

EDN: IURBPU

УДК 532.133:622.24.06:544.773.33

## Study of Rheology and Microrheology of Emulsion Drilling Fluid Based on Technical Plant Oils

**Evgeniya I. Lysakova<sup>\*a</sup>,**  
**Alexander V. Matveev<sup>a</sup>, Angelica D. Skorobogatova<sup>a</sup>,**  
**Alexander L. Neverov<sup>a</sup> and Andrey V. Minakov<sup>a, b</sup>**  
*<sup>a</sup>Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*  
*<sup>b</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

Received 01.11.2023, received in revised form 16.02.2024, accepted 19.02.2024

**Abstract.** The study is devoted to conducting comprehensive studies of the rheological and elastic properties of emulsion drilling fluids based on technical vegetable oil with an oil/water ratio of 70/30. The resulting solutions were compared with oil-based drilling fluids developed according to the same recipe. Technical oils of rapeseed, flax and camelina plants, diesel fuel and synthetic hydrocarbon oil were considered as a dispersed medium. Additionally, the rheology and microrheology of drilling fluids were analyzed after thermal destruction tests at 150 °C. It has been shown that drilling fluids based on plant oils are not inferior in their properties, and in some parameters even superior to oil-based drilling fluids. This opens up broad prospects for the use of plant oils as a replacement for existing oil-based drilling fluids.

**Keywords:** drilling fluid, vegetable oils, rheology, microrheology.

**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., Matveev A. V., Skorobogatova A. D., Neverov A. L., Minakov A. V. Study of rheology and microrheology of emulsion drilling fluid based on technical plant oils. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2024, 17(1), 105–115. EDN: IURBPU



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: EMikhienkova@sfu-kras.ru

# Исследование реологии и микрореологии эмульсионного бурового раствора на основе технических растительных масел

Е. И. Лысакова<sup>а</sup>, А. В. Матвеев<sup>а</sup>,  
А. Д. Скоробогатова<sup>а</sup>, А. Л. Неверов<sup>а</sup>, А. В. Минаков<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск

<sup>б</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Российская Федерация, Новосибирск

**Аннотация.** Работа посвящена проведению комплексных исследований реологических и упругих свойств эмульсионных буровых растворов на основе технического растительного масла с соотношением масло/вода 70/30. Было проведено сравнение полученных растворов с растворами на углеводородной основе, созданных по той же рецептуре. В качестве дисперсионной среды были рассмотрены технические растительные масла растений рапса, льна и рыжика, дизельное топливо и синтетическое углеводородное масло. Дополнительно производился анализ реологических и упругих свойств буровых растворов после испытаний на термодеструкцию при 150 °С. Показано, что буровые растворы на основе растительных масел по своим свойствам не уступают, а по некоторым параметрам даже превосходят промылочные жидкости на углеводородной основе. Это открывает широкую перспективу использования растительных масел в качестве замены существующей углеводородной основе буровых растворов.

**Ключевые слова:** буровой раствор, растительные масла, реология, микрореология.

**Благодарности.** 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., Матвеев А. В., Скоробогатова А. Д., Неверов А. Л., Минаков А. В. Исследование реологии и микрореологии эмульсионного бурового раствора на основе технических растительных масел. Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2024, 17(1). С. 105–115. EDN: IURBPU

## Введение

Буровой раствор (БР) предназначен для безопасного проведения работ по бурению и заканчиванию нефтегазовой скважины. Промылочные жидкости должны быть подобраны таким образом, чтобы их физико-химические свойства позволили оптимизировать процесс бурения и снизить риски появления аварийных ситуаций. Буровой раствор – это сложная многокомпонентная система, регулирование свойств которой осуществляется введением различных материалов и химических реагентов [1]. В настоящее время разработано и используется большое количество рецептур буровых растворов, отличающихся по виду дисперсионной среды и дисперсной фазы [2]. При использовании бурового раствора на водной основе вода попадет в породу

