия) от частоты для амплитуды колебаний 100%

Выводы

Проведена идентификация параметров модели для двух жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» Д и гуара. Показана применимость реологической модели вязкоупругой жидкости Леонова–Прокунина как для статических реологических тестов, так для осцилляционных испытаний. Также 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.

Проведенные исследования выполнены в рамках проекта РФФИ №19-48-590016 «Экспериментальное и теоретическое исследование реологического поведения неньютоновских сред (растворов вязкоупругих ПАВ) при квазистатическом и динамическом нагружениях».