

DOI: 10.17516/1998-2836-0315

EDN: IYPMRA

УДК 544.032.13:532.133:622.24

Study of Colloidal Stability and Rheological Properties of Invert Emulsion with Vegetable Oil as the Base for Drilling Fluid

Evgeniya I. Lysakova^{*a}, Vladimir A. Zhigarev^a,
Angelica D. Skorobogatova^a and Andrey V. Minakov^{a, b}

^a*Siberian Federal University*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b*Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS*

Novosibirsk, Russian Federation

Received 15.08.2022, received in revised form 11.10.2022, accepted 21.10.2022

Abstract. The paper is devoted to comprehensive studies of the colloidal stability and rheological properties of inverse emulsions based on technical rapeseed oil and developing on their base recommendations for using these environmentally friendly components as the base for synthesis drilling fluids. The study of the properties of emulsions was carried out depending on the concentration of oil (from 50 to 90 vol.%), the concentration of the emulsifier (from 1 to 3 vol.%) and temperature (from 20 to 80 °C). Stable invert emulsions were obtained, which retain their properties with increasing temperature, which indicates the possibility of their practical application as components for synthesis environmentally safer drilling fluids.

Keywords: drilling fluid, vegetable oils, rheology, colloidal stability.

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation, Krasnoyarsk Regional Fund of Science and Technology Support (grant No. 22–29–20087), <https://rscf.ru/project/22–29–20087>

Citation: Lysakova, E.I., Zhigarev, V.A., Skorobogatova, A.D., Minakov, A. V. Study of colloidal stability and rheological properties of invert emulsion with vegetable oil as the base for drilling fluid. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2022, 15(4), 529–538. DOI: 10.17516/1998-2836-0315



Исследование коллоидной устойчивости и реологических свойств инвертной эмульсии с растительным маслом в качестве основы для бурового раствора

Е. И. Лысакова^{*а}, В. А. Жигарев^а,
А. Д. Скоробогатова^а, А. В. Минаков^{а, б}

^аСибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

^бИнститут теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Российская Федерация, Новосибирск

Аннотация. Работа посвящена проведению комплексных исследований коллоидной устойчивости и реологических свойств обратных эмульсий на основе технического рапсового масла и разработке на их основе рекомендаций использования данных экологически чистых компонентов в качестве основы для создания буровых растворов. Исследование свойств эмульсий производилось в зависимости от концентрации масла (от 50 до 90 об.%), концентрации эмульгатора (от 1 до 3 об.%) и температуры (от 20 до 80 °С). Были получены устойчивые инвертные эмульсии, которые сохраняют свои свойства с ростом температуры, что говорит о возможности их практического применения в качестве компонентов для создания экологически более безопасных буровых растворов.

Ключевые слова: буровой раствор, растительные масла, реология, коллоидная устойчивость.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, Красноярского краевого фонда науки № 22–29–20087, <https://rscf.ru/project/22–29–20087>

Цитирование: Лысакова, Е. И. Исследование коллоидной устойчивости и реологических свойств инвертной эмульсии с растительным маслом в качестве основы для бурового раствора / Е. И. Лысакова, В. А. Жигарев, А. Д. Скоробогатова, А. В. Минаков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2022, 15(4). С. 529–538. DOI: 10.17516/1998-2836-0315

Введение

Буровой раствор – это сложная многокомпонентная система, регулирование свойств которого осуществляется введением в него различных материалов и химических реагентов [1]. Основные функции бурового раствора: вынос выбуренной породы на поверхность; предотвращение разрушения стенок скважины и поддержание их прочности за счет баланса гидростатического давления; предотвращение загрязнения пласта; контроль пластового давления; уменьшение коррозии оборудования; уменьшение износа буровой колонны и др.