и непременно изменит ее механические свойства. Эти изменения могут быть не столь большими, чтобы привести к нарушению стабильности ствола, и, конечно, их можно свести к минимуму применением ингибированных систем, таких, например, как полимерный раствор с хлоридом калия [3]. Однако эти системы не могут предотвратить смачивание водой пор горной породы. Стабилизировать этот процесс можно растворами, дисперсионной средой которых являются углеводороды (РУО) [4]. При использовании РУО стала возможна максимально достижимая стабильность ствола при одновременном контроле горного давления посредством изменения плотности бурового раствора [5]. Однако у РУО также есть недостатки. Один из них – стоимость, но так как РУО не приходится разбавлять, несложно хранить и можно использовать повторно, общие затраты на них снижаются. Основная проблема РУО – негативное воздействие на окружающую среду. Они достаточно токсичны, плохо поддаются биологическому разложению, что негативно сказывается на наземных, прибрежных и морских экосистемах [6]. Из-за этого многие страны уже запретили или строго ограничили использование таких растворов. Таким образом, можно сделать вывод, что существующие типы БР не совершенны и обладают рядом недостатков, поэтому остается актуальной задача поиска альтернативного вида БР. Например, потенциальной заменой углеводородным растворам могут стать технические масла, получаемые из семян растений. Эти масла более безопасны для окружающей среды, так как они биоразлагаемы и не оказывают кумулятивного воздействия на экосистемы [7].

В настоящее время уже появились работы, в которых исследуется эффективность применения растительных масел в качестве основы бурового раствора. Например, в работе [8] оценили воздействие бурового раствора на основе растительных масел на окружающую среду. Были приготовлены образцы на основе дизельного топлива, масла ятрофы и канолового масла. Показано, что ятрофа имеет самую низкую вязкость, что означает меньшее сопротивление потоку и меньшие потери давления. Результаты теста на токсичность подтвердили, что ятрофа более безопасна для растений и почвенных микроорганизмов, в то время как дизельное топливо оказалось наиболее токсичным среди трех образцов. Далее авторы продолжили свои исследования [9] и предложили использовать инвертно-эмульсионный раствор на основе биоразлагаемого масла семян нима в качестве альтернативы традиционному буровому раствору на основе дизельного топлива. Они показали, что данные растворы соответствуют требованиям стандарта API, экологически безопасны и сопоставимы по стоимости. Результаты реологических и антифрикционных испытаний показали, что растворы на основе биодизельного масла из нима сравнимы с обычными буровыми растворами на основе дизельного топлива. Биодизельное топливо имеет значительно лучшую температуру вспышки (168 °С) в сравнении с дизельным топливом (70 °С); что указывает на его лучшую термостойкость и пожаробезопасность.

В ходе исследования [10] были использованы три различных масла (кукурузное, горчичное, масло канолы) в качестве основы инвертных буровых растворов. Были рассмотрены соотношения масло/вода 90/10, 80/20 и 70/30. Пластическая вязкость раствора на основе горчичного масла при соотношении 80/20 составила 23 сП, что сопоставимо с раствором на основе дизельного топлива (22 сП), разработанного по той же рецептуре. Буровой раствор на кукурузном и каноловом масле показал более высокую пластическую вязкость. Наиболее стабильным оказался раствор на основе горчичного масла 80/20.

В источниках [11,12] идет речь об использовании биодизеля, полученного из отходов кулинарного масла, в качестве основы БР. Показано, что биодизельное топливо нетоксично, обладает высокой температурой вспышки и хорошей биоразлагаемостью. Показано, что известь,  $\text{CaCl}_2$  и органофильная глина в водной фазе улучшают стабильность инвертной эмульсии биодизеля. БР на основе биодизеля остается стабильным после термостарения при 120 °С в течение 16 часов, имеет реологическое поведение и фильтрационные свойства, соответствующие требованиям проведения буровых работ, демонстрирует хорошую ингибирующую и смазывающую способность, а также химическую устойчивость.

Таким образом, показано, что в настоящее время уже активно исследуют возможности использования технических масел на основе растительного сырья в качестве заменителей углеводородных растворов [13]. Это может привести к развитию новых экологически безопасных технологий и инноваций в области бурения [14,15]. Целью настоящей работы является проведение исследований реологии буровых растворов на основе технических растительных масел как одного из важнейших параметров любой промывочной жидкости и сравнение полученных результатов с реологией существующих растворов на углеводородной основе. Также в работе впервые произведена оценка не только вязкопластичных, но и вязкоупругих свойств разработанных буровых эмульсий, в том числе после испытаний на термодеструкцию.

### 1. Методы исследований и методика приготовления эмульсий

Для исследования вязкости и реологии буровых растворов был использован вискозиметр Ofite 900 (рис. 1а). В ходе исследований вискозиметр дает возможность работать с 12 различными скоростями и менять диапазон измерений в пределах от 0,0006 до 1000 об/мин. Позволяет определять скорость сдвига, напряжение сдвига, вязкость и температуру. Точность поддержания скорости 0,001 об/мин.

