

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

Исследование псевдопластических свойств жидкостей, применяемых для гидроразрыва пласта, в широком диапазоне скоростей сдвига и давлений

Д.В. Ефремов^{1†}, И.А. Банникова¹, С.В. Уваров¹, Ю.В. Баяндин¹,
О.Б. Наймарк¹, Е. В. Крутихин², В. А. Журавлёв²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

² АО «Полиэкс», г.Пермь, Россия

† efremov.d@icmm.ru

На основе экспериментальных данных по квазистатическому и динамическому нагружению жидкостей на основе вязкоупругих ПАВ, применяемых для гидроразрыва пласта, в работе предложена зависимость вязкости от скорости сдвига и давления в широком диапазоне условий нагружения. Экспериментальные исследования жидкостей проводились с использованием реометра с падающим шаром (метод Стокса); промышленных реометров, имеющих измерительную систему «конус-плоскость» или «коаксиальные цилиндры»; исследования при высоких скоростях сдвига проводились методом электрического взрыва проводника. Предложенная степенная зависимость вязкости от скорости сдвига с учетом давления позволяет адекватно описать экспериментальные данные по лабораторным испытаниям в характерных для гидроразрыва пласта диапазонах изменения скорости сдвига и давления в жидкости.

Ключевые слова: вязкоупругость, неньютоновская жидкость, гуар, вязкоупругий ПАВ, гидроразрыв пласта

Поступила в редакцию 23.06.2023; после рецензии 25.09.2023; принята к опубликованию 03.10.2023

Investigation of the pseudoplastic properties of fluids used for hydraulic fracturing in a wide range of shear rates and pressures

D.V. Efremov^{1†}, I.A. Bannikova¹, S.V. Uvarov¹, Yu.V. Bayandin¹,
O.B. Naimark¹, E. V. Krutikhin², V. A. Zhuravlev²

¹ Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

² JSC "POLYEX", Perm, Russia

† efremov.d@icmm.ru

Experimental data on quasi-static and dynamic loading of fluids with viscoelastic surfactants are used for the prediction of hydraulic fracturing. The paper proposes the dependence of viscosity on shear rate and pressure in a wide range of loading conditions. Experimental studies of liquids were carried out with the use of a falling ball rheometer (the Stokes method), industrial rheometers with a measuring system 'cone-plane' or 'coaxial cylinders'; studies at high shear strain rates were carried out by the method of electrical explosion of the conductor. The proposed power-law dependence of viscosity on the shear strain rate with taking into account pressure, makes it possible to ad-

equately describe experimental data from laboratory tests in the range of the shear strain rate and fluid pressure characteristic of hydraulic fracturing.

Keywords: viscoelasticity; non-Newtonian fluid; guar; viscoelastic surfactant; hydraulic fracturing

Received 23 June 2023; revised 25 September 2023; accepted 03 October 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-81-87

1. Введение

На сегодняшний день технология гидроразрыва пласта (ГРП) является наиболее эффективным методом увеличения притока в скважинах. В то же время, данная технология очень затратная. Поэтому актуальна задача прогнозирования, оптимизации и расчёта успешности проведения операции ГРП. Как правило, применяемые в технологии ГРП жидкости пропантоносители исследуются при скоростях сдвига до 1000 с^{-1} в условиях атмосферного давления, однако давление в скважине или в процессе ГРП может достигать 100 МПа и выше [1, 2]. В связи с этим возникает необходимость исследования жидкостей ГРП как при высоких скоростях сдвига, так и при значительных давлениях в жидкости. Зачастую подобные жидкости проявляют псевдопластические (неньютоновские) свойства, когда вязкость падает с увеличением скорости сдвига, в том числе при повышенных давлениях [3].

В работе [4] представлен обзор наиболее широко применяемых математических моделей в решателях гидроразрыва пласта как средство прогнозирования и оптимизации этой технологической операции. Однако большинство решателей ГРП не учитывают неньютоновское поведение жидкостей ГРП.