Раствор на водной основе (РВО), будучи экологически чистым, был бы наиболее подходящей жидкостью для бурения, но большинство РВО сталкиваются с такими проблемами, как высокотемпературная реологическая нестабильность, большие фильтрационные потери, гидратация глинистых пластов и проблемы со смазывающей способностью. Для решения этих проблем используются буровые растворы на углеводородной основе (РУО): дизельное топливо и/или минеральное масло [3–5]. Однако данный вид промывочной жидкости создает серьезные экологические проблемы во всем мире [6, 7]. Буровой раствор на основе минерального масла или дизельного топлива токсичен, плохо поддается биологическому разложению и, таким образом, оказывает кумулятивное воздействие на наземные, прибрежные и морские среды обитания. Поэтому сегодня во многих странах использование подобных растворов в операциях бурения уже либо строго ограничено, либо запрещено. В связи с этим технические масла из семян растений являются потенциальными заменителями сырья на масляной основе [8, 9].

В настоящее время уже появились работы, в которых исследуется эффективность применения растительных масел в качестве основы бурового раствора. Например, в работе [10] разработали растворы на основе пальмового и арахисового масел со стандартными нефтепромысловыми добавками и сравнили их результаты с буровым раствором, приготовленным на основе дизельного топлива. Авторы сообщили, что буровые растворы на основе масел были экологически чистыми, поскольку они способствовали улучшению роста сельскохозяйственных культур при их утилизации на сельскохозяйственные угодья. В исследовании [11] показали, что сложные эфиры растительных масел могут быть использованы в качестве основной жидкости для бурения скважин в условиях высокого давления и температуры. Также показано, что они могут быть использованы в среде с температурой $< -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ без каких-либо серьезных нарушений характеристик течения [12–14]. В работах [15, 16] показан высокий потенциал бурового раствора на основе соевого масла по сравнению с буровым раствором на нефтяной основе, как по физико-химическим, так и по реологическим свойствам. Этот раствор менее токсичен, обладает лучшей термической стабильностью, более огнестойкий, обладает меньшими потерями фильтрата, имеет более плотную фильтрационную корку и прочность геля. В статье [17] сравнивались буровые растворы из горчичного, кукурузного, рапсового масла и дизельного топлива в разных соотношениях УВ/вода. Исследования показали, что лучшей пластической вязкостью обладает буровой раствор из горчичного масла и дизеля при УВ/вода 70/30 и 80/20, а при 90/10 все полученные растворы демонстрировали высокие значения пластической вязкости, что может вызывать проблемы осаждения твердых частиц в скважине.

Обзор литературы показал, что создание устойчивых рецептур буровых растворов на основе растительных технических масел, которые превосходят РУО по экологическим показателям, является сложной проблемой, прежде всего, по причине их низкой стабильности. Поэтому проведение дальнейших систематических исследований в этом направлении является актуальной задачей. Данная работа посвящена исследованию влияния концентрации эмульгатора, объемного соотношения масло/вода и температуры на реологические параметры и коллоидную устойчивость инвертных эмульсий технического рапсового масла как основы бурового раствора на углеводородной основе.

1. Методы исследований и методика приготовления эмульсий

База для бурового раствора на основе масла представляет собой обратную эмульсию «вода в масле». Для того чтобы повысить плотность эмульсии (до значений 1200 кг/м^3 , как в буровых растворах), в дисперсную фазу добавлялся хлорид кальция, массовое содержание которого составляло 38 %. Затем смешивались масло и рассол в требуемом объёмном соотношении (например, 70/30–70 масла и 30 воды). После этого добавлялся эмульгатор (в об.% по отношению к эмульсии масло/вода).

В работе исследованы следующие соотношения масло/вода: 50/50, 70/30, 90/10. В качестве основы использовалось техническое рапсовое масло. Для стабилизации эмульсии использовался неионогенный эмульгатор Agomashka, предназначенный для создания обратных эмульсий. При подготовке эмульсий применяли метод крупного дробления капель, а именно механическое диспергирование при помощи высокоскоростной мешалки при 20000 об/мин в течение 30 мин после введения каждого компонента.

Для изучения вязкости и реологии эмульсий использовался вискозиметр Ofite 900. Вискозиметр в процессе исследований позволяет изменять диапазон измерений от 0,0006 до 1000 об/мин и температуру от 20 до 80 °С. Погрешность измерений не более 2 %.