Микрореология образцов исследовалась с помощью Rheolaser MASTER™ (рис. 1б), технология которого основана на одном из методов динамического светорассеяния, называемом диффузионной волновой спектроскопией (Diffusive Wave Spectroscopy, DWS). DWS представляет собой пассивный метод изучения микрореологии.

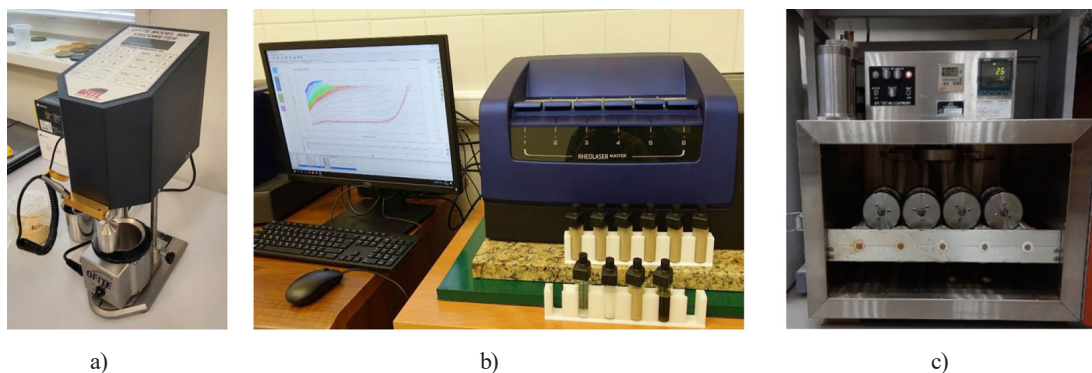


Рис. 1. Вискозиметр OFITE-900 (а); Rheolaser MASTER™ (б); печь 5-вальцовая OFITE 173–00–1 (с)  
 Fig. 1. OFITE-900 viscometer (a); Rheolaser MASTER™ (b); 5-roller oven OFITE 173–00–1 (c)

Дополнительно были произведены испытания бурового раствора на термостарение на пьезоцилиндровой печи OFITE 173–00–1 (рис. 1с). Выдерживание бурового раствора наглядно демонстрирует воздействие тепла на вязкость, а также на поведение различных добавок при повышенных температурах. Ячейки термостарения непрерывно вращаются для имитации циркуляции бурового раствора. В работе выдерживалась температура 150 °С в течение 16 ч.

Буровой раствор был приготовлен в соответствии с рецептурой, которая применяется при бурении существующих нефтегазовых скважин. Буровой раствор являлся обратной эмульсией, где вода распределена в виде мельчайших капель, а масло служит дисперсионной средой. В данном случае в качестве дисперсионной среды использовалось синтетическое низковязкое масло (далее по тексту БР-1), зимнее дизельное топливо (БР-2), а также растительное техническое рапсовое масло (БР-3), льняное масло (БР-4) и масло рыжика (БР-5). Вязкость и плотность основы бурового раствора представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства дисперсионной среды эмульсионных буровых растворов

Table 1. Physicochemical properties of the dispersed medium of emulsion drilling fluids

Дисперсионная среда	Обозначение	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, мПа·с
Синтетическое масло	БР-1	848	6,3
Дизельное топливо зимнее	БР-2	830	3,5
Техническое рапсовое масло	БР-3	928	65
Техническое льняное масло	БР-4	926	48
Техническое рыжиковое масло	БР-5	919	53

Раствор был приготовлен с соблюдением временных интервалов и пропорций каждого добавляемого компонента. Процесс начинался с приготовления водного раствора, содержащего 19 % хлорида кальция. Этот раствор CaCl<sub>2</sub> снижал поверхностное натяжение на границе раздела фаз. Затем в дисперсионную среду последовательно добавлялись эмульгатор, структурообразователь, гидрофобизатор, нефтерастворимый полимер и коагулирующие добавки в требуемом объемном соотношении. После этого полученная дисперсная среда смешивалась с рассолом. В ходе исследования были изучены буровые растворы с соотношением масло/вода равным 70/30. Это соотношение было выбрано на основе учета нескольких факторов: при повышении концентрации воды эмульсия теряет стабильность, а увеличение содержания масла приводит к увеличению стоимости бурового раствора. Таким образом, соотношение 70/30 считается оптимальным.