Основной признак неньютоновского поведения жидкостей заключается в нелинейной зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига. Было предложено множество моделей аппроксимации этих кривых для описания псевдопластических жидкостей, не обнаруживающих предельные напряжения, наибольшее распространение получила степенная модель (Освальда – Вейля) [5, 6]:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n$$

где τ – напряжение сдвига; k – показатель консистенции; n – показатель неньютоновского поведения (при $n < 1$ жидкость псевдопластичная, при $n > 1$ – дилатантная).

Для описания бингамовских пластиков, обнаруживающих предельные напряжения, используется модель Шведова – Бингама [5, 6]:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{при } \tau \leq \tau_0, \\ \tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} & \text{при } \tau > \tau_0, \end{cases}$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига; η – пластическая вязкость.

В работе [7] описывается задача о распространении трещины гидравлического разрыва в пористой среде под напором несжимаемой вязкой жидкости. Установлено, что система основных уравнений имеет степенное автомодельное решение, а в предельных режимах малой и большой пропитки жидкости в породе допускает классы решений либо степенного, либо экспоненциального типа.

В [8] рассматриваются результаты вычислительных экспериментов течения вязкоупругой жидкости с дробно-дифференциальным по времени реологическим уравнением состояния в квадратной каверне. Следует отметить, что учет подобных моделей в решателях гидроразрыва пласта осложняется представлением дробной производной и осмыслением ее геометрического смысла. Более физический подход описания нелинейных вязкоупругих свойств заключается в использовании обобщенной модели Максвелла [9], позволяющей получить хорошие результаты как для статической вязкости, так и для динамических характеристик (составляющих комплексного модуля упругости G' и G'').

Целью настоящей работы является исследование жидкостей на основе вязкоупругих ПАВ (производство АО «Полиэкс» – Сурфогель марки Д, тип 70-100) и гуаровой камеди, применяемых в технологии ГРП. Реологические свойства жидкостей исследовались реометрами различной конструкции, при скоростях сдвига до 1000 с^{-1} , а при высоких скоростях сдвига – методом электрического взрыва проводника на установке оригинального изготовления. Предложена физическая модель в виде степенной зависимости вязкости от скорости сдвига и давления.

2. Экспериментальная часть

Реологические свойства жидкостей при низких скоростях сдвига изучались методом Стокса; при стандартных для реометрии скоростях сдвига до 1000 с^{-1} исследования проводились с помощью реометра, снабжённого измерительной системой «конус-плоскость» (Physica MCR501 производства Anton Paar), и с помощью реометров, снабжённых измерительной системой «коаксиальные цилиндры» (RheolabQS производства Anton Paar), и системой оригинального изготовления, позволяющей не только получать значения вязкости при заданной скорости сдвига, но и производить визуальное

наблюдение за исследуемой жидкостью. Динамические испытания с осциллирующими нагрузками производились с помощью реометра Physica MCR501 с измерительной системой конус-плоскость [10]. Данные испытания проведены авторами ранее и показывают проявление вязкоупругих свойств жидкостей на основе вязкоупру-

гих ПАВ и на основе гуара. Также было установлено, что для обеих жидкостей отсутствуют предельные напряжения сдвига τ_0 [10].

Результаты измерения действительной части вязкости η для жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ и гуара, полученные разными методами, представлены на рис. 1.