Коллоидная устойчивость эмульсий контролировалась с помощью анализатора Turbiscan LAB, который позволяет проводить анализ долговременной устойчивости образцов. Принцип работы Turbiscan LAB основан на методе многократного рассеяния света. Измерение повторных профилей пропускания T и обратного рассеяния BS в разные моменты времени t позволяет охарактеризовать изменения, протекающие в исследуемом образце.

2. Результаты экспериментальных исследований эмульсий на основе рапсового масла

2.1. Экспериментальное исследование устойчивости эмульсий

Для количественного сравнения устойчивости нескольких образцов в TurbiscanLAB используется индекс дестабилизации (TSI). Индекс дестабилизации рассчитывается как средняя по высоте виалы разность профилей обратного рассеяния излучения в соседние моменты времени. Чем ниже этот параметр, тем стабильнее эмульсия.

Для анализа влияния концентрации эмульгатора на устойчивость буровых эмульсий были построены профили пропускания и обратного рассеяния для образцов при температурах 20 °С и 80 °С. На рис. 1 приведены результаты исследований для растворов с разным соотношением масла и воды при одинаковом количестве эмульгатора. По профилю обратного рассеяния хорошо видны изменения в образцах с течением времени. Наиболее яркий пример демонстрирует эмульсия с соотношением масло/вода 90/10. Видно, что после нагревания расслоение эмульсии происходит практически по всей длине виалы. Тогда как для эмульсии 50/50 профиль обратного рассеяния остается неизменными во времени в течение практически всего эксперимента, что свидетельствует о коллоидной устойчивости эмульсии. При увеличении же концентрации масла до 70 об.% эмульсия становится немного неоднородной в верхней части виалы.

Проанализировав также влияние соотношения масло/вода на устойчивость растворов по графикам на рис. 2, можно сделать вывод, что лучшей стабилизацией обладает эмульсионный раствор с соотношением масло/ вода 50/50. В дополнение можно заметить, что влияние

температуры не оказывает никакого эффекта на эту эмульсию. Очевидно, что увеличение концентрации масла способствует увеличению скорости термодеструкции растворов. При этом можно наблюдать, что эмульсия с соотношением 90/10 при 80 °С полностью деградирует.

На рис. 3 продемонстрированы индексы дестабилизации в зависимости от концентрации эмульгатора. Особенно сильно заметна термодеструкция для эмульсий с концентрацией эмульгатора 2 об.%. Однако при 80 °С мы можем наблюдать, что на протяжении часа растворы демонстрируют одинаковые показатели, а затем двухпроцентный раствор ведет себя лучше, чем трехпроцентный, показатель индекса TSI для 2 об.% меньше на протяжении 4 часов, а после начинает линейно увеличиваться. Однопроцентная эмульсия демонстрирует лучший индекс TSI как при температуре 20 °С, так и при 80 °С

Также профили пропускания и обратного рассеяния были построены для анализа влияния концентрации эмульгатора на устойчивость буровых эмульсий. На рис. 4 приведены результаты исследований для растворов с разным содержанием эмульгатора и соотношением масло/вода 70/30. По профилю обратного рассеяния практически не видны изменения в образцах с течением времени, что при 20 °С, что при 80 °С расслоения виалы на всей длине не наблюдается,