## 2. Результаты экспериментальных исследований буровых эмульсий

### 2.1. Измерение реологии буровых 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 гидравлические сопротивления в циркуляционной системе, режим течения бурового раствора

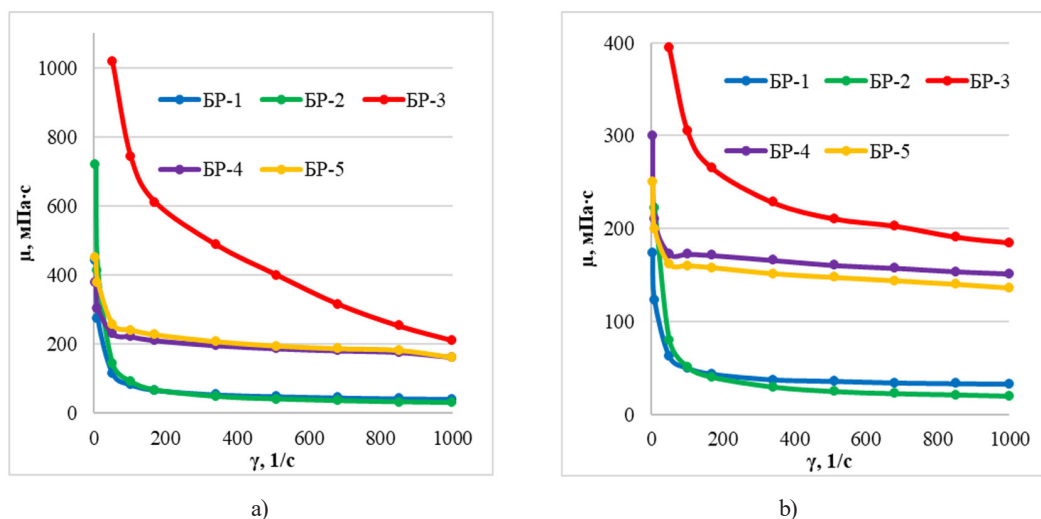


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости буровых эмульсий от скорости сдвига в стандартных условиях (а) и после термического старения (б) при 150 °С в течение 16 часов

Fig. 2. Dependence of effective viscosity of drilling fluids on shear rate under standard conditions (a) and after thermal aging (b) at 150 °C for 16 hours

и многое другое. Все рассмотренные буровые растворы являются неньютоновскими жидкостями, реология которых описывается законом Гершеля-Балкли. На рис. 2 показана зависимость вязкости растворов от скорости сдвига. Из графика видно, что наименьшими показателями вязкости на всех значениях скоростей сдвига обладают растворы на основе дизеля и синтетического масла. Вязкость БР на основе рапсового масла на высоких скоростях сдвига выше, чем у раствора на основе синтетического масла и дизеля в 5 и 7 раз соответственно. Можно сделать вывод, что на эффективную вязкость буровых растворов наибольшее влияние оказывает вязкость базовой дисперсионной среды.

Высокая вязкость бурового раствора на основе технических растительных масел при бурении оказывает влияние главным образом на качество очистки забоя от выбуренной породы. Чем выше вязкость, тем больше частиц шлама вовлекается в поток, и тем лучше происходит очистка скважины при меньшей скорости циркуляции бурового раствора, что позволяет оптимизировать процесс бурения. Однако в призабойной зоне (на дне скважины) высокая вязкость раствора может, напротив, привести к ухудшению очистки. Это связано с тем, что при промывке вязкими растворами на дне и стенках скважины в призабойной зоне наблюдается увеличение толщины застойной зоны жидкости и, как следствие, происходит ухудшение очистки забоя. В связи с этим необходимо подбирать оптимальную вязкость бурового раствора, которая будет отвечать всем требованиям, необходимым для проведения качественного процесса бурения с сохранением технологии и оптимального времени строительства скважины. При прочих равных условиях, несмотря на то что высоковязкий раствор на основе технических масел будет снижать механическую скорость бурения, он будет способствовать значительному сокращению времени на очистку бурового шлама, что в конечном итоге общее время строительства скважины либо вернет на уровень, соответствующий бурению углеводородными растворами, либо даже немного его сократит. Это связано с тем, что растворы на основе растительных

масел не пожароопасны, а это не требует дорогостоящих закрытых очистных установок; эти растворы не токсичны, что не требует дополнительной очистки шлама от полиароматических соединений и позволяет его утилизировать в открытых амбарах, что также сокращает время и стоимость его утилизации.