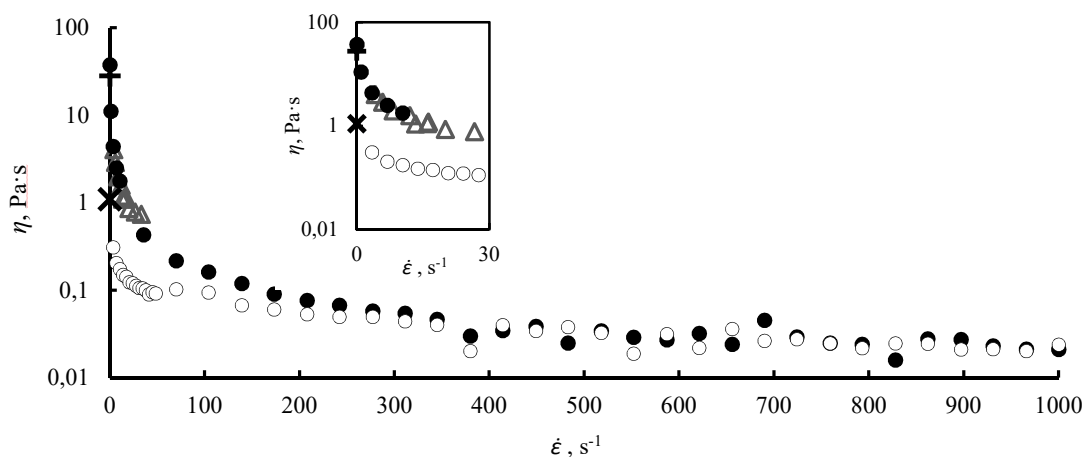


Рис. 1. Зависимости вязкости от скорости сдвига для жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (● – реометр Physica MCR501; + – метод Стокса; Δ – метод измерения вязкости с помощью коаксиальных цилиндров) и на основе гуара (○ – реометр Physica MCR501; X – метод Стокса)

Испытания жидкостей при высоких скоростях сдвига (до 10^5 с⁻¹) осуществлялись на оригинальной установке методом электрического взрыва проводника (ЭВП) [11]. В таблице 1 приведены зависимости оценочных значений сдвиговой вязкости жидкостей от скорости деформации на фронте волны сжатия, полученной методом ЭВП.

Таблица 1. Оценочные значения сдвиговой вязкости жидкостей от скорости деформации на фронте волны сжатия, полученной методом ЭВП

Вязкоупругий ПАВ		
$\dot{\epsilon}$, 10^5 с ⁻¹	η , Па·с	P , МПа
0.99	6.57	30.9
3.03	2.78	35.1
3.48	2.99	39.1
4.37	1.84	34.3
Гуар		
0.45	19.78	36.3
0.54	13.54	32.7
0.78	7.45	29.2
1.32	11.06	46.4
1.88	4.27	34.3

Все полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются между собой. Жидкость на основе вязкоупругого ПАВ показала более высокую стабильность реологических свойств, а, следовательно, имеет большие перспективы к применению [12, 13]. Установлено, что исследуемые жидкости проявляют неньютоновское поведение, когда сдвиговая вязкость уменьшается с увеличением скорости сдвига [14]. Подробные результаты экспериментальных исследований опубликованы в [10, 11, 15].

3. Физическая модель вязкости

На основании анализа полученных экспериментальных результатов было сделано предположение о том, что реологическое поведение исследуемых жидкостей в широком диапазоне условий нагружения можно описать уравнением вида

$$\eta = \eta_0 \frac{(P/P_0)^\alpha}{(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^\beta}. \quad (1)$$

Формула (1) задает зависимость вязкости от скорости сдвига и давления при $P > P_0$ и $\dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_0$, в остальных случаях $\eta = \eta_0$. В статическом эксперименте $P/P_0 = 1$, где P – давление в жидкости, P_0 – атмосферное давление, η – динамическая вязкость, η_0 – статическое значение вязкости, которая экспериментально определяется по методу Стокса, коэффициенты ϵ_0 , α и β – определяются аппроксимацией экспериментальных данных [10]. Значения параметров ϵ_0 и $\beta = n - 1$ определяется

по данным реометрических измерений – зависимости вязкости от скорости сдвига. Результаты аппроксимации представлены на рис. 2.

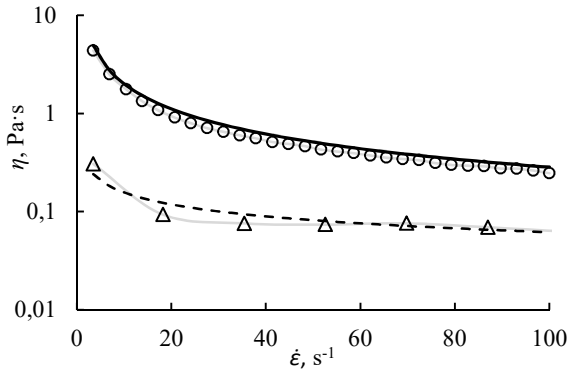


Рис. 2. Зависимости вязкости жидкостей от скорости сдвига; жидкость на основе вязкоупругого ПАВ: \circ – экспериментальные данные; сплошная линия – полученные с помощью уравнения (1); жидкость на основе гуара: Δ – экспериментальные данные, штриховая линия – описание с помощью уравнения (1)