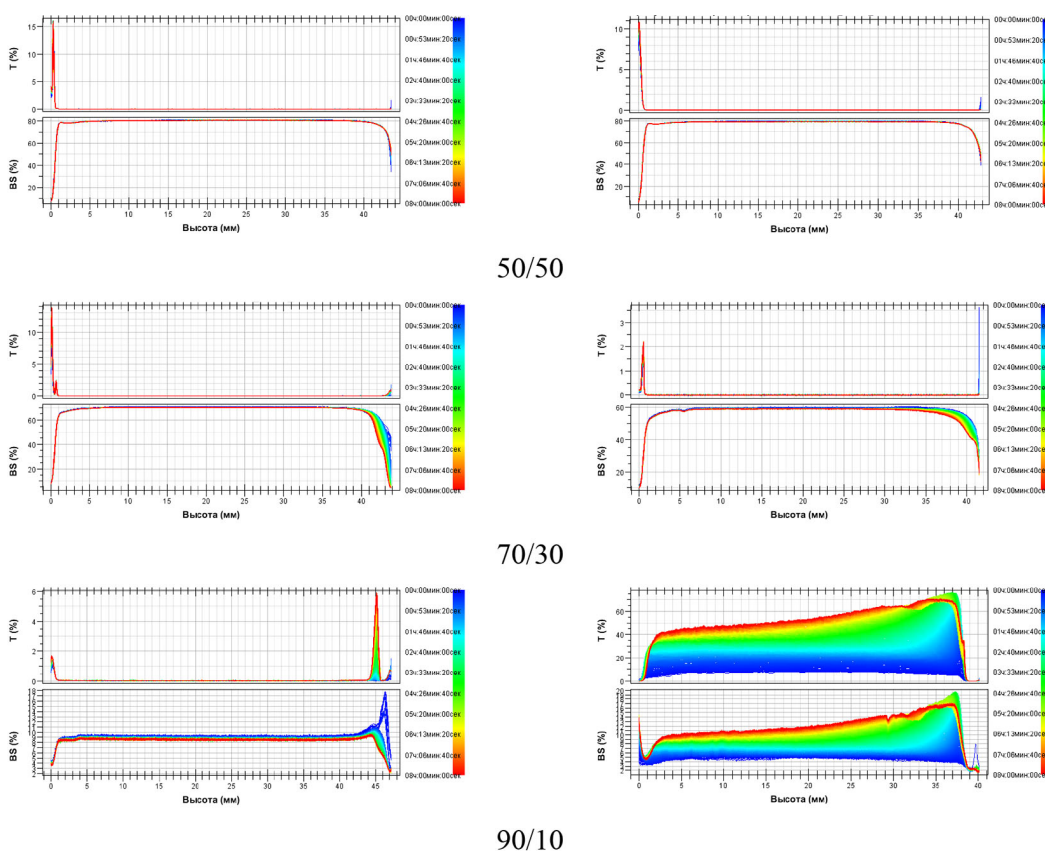


Рис. 1. Эволюция профилей пропускания (Т) и обратного рассеяния (BS) с ростом температуры для эмульсий с различным соотношением масла и воды при концентрации эмульгатора 2 об.% при 20 °С (слева) и 80 °С (справа)

Fig. 1. Evolution of transmission and backscatter profiles with increasing temperature for emulsions with various oil-to-water ratios at 2 vol.% emulsifier concentration at 20 °C (left) and 80 °C (right)

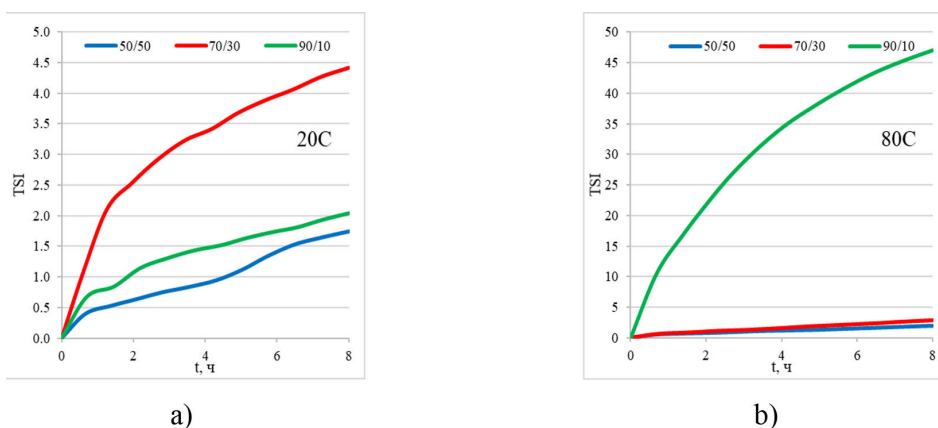


Рис. 2. Зависимость индекса устойчивости TSI (Turbiscan Stability index) от разных соотношений масло/вода при температурах (a) 20 °C и (b) 80 °C