Термостарение буровых растворов относится к изменениям их свойств, вызванным воздействием высоких температур. При нагревании буровые растворы могут подвергаться различным процессам деградации и изменению состава, что может негативно сказываться на их эффективности и производительности. Высокая температура может привести к изменению физико-химических свойств растворов, таких как вязкость, реологические характеристики, электростатическая и эмульсионная стабильность.

Возвращаясь к вязкости БР, стоит обратить внимание на ее зависимость от температуры. Следует отметить, что с ростом температуры вязкость всех эмульсий снижается. При повышении температуры молекулы вещества начинают двигаться быстрее, сталкиваясь между собой с большей энергией. Это приводит к уменьшению сил сцепления между частицами масла и воды в эмульсии, что уменьшает ее вязкость в 2 раза (рис. 2b).

## 2.2. Исследование микрореологии буровых эмульсий

Буровые растворы помимо вязкопластичных свойств обладают вязкоупругими характеристиками. Фактически большинство буровых растворов обладают свойствами геля, и для их применения важно знать время, за которое буровой раствор переходит из жидкого состояния в твердое. Этот процесс называется формированием структуры. Время формирования структуры является важной информацией для практического применения буровых растворов. В данной работе исследование процессов структурообразования проводилось путем изучения микрореологии буровых растворов.

Исследование процесса структурообразования проводили с помощью микрореологического анализатора Rheolaser MASTER. Принцип работы анализатора основан на измерении динамического рассеяния лазерного излучения частицами в растворе (длина волны 650 нм). Если для регистрации такого рассеянного излучения использовать видеокамеру, в результате интерференции рассеянных фотонов на матрице камеры отображается так называемое спекл-поле. В зависимости от структуры образца скорость движения рассеивателей может быть разной, благодаря разной вязкости и упругости образца. Как следствие, различается и скорость изменения интенсивности спекл-поля. Таким образом, скорость изменения спекл-поля дает возможность характеризовать структурные свойства образца. При изменении спекл-поля рассчитывается относительная декорреляция (RDC) и среднеквадратичное смещение (MSD) как функции от времени. Если движение происходит в вязкой ньютоновской жидкости, то зависимость среднеквадратичного смещения частиц от времени релаксации  $MSD(t)$  имеет линейный характер. Если частицы движутся в идеально упругой среде, MSD выйдет на плато (рис. 3).

Судя по углу наклона кривых среднеквадратичного смещения видно, что буровой раствор на основе растительных масел обладает более высокими упругими свойствами по сравнению с РУО. Высота плато на кривой  $MSD(t_{dec})$  характеризует упругие свойства образца. Пониженные высоты этого плато соответствуют уменьшению характерного размера «клетки», внутри