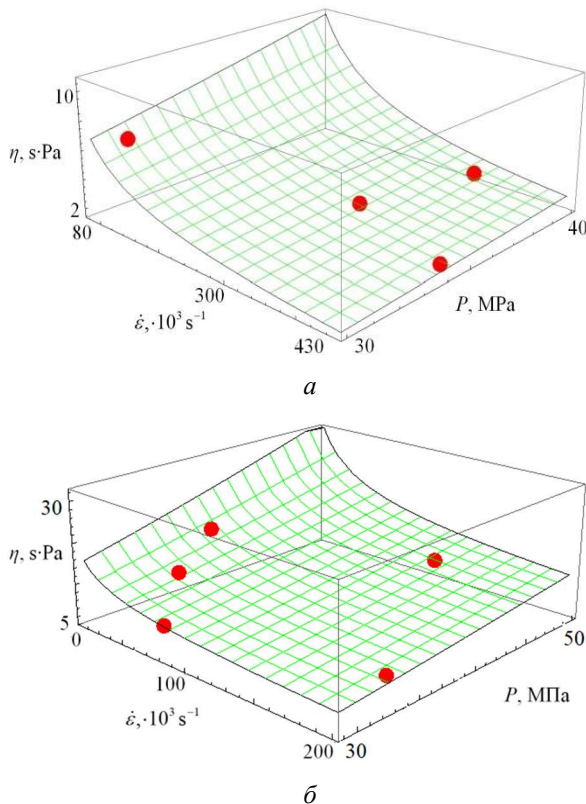


Рис. 3. Зависимости вязкости жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (а) и гуара (б), полученные в ходе эксперимента (маркеры) и с помощью уравнения (1) (поверхность)

Используя результаты эксперимента нагружения жидкостей методом ЭВП [11] и произведя аппроксимацию, можно определить коэффициент α . На рис. 3 показаны данные, полученные в экспе-

рименте по методу ЭВП (маркеры), и результаты аппроксимации предложенной моделью в зависимости от скорости сдвига и давления в виде поверхности.

На рис. 4 показаны результаты верификации расчетных кривых по данным динамического поведения исследованных жидкостей в эксперименте с осциллирующими напряжениями уравнением (1), которые хорошо согласуются между собой.

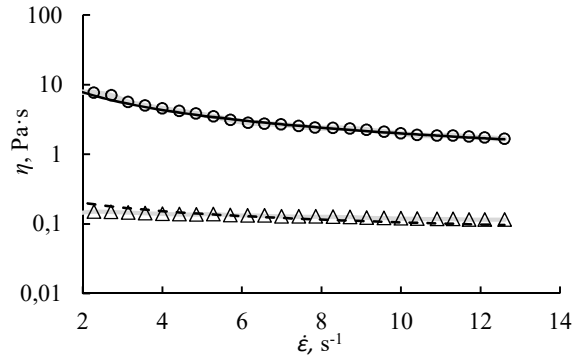


Рис. 4. Зависимости вязкости жидкости в эксперименте с осциллирующими напряжениями в зависимости от скорости сдвига; жидкость на основе вязкоупругого ПАВ: \circ – экспериментальные данные; сплошная линия – полученные с помощью уравнения (1); жидкость на основе гуара: Δ – экспериментальные данные, штриховая линия – описание с помощью уравнения (1)

Коэффициенты в уравнении (1), описывающем поведение жидкостей в широком диапазоне скоростей сдвига, представлены в таблице 2:

Таблица 2. Параметры уравнения (1) для жидкостей ГРП

Жидкость	$\eta_0, \text{Pa}\cdot\text{s}$	$\dot{\epsilon}_0, \text{s}^{-1}$	α	β
Вязкоупругий ПАВ	28.1	0.38	1.57	0.85
Гуар	1.1	0.1	1.42	0.43

4. Заключение

В работе были проведены исследования жидкостей на основе вязкоупругих ПАВ, применяемых для гидроразрыва пласта с использованием реометра с падающим шаром (метод Стокса); промышленных реометров, имеющих измерительную систему «конус-плоскость» или «коаксиальные цилиндры»; исследования при высоких скоростях сдвига проводились методом электрического взрыва проводника.

