

УДК 532.133

Е. А. Марфин

Институт энергетики и перспективных технологий, ФИЦ Казанский научный центр РАН
Институт физики Казанского федерального университета

Эффекты ультразвукового воздействия на высоковязкую нефть

В работе исследовано влияние ультразвукового воздействия с частотой 21 кГц на физико-химические свойства высоковязких нефтей. Эксперименты показали, что такая обработка снижает вязкость нефти на 13%. Добавление высокомолекулярных углеводородов в нефть повышает её вязкость, но при этом снижает эффективность ультразвуковой обработки. Основным механизмом снижения вязкости является акустическая кавитация, которая разрушает крупные молекулы углеводородов. Кроме того, изменяется групповой состав нефти: наблюдается снижение доли смол и увеличение содержания насыщенных углеводородов. Также были выявлены закономерности ультразвукового нагрева жидкостей. Ультразвуковое воздействие сопровождается генерацией колебаний в звуковом диапазоне частот, и такие механические вибрации могут дополнительно способствовать снижению вязкости, что требует дальнейших исследований. Полученные результаты открывают новые перспективы для совершенствования процессов добычи, переработки и транспортировки нефти.

Ключевые слова: ультразвук, тяжелая нефть, вязкость, химический состав, нагрев

Е. А. Marfin

Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences
Institute of Physics, Kazan Federal University

Effects of ultrasonic irradiation on high-viscosity oil

The present study investigates the influence of ultrasonic waves with a frequency of 21 kHz on the physicochemical properties of highly viscous oils. The experimental results demonstrate that such treatment results in a 13% reduction in oil viscosity. Furthermore, the addition of high-molecular hydrocarbons to oil increases its viscosity, whilst simultaneously reducing the effectiveness of ultrasonic treatment. The primary mechanism responsible for viscosity reduction appears to be acoustic cavitation, a process which involves the destruction of large hydrocarbon molecules. Furthermore, the group composition of the oil undergoes a transformation, characterized by a decline in the proportion of resins and an augmentation in the content of saturated hydrocarbons. The study has also unveiled the regularities of ultrasonic heating of liquids. The ultrasonic influence is accompanied by the generation of vibrations within the sound frequency range, and such mechanical vibrations may concomitantly contribute to viscosity reduction, a phenomenon that necessitates further research. The obtained results unveil novel prospects for the enhancement of oil production, refining, and transportation processes.

Key words: ultrasound, heavy oil, viscosity, chemical composition, heating

1. Введение

Нефть имеет ключевое значение в мировой экономике, особенно в регионах с высоким спросом на топливо, промышленность, энергетику и транспорт. С учетом истощения «легкой» нефти, нетрадиционные запасы нефти, включающие тяжелую высоковязкую нефть, могут стать важной альтернативой в будущем [1]. Тяжелая нефть является важным ресурсом для мировой энергетической и химической промышленности. Однако ее высокая вязкость и сложный состав создают серьезные проблемы при добыче, переработке и транспортировке [2, 3]. Вязкость тяжелой нефти, обусловленная в значительной степени наличием асфальтенов и других высокомолекулярных соединений [4–6], требует эффективных методов ее снижения [7–9]. Традиционные подходы, такие как нагревание и добавление растворителей, часто недостаточно эффективны и могут привести к дополнительным расходам и экологическим рискам. Вместе с тем большинство мировых месторождений углеводородов находятся на поздних стадиях разработки, при этом эффективность извлечения нефти составляет менее 40% [10–11]. Извлечение высоковязкой нефти требует специальных условий, влияющих на этот процесс.

В последние годы ультразвуковые технологии привлекают значительное внимание исследователей как перспективный метод изменения физических и химических свойств тяжелой нефти [12–14]. Ультразвук способен вызывать кавитацию – процесс, при котором в жидкости образуются и быстро разрушаются пузырьки, что может привести к существенным изменениям в структуре и вязкости нефти [15–17]. Исследования показывают, что ультразвуковое воздействие может способствовать разрушению асфальтеновых агрегатов и повышению текучести нефти, что открывает новые возможности для эффективной переработки [18–20]. В нефтяной промышленности ультразвук также применяется для эмульгирования, деэмульсации и изменения состава нефти, что оказывает существенное влияние на процессы добычи, транспортировки и переработки [21, 22].