Fig. 2. Dependence of the TSI (Turbiscan Stability index) on various oil/water ratios at temperatures of (a) 20 °C and (b) 80 °C

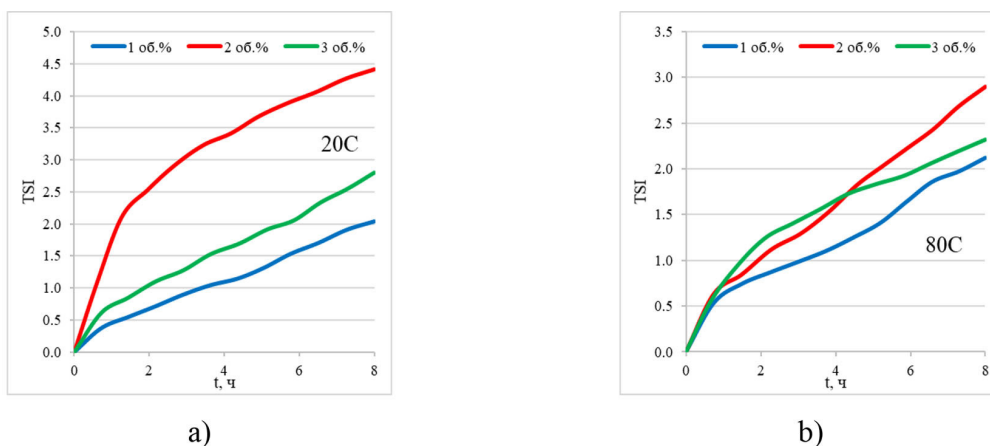


Рис. 3. Влияние концентрации эмульгатора на индекс дестабилизации эмульсий с соотношением масло/вода 70/30 при температурах (a) 20 °C и (b) 80 °C

Fig. 3. Effect of emulsifier concentration on the stability index of emulsions with an oil/water ratio of 70/30 at temperatures (a) 20 °C and (b) 80 °C

что может говорить о том, что полученные эмульсии являются коллоидно устойчивыми и концентрация эмульгатора не влияет на стабилизацию эмульсии. Поэтому можно утверждать, что коллоидная устойчивость полученных эмульсий не зависит от концентрации эмульгатора, но зависит от соотношения содержания масла/вода. Чем больше масла в эмульсии, тем она менее устойчива.

2.2. Исследование влияния температуры на вязкость эмульсий

Вязкость буровых растворов – одно из его важнейших физико-химических свойств, которое непосредственно влияет на способность бурового раствора выносить выбуренную породу на поверхность, на предотвращение, снижение или прекращение поглощений раствора, на ги-