Установлено, что исследуемые жидкости не обнаруживают предельных напряжений, то есть не являются бингамовскими пластиками. Представленные жидкости проявляют псевдопластические

(неньютоновские) свойства, когда сдвиговая вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации.

Предложенная в работе реологическая модель для описания поведения жидкостей, применяемых в технологии ГРП для широкого диапазона скоростей сдвига, показала хорошее согласование с экспериментальными данными. Подобное поведение обнаружено для жидкостей на основе гуара [16, 17].

Полученные результаты имеют прикладное значение при моделировании процессов, происходящих в технологии ГРП, а предложенное уравнение может быть использовано для других жидкостей, проявляющих псевдопластические свойства. С одной стороны, установленные в лабораторных испытаниях псевдопластические свойства при повышенных скоростях сдвига и высоких давлениях повышают расходно-напорные характеристики при нагнетании жидкости, а с другой стороны, проявление вязкоупругости жидкостей при низких скоростях сдвига позволяет повысить пропантоне-сущую способность в процессах ГРП.

5. Благодарности

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

Список литературы

1. Альмухаметова Э.М., Ворсина Н.А., Сыртланов О.В. Эффективность применения гидроразрыва пласта в условиях Повховского месторождения // Эксплуатация нефтяных и газовых месторождений и подготовка нефти. 2013. Т. 93. № 3. С. 23-29
2. Антонов Е.Н., Шиян С.И. Техника и технология проведения гидравлического разрыва пласта на скважинах Самотлорского месторождения // Булатовские чтения. 2020. С. 48-57
3. Я.И. Френкель, Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 592 с.
4. Есипов Д. В., Куранакоев Д. С., Лапин В. Н., Чёрный С. Г. Математические модели гидроразрыва пласта // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 2. С. 33-61
5. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости М.:Мир. 1964. 216 с.
6. Рабинович Н.Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. М.: Недра. 1989. 270 с.
7. Тагирова В.Р. Распространение трещины гидроразрыва под напором неньютоновской жидкости // Вестн. Моск. ун-та. сер.1, математика. механика. 2009. № 6. С. 33-41
8. Новиков А.В. Численное моделирование течения вязкоупругой жидкости с дробно-дифференциальным реологическим уравнени-

ем состояния в квадратной каверне // Молодежный Вестник УГАТУ. 2021. Т. 24. № 1. С. 69-73

9. 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.
10. Ефремов Д.В., Банникова И.А., Баяндин Ю.В., Крутихин Е.В., Журавлев В.А., Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 4. С. 69–77. DOI: 10.17072/1994-3598-2020-4-69-77
11. 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 нагружении // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2022. № 1. С. 26–46. DOI: 10.7242/2658-705X/2022.1.3
12. Шупилов 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. Шупилов А. И., Крутихин Е. В., Гоголивили 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. Barnes H.A. Thixotropy – a review //Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 1997. Vol. 70. N. 1-2. P. 1-33. DOI: 10.1016/S0377-0257(97)00004-9
15. 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, 01203. DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012003
16. Skopintseva A.M., Dontsova E.V., Kovtunenkoa P.V., Baykina A. N., Golovin S. V. The coupling of an enhanced pseudo-3D model for hydraulic fracturing with a proppant transport model // Engineering Fracture Mechanics. 2020. P. 1-18. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107177
17. Baykin A.N. The range of influence of the poroelastic effects in terms of dimensionless complexes for the radial hydraulic fracturing model // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 128, 104240. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104240