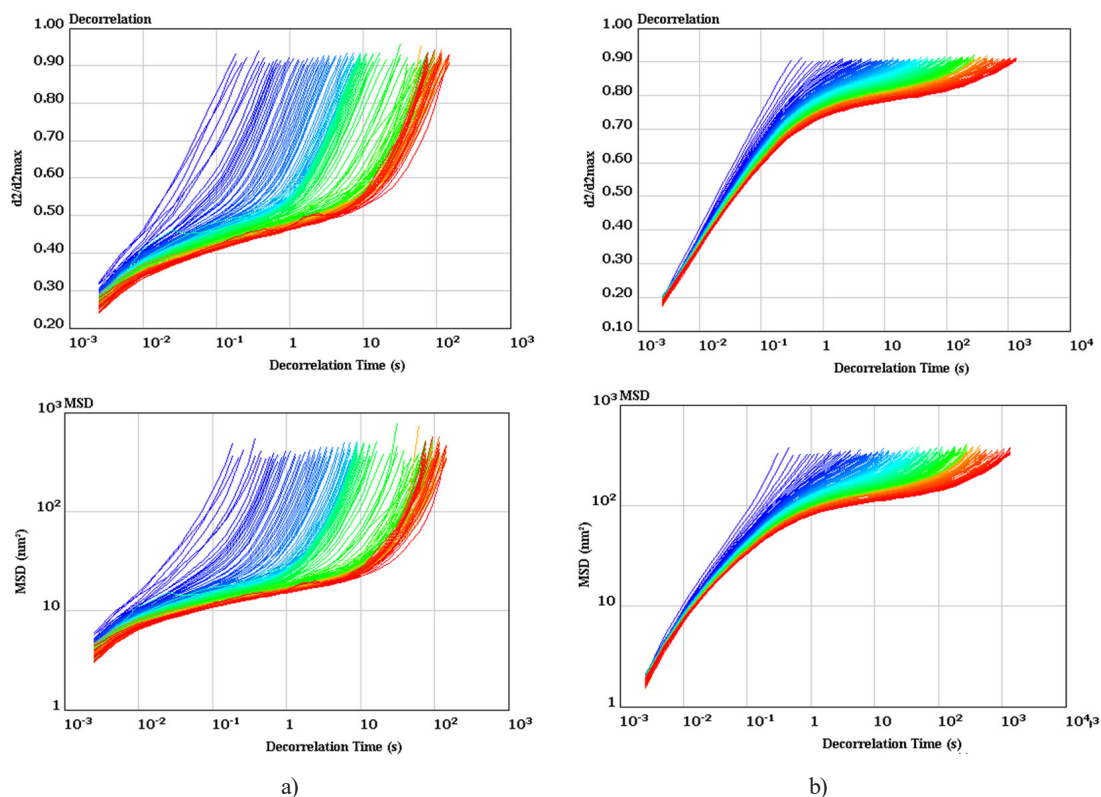


Рис. 3. Относительная декорреляция и среднее квадратичное смещение частиц для раствора на основе дизельного топлива (а) и рапсового масла (б) при стандартных условиях

Fig. 3. Decorrelation and mean square displacement of particles for a drilling fluid based on diesel fuel (a) and on rapeseed oil (b) under standard conditions

которой ограничено движение частиц. Уменьшение размера «клетки» отвечает повышению упругости, так как частицы сильнее ограничены в своем движении.

Также были исследованы микрореологические характеристики растворов после испытаний на термостарение. В результате было показано, что с повышением температуры значительно увеличивается время, за которое частицы раствора образуют гелевую структуру (рис. 3б). При высоких температурах химически активные частицы раствора менее интенсивно флокулируют и образывают гель, что вызывает уменьшение вязкости раствора и его более медленное загустение. При этом растворы на углеводородной основе сильнее подвержены термодеструкции и более существенному изменению вязкоупругих свойств, что соответствует данным, полученным на ротационном вискозиметре.

Реолазер позволяет рассчитывать количественные параметры, характеризующие упругие свойства образца. В качестве примера на рис. 4а представлен индекс упругости EI, который позволяет охарактеризовать изменения упругих свойств образца со временем. Индекс упругости EI рассчитывается как величина, обратная высоте плато на кривой  $MSD(t_{dec})$ . Для жидкостей на основе технического масла рапса и рыжика индекс упругости раствора увеличивается на порядок относительно РУО практически сразу после перемешивания. Это говорит о мгновенном наборе структуры этих растворов и соответствует данным по стати-