Несмотря на обнадеживающие результаты, полученные до сих пор, механизмы, лежащие в основе наблюдаемых изменений вязкости при воздействии ультразвука, еще предстоит полностью выяснить [23, 24]. Важной задачей является установление влияния различных параметров ультразвуковой обработки, таких как частота, интенсивность и продолжительность обработки, на конечные результаты. Кроме того, необходимо исследовать долгосрочные эффекты ультразвуковой обработки и их влияние на стабильность модифицированных свойств тяжелой нефти. Целью настоящего исследования является изучение влияния ультразвуковой обработки на высоковязкую нефть. Результаты этого исследования могут способствовать разработке новых технологий для эффективной переработки тяжелой нефти и улучшения ее транспортабельности, что важно для энергетической безопасности и устойчивого развития.

2. Материал

Объектами исследования в работе были образцы высоковязкой нефти. В качестве основного образца использовалась обезвоженная и дегазированная нефть Ново-Елховского месторождения Республики Татарстан, обозначенная как Н. Для получения более высоковязких образцов к исходной нефти добавляли мазут, который представляет собой остаточный продукт нефтепереработки, содержащий высоковязкие компоненты, такие как высокомолекулярные парафины, смолы и ароматические соединения. Эти вещества характеризуются высокой молекулярной массой и способствуют увеличению вязкости нефтяных смесей. Добавление мазута было специально использовано для моделирования более вязкой нефтяной смеси с целью изучения влияния ультразвукового воздействия на изменение ее вязкости. Это позволяет лучше понять, как ультразвуковая обработка воздействует на нефть с разной вязкостью и составом. Подобный подход оправдан еще и тем, что часто нефти с различных месторождений смешиваются для транспортировки по трубопроводам. В данной работе образцы высоковязкой нефти были получены путем смешивания нефти Н

с мазутом марки М-100 в пропорции 80/20 по массе, обозначенные как НМ. В таблице 1 представлены некоторые физические свойства исследованных образцов нефти и мазута.

Т а б л и ц а 1

Образец	Массовая доля мазута, %	Массовая доля нефти, %	Плотность при 20 °С, кг/м ³	Вязкость при 20 °С, мПа·с
Н	0	100	855,5	131,5
М-100	100	0	967,6	6691,2*
НМ	20	80	891,6	223,1

* при температуре 40 °С

3. Методы

Общая схема экспериментальных исследований представлена на рисунке 1. Были подготовлены четыре образца нефти Н массой 50 грамм. Для получения образцов НМ были отдельно приготовлены образцы нефти Н и мазута необходимого количества. Эти жидкости помещали в разные емкости и нагревали на водяной бане до температуры 90 °С. Затем нагретые нефть и мазут смешивали в одной емкости в пропорции 80/20 и непрерывно перемешивали в течение 10 минут для получения однородной смеси. Для проведения экспериментальных исследований было приготовлено четыре образца нефти НМ массой 50 грамм каждый.