References

1. Almkhametova E.M., Vorsina N.A., Syrtlanov O.V. Efficiency of using hydraulic fracturing in

- the conditions of the Povkhovskoye field. *Exploitation of Oil and Gas Fields and Oil Preparation*. 2013. vol. 93. no 3. pp. 23-29. (In Russian).
2. Antonov E.N., Shiyan S.I. Techniques and technology for hydraulic fracturing in the wells of the Samotlor field. *Bulatovskie Readings*, 2020, pp. 48-57. (In Russian).
 3. Frenkel Ya. I. *Kinetic Theory of Liquid*. Leningrad: Nauka, 1975. 592 p. (In Russian).
 4. Esipov D. V., Kuranakov D. S., Lapin V. N., Cherny S. G. Mathematical models of hydraulic fracturing. *Computational Technologies*, 2014, vol. 19, no 2, pp. 33-61. (In Russian).
 5. Wilkinson W.L. *Non-Newtonian Fluids*. M.: Mir, 1964. 216 p. (In Russian).
 6. Rabinovich N.R. *Engineering Problems of Continuum Mechanics in Drilling*. M.: Nedra, 1989. 270 p. (In Russian).
 7. Tagirova V.R. Propagation of a hydraulic fracture under the pressure of a non-Newtonian fluid. *Bull. of Moscow university. Ser.I. Mathematics. Mechanics*, 2009, no. 6, pp. 33-41 (In Russian).
 8. Novikov A.V. Numerical modeling of the flow of a viscoelastic fluid with a fractional differential rheological equation of state in a square cavity. *Youth Bulletin of the USATU*, 2021, vol. 24, no 1, pp. 69-73 (In Russian).
 9. 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.
 10. Efremov D. V., Bannikova I. A., Bayandin Y. V., Krutikhin 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
 11. 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, no. 1, pp. 26-46. DOI: 7242/2658-705X/2022.1.3 (In Russian).
 12. Shipilov A. I., Babkina N. V., Menshikov I. A. Research on the properties of a process liquid 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., Krutikhin 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. Barnes H.A., Thixotropy – a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1997, vol. 70, no. 1-2, pp. 1-33. DOI: 10.1016/S0377-0257(97)00004-9
 15. Efremov D.V., Bannikova I.A., Bayandin Yu.V., Krutikhin E.V., Zhuravlev V.A. Study of viscoelastic properties of fluids for hydraulic fracturing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1945, pp. 01203. DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012003
 16. Skopintsev A.M., Dontsov E.V., Kovtunenkov P.V., Baykin A. N., Golovin S. V. The coupling of an enhanced pseudo-3D model for hydraulic fracturing with a proppant transport model. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, vol. 236, 107177. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107177
 17. Baykin A.N. The range of influence of the poroelastic effects in terms of dimensionless complexes for the radial hydraulic fracturing model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, vol. 128, 104240. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.10424

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ефремов Д. В., Банникова И. А., Уваров С. В., Крутихин Е. В., Журавлёв В. А., Баяндин Ю .В., Наймарк О. Б. Исследование псевдопластических свойств жидкостей гидроразрыва пласта в широком диапазоне скоростей сдвига и давлений // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 3. С. 81–87. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-81-87

Please cite this article in English as:

Efremov D. V., Bannikova I. A., Uvarov S. V., Krutikhin E. V., Zhuravlev V. A., Bayandin Yu. V., Naimark O.B. Investigation of pseudoplastic properties of hydraulic fracturing fluids in a wide range of shear rates and pressures. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 3, pp. 81-87. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-81-87

Сведения об авторах

1. Ефремов Денис Викторович, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013
2. Банникова Ирина Анатольевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013

3. *Уваров Сергей Витальевич*, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013
4. *Баяндин Юрий Витальевич*, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013
5. *Наймарк Олег Борисович*, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013
6. *Крутихин Евгений Валерьевич*, к.х.н., начальник лаборатории, АО «Полиэкс», ул. Окулова, д. 75, корп. 2, г. Пермь, 614068
7. *Журавлёв Вадим Александрович*, к.т.н., заместитель директора по инвестициям и инновациям, АО «Полиэкс», ул. Окулова, д. 75, корп. 2, г. Пермь, 614068

Information about authors

1. *Denis V. Efremov*, Junior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
2. *Irina A. Bannikova*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
3. *Sergey V. Uvarov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
4. *Yuri V. Bayandin*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
5. *Oleg B. Naimark*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Laboratory Head, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
6. *Evgeny V. Krutikhin*, Candidate of Chemical Sciences, Laboratory Head, POLYEX company JSC; 75, bld. 2, Okulova st., Perm, 614068, Russia
7. *Vadim A. Zhuravlev*, Candidate of Engineering Sciences, Investment & Innovation Deputy Director, POLYEX company JSC; 75, bld. 2, Okulova st., Perm, 614068, Russia