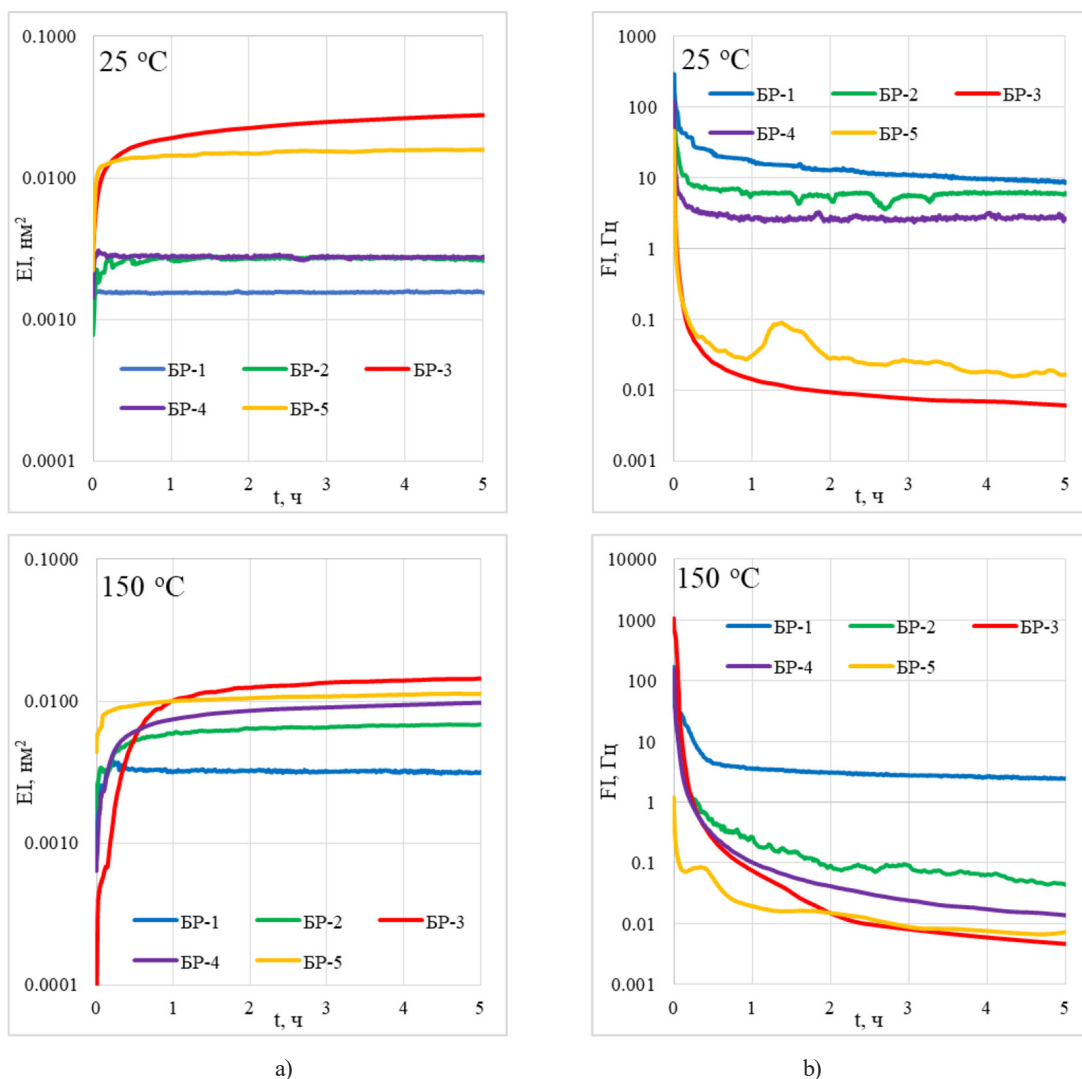


Рис. 4. Индекс упругости EI (a) и индекс текучести FI (b) для бурового раствора при нормальных условиях и после испытаний на термостарение при 150 оС в течение 16 часов

Fig. 4. Elasticity index EI (a) and fluidity index FI (b) for drilling fluid under normal conditions and after thermal aging tests at 150 °C for 16 hours

ческому напряжению сдвига, полученным на ротационном вискозиметре. После испытаний на термостарение упругость всех образцов становится сопоставима. При этом показано, что значения упругости для образцов на основе растительных масел после термостарения изменились значительно меньше, чем для углеводородных растворов, что еще раз подтверждает их лучшую термостабильность.

Следующий параметр – это индекс текучести FI (рис. 4b), который вычисляется как величина, обратная характеристическому времени декорреляции  $\tau$ , и измеряется в Гц. При низком FI ( $\approx 10^{-2}$  Гц) в образце больше проявляются упругие/твердые свойства, при высоком FI ( $\approx 10$  Гц) образец в основном вязкий/жидкий. Со временем текучесть образцов резко уменьшается. Так, буровой раствор на основе масел рыжика и рапса начинает проявлять полностью упругие

свойства через примерно 15 минут, раствор на основе масла льна теряет текучесть через 50 минут, а растворы на углеводородной основе – через 150 минут. Это коррелирует с данными по динамическому напряжению сдвига, полученными при определении реологических параметров буровых растворов. После термостарения время набора структуры увеличивается для всех образцов, однако для образцов на углеводородной основе этот процесс более выражен в сравнении с комнатной температурой.

### Заключение

Проведены комплексные исследования по разработке рецептур буровых растворов на основе натуральных масел растений, произрастающих в северных широтах (рапс, лен, рыжик). Подобное систематическое исследование применения данных масел для приготовления буровых растворов проводится впервые. В работе исследованы пять инвертных буровых растворов, три из которых на растительной основе: рапсовое масло, масло льна, масло рыжика, и для сравнения два на традиционной углеводородной основе: синтетическое масло и дизельное топливо. Проанализированы следующие важнейшие параметры буровых растворов: вязкость, реология, термостабильность и упругие свойства.

В результате были получены следующие выводы.

1. Разработана рецептура и методика приготовления коллоидно-устойчивых буровых растворов на основе растительных масел.

2. При прочих равных условиях эффективная вязкость растворов на растительной основе выше, чем у УВ растворов, это связано с вязкостью дисперсной фазы и является очень хорошим обстоятельством, поскольку позволяет повысить долю водной фазы в эмульсии, тем самым уменьшив стоимость бурового раствора.