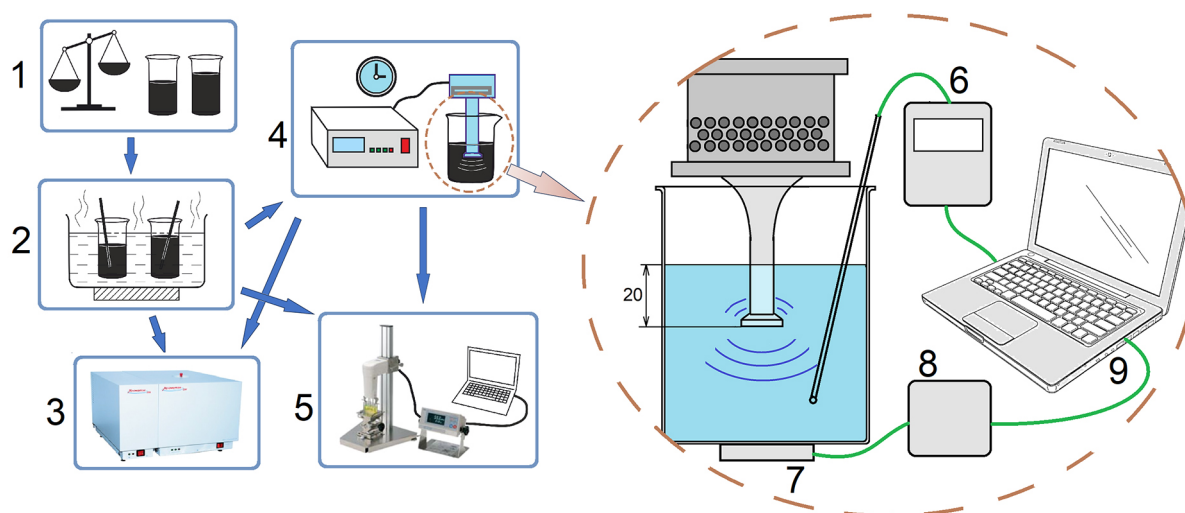


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований: 1 – подготовка образцов нефти, 2 – нагрев и смешивание образцов нефти, 3 – SARA-анализ, 4 – ультразвуковая обработка образцов нефти, 5 – измерение вязкости, 6 – электронный термометр, 7 – контактный микрофон, 8 – микрофонный усилитель, 9 – компьютер

Ультразвуковое воздействие полученных образцов нефти осуществлялось с помощью ультразвукового аппарата Волна УЗТА-0,4/22-ОМ (ООО «Центр ультразвуковых технологий», Россия), состоящего из ультразвукового генератора и преобразователя. Максимальная интенсивность воздействия составляла 11,7 Вт/см². Ультразвуковой преобразователь – излучатель колебаний погружался в жидкость на глубину 20 мм. При включении устройства торцевая поверхность преобразователя вибрировала, создавая колебания с частотой около 22 кГц, которые распространяясь в жидкости, обеспечивали ультразвуковую обработку. Длительность ультразвукового воздействия образцов нефти в экспериментах составляла 1, 2 и 3 минуты. С помощью вибрационного вискозиметра SV-10 (A&D, Япония) определялась вязкость образцов нефти при различных температурах. Аппаратная погрешность измерения вязкости – 3%, повторяемость – 1%.

Температура измерялась лабораторным электронным термометром LT-300 (ООО «ТЕРМЭКС», Россия) с точностью до $\pm 0,05$ °С. Масса образцов нефти измерялась лабораторными весами Масса-К ВК-300 (АО «Масса-К», Россия), с точностью 0,01 грамма. Групповой состав образцов нефти (SARA-анализ) определялся методом импульсной низкочастотной ЯМР-релаксации на ЯМР-анализаторе «Хроматэк Протон 20М» (ЗАО СКБ Хроматэк, Россия).

Температурную зависимость вязкости можно описать уравнением Френкеля [25]:

$$\mu = A \cdot \exp\left(\frac{W}{RT}\right), \quad (1)$$

где A – предэкспоненциальный коэффициент, Па·с; W – энергия активации вязкого течения, Дж/моль; $R=8,31446262$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К. По наклону зависимости логарифма вязкости от обратной температуры определяются параметры A и W .

4. Результаты и обсуждение

Вязкость мазута значительно выше, чем у нефти, что объясняется повышенной концентрацией в нем асфальтенов, смол и парафинов. На рисунке 2 показаны температурные зависимости вязкости образцов Н и НМ. Видно, что добавление 20% мазута к нефти Н приводит к заметному увеличению вязкости в 1,7–2,4 раза в диапазоне температур от 50 до 20 °С. Смешивая нефть и мазут в различных пропорциях, можно создавать образцы высоковязкой нефти для будущих исследований с широким спектром реологических свойств.