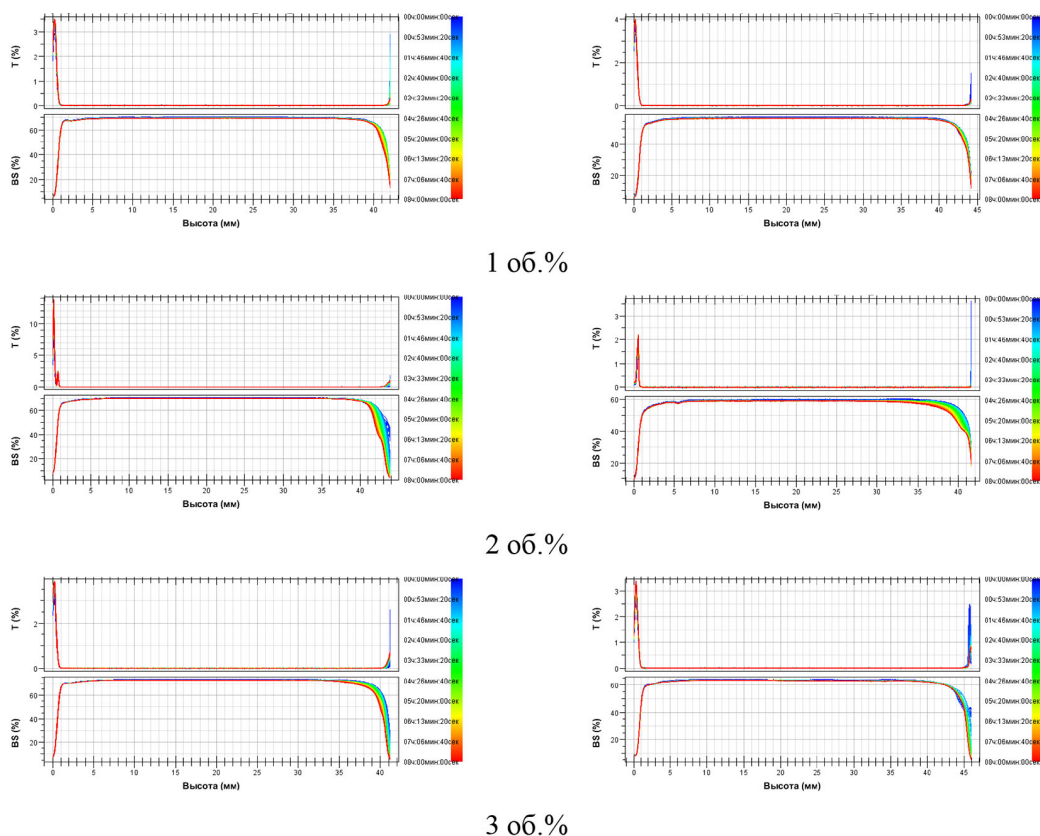


Рис. 4. Эволюция профилей пропускания и обратного рассеяния с ростом температуры для эмульсий с соотношением масло/вода 70/30 при различных концентрациях эмульгатора при 20 °C (слева) и 80 °C (справа)

Fig. 4. Evolution of transmission and backscatter profiles with increasing temperature for 70/30 oil/water emulsions at various emulsifier concentrations at 20 °C (left) and 80 °C (right)

гидродинамические сопротивления в циркуляционной системе, режим течения бурового раствора и многое другое. Вначале были проведены измерения напряжения сдвига в эмульсиях при разных скоростях сдвига (рис. 5). Здесь в качестве примера приведены данные для эмульсий с добавкой 2 об.% эмульгатора. Было установлено, что касательное напряжение сдвига, вызываемое движением жидкостью, линейно пропорционально скорости сдвига. Таким образом, в широком диапазоне температур и соотношений воды и углеводородной фазы эмульсии являются ньютоновскими жидкостями. С ростом температуры напряжение сдвига уменьшается для всех рассмотренных случаев.

Зависимость коэффициента вязкости эмульсий от температуры при различных соотношениях воды и УВ фазы приведена на рис. 6. Видно, что с увеличением содержания масла все эмульсии закономерно разжижаются и их коэффициент вязкости снижается. Это связано с уменьшением межфазной поверхности между дисперсионной средой (маслом) и дисперсной фазой (водой). С ростом температуры вязкость всех эмульсий значительно снижается. При этом с ростом температуры разница показателей эффективной вязкости эмульсий с различным содержанием масла уменьшается. Так, при 20 °C эффективная вязкость для эмульсии с содер-