3. Буровые растворы на основе растительных масел обладают лучшими вязкоупругими свойствами в сравнении с растворами на углеводородной основе, что потенциально может способствовать лучшей очистке скважины.

Таким образом, в результате проведенного исследования были разработаны буровые растворы на основе технических растительных масел с показателями, не уступающими по своим характеристикам буровым растворам на УВ основе, что открывает широкую перспективу их использования при бурении для снижения экологической нагрузки и более эффективной очистки и утилизации отходов бурения.

### Список литературы / References

[1] Koh J.K., Lai C.W., Johan M.R., Gan S.S., Chua W.W. Recent advances of modified polyacrylamide in drilling technology. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2022. Vol. 215, P. 110566.

[2] Celino K.N., Fernandes R.S., Morais S.C., Souza E.A., Balaban R.C. Emulsion-based drilling fluids: Rheological properties preservation facing changes on the temperature, pressure and dispersed phase. *Journal of Molecular Liquids* 2022. Vol. 352, P. 118753.

[3] Huang D.C., Peng N.Y., Zou G.J., Xu Y., Deng M.Y., Du W.C., Xiao Y.R., Huang J.J., Luo P.Y. Synergistic inhibition of polyethylene glycol and potassium chloride in water-based drilling fluids. *Petroleum Science* 2021. Vol. 18, P. 827–838.

[4] Murtaza M., Alarifi S. A., Kamal M. S., Onaizi S. A., Al-Ajmi M., Mahmoud M. Experimental investigation of the rheological behavior of an oil-based drilling fluid with rheology modifier and oil wetter additives. *Molecules* 2021. Vol. 26(16), P. 487.

[5] Ofei T.N., Lund B., Saasen A., Sangesland S. The effect of oil–water ratio on rheological properties and sag stability of oil-based drilling fluids. *Journal of Energy Resources Technology* 2022. Vol. 144(7), P. 073008

[6] Njuguna J., Siddique S., Kwroffie L. B., Pirokrat S., Addae-Afoakwa K., Ekeh-Adegbotolu U., Oluyemi G., Yates K., Mishra A. K., Moller L. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. *Waste Management* 2022. Vol. 139, P. 362–380.

[7] Agwu O.E., Isemin I. A., Akpabio M. G. Cost benefit analysis of vegetable oils used as alternatives to diesel in the formulation of oil-based drilling muds. In Proceedings of the SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria, August 2015. SPE-178265-MS.

[8] Fadairo A., Falode O., Ako C., Adeyemi A., Ameloko A. Novel formulation of environmentally friendly oil based drilling mud. In *New Technologies in the Oil and Gas Industry*, Gomes, G.S., Ed., InTech open, Croatia, 2012. P. 49–80.

[9] Fadairo A., Adeyemi G., Ogunkunle T., Ling K., Rasouli V., Effiong E., Ayoo J. Study the suitability of neem seed oil for formulation of eco-friendly oil based drilling fluid. *Petroleum Research* 2021. Vol. 6(3), P. 283–190.

[10] 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. Vol. 2(3), P. 27–32.

[11] Li W., Zhao X., Ji Y., Peng H., Chen B., Liu L., Han, X. Investigation of biodiesel-based drilling fluid, part 1: biodiesel evaluation, invert-emulsion properties, and development of a novel emulsifier package. *SPE Journal* 2014. Vol. 21(05), P. 1755–1766.

[12] Li W., Zhao X., Ji Y., Peng H., Chen B., Liu L., Han X. Investigation of biodiesel-based drilling fluid, part 2: formulation design, rheological study, and laboratory evaluation. *SPE Journal* 2014. Vol. 21(05), P. 1767–1781.

[13] Iddrisu M., Al-Sakkaf M.K., Bahadi S.A., Zahid U., Drmosh Q.A., Ahmed U., Onaizi S. A. Waste to a commodity: the utilization of waste cooking oil for the formulation of oil-based drilling mud with H<sub>2</sub>S scavenging capability bestowed by the incorporation of ZIF-67. *Emergent Materials* 2023. Vol. 6(5).

[14] Lysakova E.I., Skorobogatova A.D., Matveev A. V., Minakov A. V. Research and development of emulsion drilling muds based on technical oils. *Ecology and Industry of Russia* 2023. Vol. 27, P. 46–53.

[15] 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. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 2022. Vol. 15, P. 529–538.