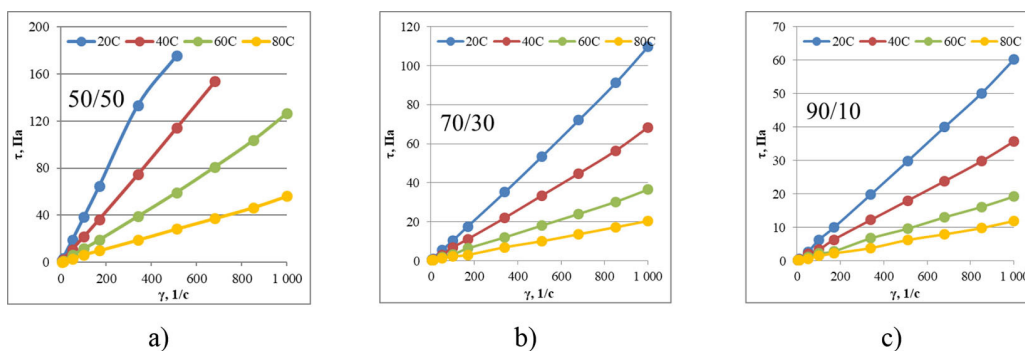


Рис. 5. График зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига при разных температурах для бурового раствора с 2 об.% эмульгатора и соотношении масло/вода 50/50 (а), 70/30 (б) и 90/10 (с)

Fig. 5. Plot of shear stress versus shear rate at different temperatures for drilling fluid with 2 vol.% emulsifier and oil/water ratio 50/50 (a), 70/30 (b) and 90/10 (c)

жением 90/10 уменьшилась в 6,5 раза относительно эмульсии 50/50. В то время как для 80 °С вязкость уменьшилась только в 4 раза.

Далее было изучено влияние концентрации эмульгатора на реологическое поведение эмульсий на основе растительного масла. Было показано, что в пределах изменения концентраций до 3 об.% эмульгатор не влияет на реологию эмульсий. Все они остаются ньютоновскими жидкостями. Из анализа влияния эмульгатора на эффективную вязкость эмульсий (рис. 7) видно, что концентрация эмульгатора, который необходим для создания устойчивых эмульсий, также фактически не влияет на вязкость эмульсии, что очень хорошо с точки зрения практического применения таких эмульсий в качестве основы для бурового раствора, так как для созда-

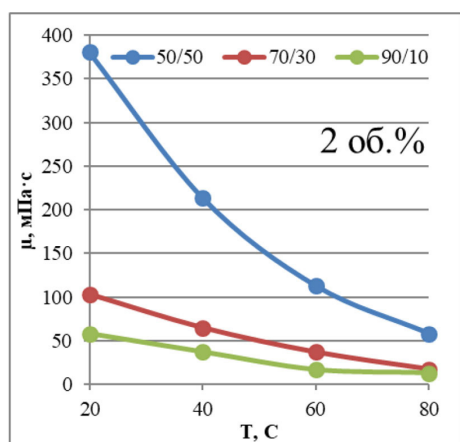


Рис. 6. Зависимость эффективной вязкости от температуры для эмульсии с 2 % концентрацией эмульгатора и различным соотношением масло/вода

Fig. 6. Temperature dependence of effective viscosity for an emulsion with 2 % emulsifier concentration and various oil/water ratios

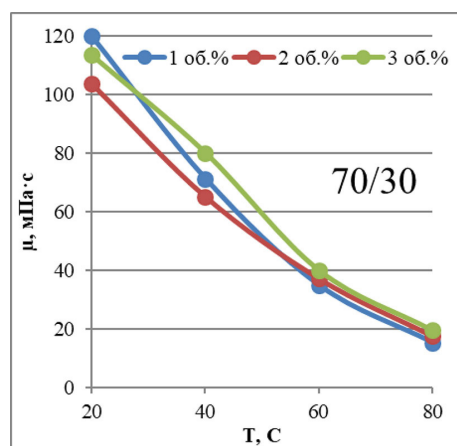


Рис. 7. Зависимость эффективной вязкости от температуры для эмульсии с соотношением масло/вода 70/30 и различной концентрацией эмульгатора

Fig. 7. Effective viscosity versus temperature for an emulsion with an oil/water ratio of 70/30 and various concentrations of emulsifier

ния устойчивого раствора достаточно минимального количества эмульгатора, что значительно снизит стоимость промывочной жидкости.

Таким образом, на основании полученных данных о коллоидной устойчивости и вязкости эмульсий от концентрации эмульгатора при различных соотношениях масло/вода и температуре можно сделать вывод, что оптимальной концентрацией эмульгатора для приготовления является 2 об.%.

Заключение

В данной работе было проведено исследование физико-химических свойств инвертной эмульсии на основе технического растительного масла с целью определения ее оптимальных параметров для дальнейшего использования в качестве основы для бурового раствора. Для этого было изучено влияние концентрации эмульгатора, концентрации масла, температуры на реологические параметры, электрическую стабильность, а также на коллоидную устойчивость полученных эмульсий.

Было показано, что с ростом температуры эмульсии с оптимальным соотношением масло/вода более 50/50 практически не подвержены термодеструкции. Изменение концентрации эмульгатора существенно сказывается на стабильности эмульсии также только с ростом температуры. Это говорит о том, что буровые растворы на основе данного технического масла возможно использовать в широких диапазонах температур, что очень важно с точки зрения их практического применения в сложных горно-геологических условиях.

Исследование вязкости полученных эмульсий показало, что все рассмотренные эмульсии являются ньютоновскими жидкостями. Концентрация эмульгатора, в свою очередь, практически не влияет на эффективную вязкость эмульсионных растворов на основе технического масла.

Список литературы / References

1. Caenn R., Darley H., Gray G. Composition and properties of drilling and completion fluid. Oxford: Elsevier Inc, 2011. 701.
2. Dhiman A. S. Rheological properties and corrosion characteristics of drilling mud additives. Master degree of engineering. Dalhousie University, 2012. 78.
3. Lo Peresich R.L., Burrell B. R., Prentice G. M. Development and field trial of a biodegradable invert emulsion fluid. *SPEDE* 21935 1991.
4. Jha P.K., Mahto V., Saxena V.K. Emulsion based drilling fluids: an overview. *International Journal of Chemistry Research* 2014. 6, 2306–2315.
5. Adams N.J., Charrier T. Drilling engineering: A complete well planning approach. Oklahoma: Penn Well Publishing Company Tulsa, Oklahoma, 1985.
6. Growcock F.B., Curtis G. W., Hoxha B., Brooks W. S., Candler J. E. Designing invert drilling fluids to yield environmentally friendly drilled cuttings. *SPE-74474-MS* 2002.
7. Bleier R., Stark C. L., Leuterman A. J.J. Drilling fluids: making peace with the environment. *SPE-24553-MS* 1993.
8. Fadairo A., Falode O., Ako C., Adeyemi A., Ameloko A. Novel formulation of environmentally friendly oil based drilling mud. *New Technol. Oil Gas Ind., InTech* 2012. 1–32, 2012.

9. Dankwa A., Amarin R., Ackumey S. S. Investigating the potential use of waste vegetable oils to produce synthetic base fluids for drilling mud formulation. *SPE-193449-MS* 2018.
10. Amarin R., Dosunmu A., Amankwah R. Local plant seed oils Esters: the frontier of geothermal drilling applications – a Review. *Ghana Journal of Technology* 2017. 1(2), 62–72.
11. Amarin R., Dosunmu A., Amankwah R. K. Enhancing the stability of local vegetable oils esters for high geothermal drilling applications. *Journal of Petroleum and Gas Engineering* 2015. 6(8), 90–97.
12. Yasin A., KhamisA., Abdullah M. Palm oil diesel as a base fluid in formulating oil based drilling fluid. *SPE 23001 1991*. 190–206.
13. Amanullah M., Islam., Chami S., Ienco G. Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids* 2005. 397–400.
14. Amanullah M. Physicochemical characterisation of vegetable oils and preliminary test results of vegetable oil-based muds. *SPE-97008-MS* 2005.
15. El-Fakharany T.E., Geliel A., Salhin H. Formulating environmentally friendly oil-base mud using soybean oil. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 2017. 4(7), 57–61.
16. Agwu O., Okon A., Udoh F. A Comparative Study of diesel oil and soybean oil as oil-based drilling mud. *Journal of Petroleum Engineering* 2015. 1, 1–10.
17. Jeswani S.S., Mahesar A A., Memon K R., Tunio A. H. Experimental based investigation for rheological characteristics of vegetable oil base mud. *Engineering science and technology international research journal* 2018. 2(3), 27–32.