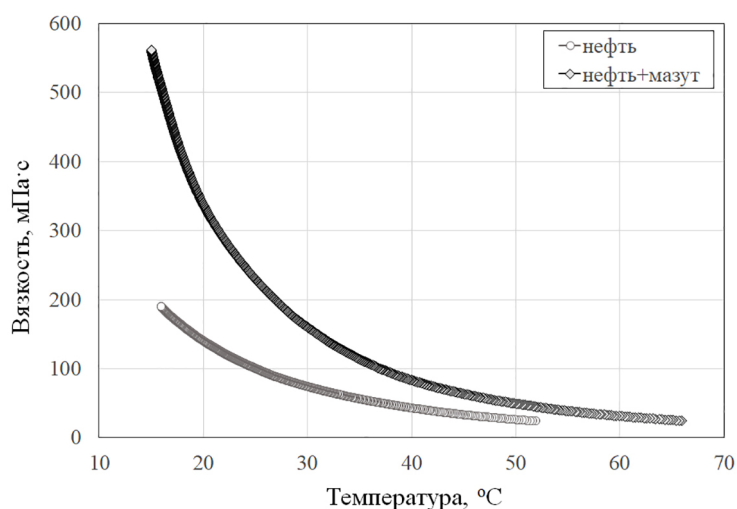


Рис. 2. Температурные зависимости вязкости образцов нефти

С помощью уравнения (1) были проанализированы полученные зависимости (рис. 2) и определены значения энергии активации вязкого течения. Для образца Н в диапазоне температур от 20 до 50 °С ее значение составило $W_H = 42,847$ кДж/моль, а для образца НМ – $W_{HM} = 50,282$ кДж/моль. Эти данные свидетельствуют о том, что чем менее подвижная нефть, тем больше у нее значение энергии активации вязкого течения. Поскольку ультразвуковая обработка, как показано ниже, приводит к нагреву жидкости, для корректного сравнения вязкости исходной и обработанной нефти достаточно просто нагреть исходную нефть, например, на водяной бане до температуры, которой она достигает при ультразвуковом воздействии. Повторный нагрев образца нефти после приготовления приводит к тому, что ее вязкость становится выше первоначальной. Это подтверждают результаты других авторов, отраженные в работе [26]. Значения энергии активации вязкого течения при этом также повысились до $W_H = 46,693$ кДж/моль и $W_{HM} = 52,447$ кДж/моль для образцов Н и НМ соответственно.

Эксперименты с воздействием ультразвука на жидкости, проведенные в том числе и ранее [27–28], выявили одну интересную особенность. А именно то, что при включении ультразвука в жидкости возникали источники слышимого звука. Для исследования этого явления были проведены акустические измерения с помощью контактного микрофона 7, показанного на схеме (рис. 1). Данные исследования проводились с водой и нефтью. В начальный момент микрофоном отчетливо регистрировался сильный тон ультразвука с высокой добротностью на частоте 21 кГц. И практически сразу, через секунду–две, микрофон стал регистрировать шум в акустическом диапазоне. На рисунке 2 представлены спектры таких регистрируемых колебаний. С течением времени спектр этих шумов немного менялся.

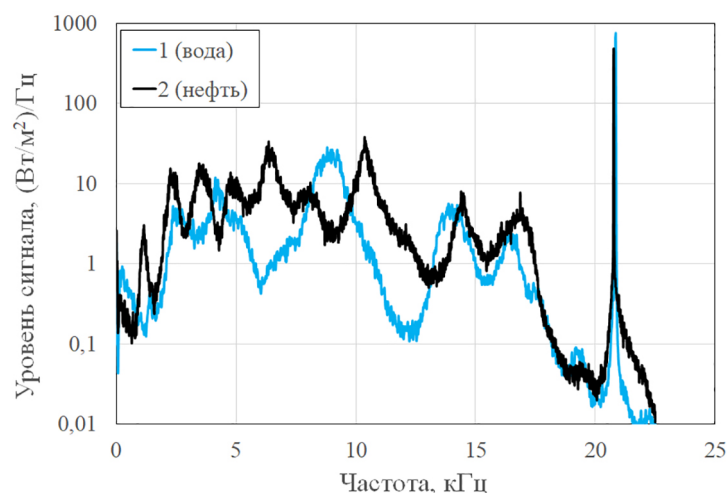


Рис. 3. Спектр звуковых колебаний при ультразвуковом воздействии

Энергетические оценки распределения интенсивности колебаний по частотным диапазонам, представленные на рис. 3, показывают, что большая часть звуковой энергии сосредоточена в диапазоне частот до 10 кГц. Причем с увеличением длительности воздействия интенсивность в диапазоне частот от 2,5 до 5 кГц возрастает. Полученные данные дают основание для следующего объяснения. Ультразвуковые колебания высокой амплитуды приводят к образованию кавитации. Некоторые образующиеся пузырьки растворенного газа или насыщенных паров не успевают схлопываться и выступают в качестве резонаторов или сферических излучателей со своими характерными частотами, которые генерируют звуковые колебания. По мере изменения свойств жидкости при воздействии параметры этих пузырьков меняются, чем и объясняется изменение спектра шума. Для подтверждения этой гипотезы необходима постановка и проведение соответствующих теоретических и экспериментальных исследований. Появление колебаний звукового диапазона под воздействием ультразвука открывает новое направление для исследований, поскольку результаты промышленных испытаний волнового воздействия в этом частотном диапазоне, представленные, например, в работе [29], показывают возможность увеличения добычи нефти.

Кавитация и поглощение ультразвуковых и звуковых колебаний в жидкости приводят к ее нагреву. Измерения температуры жидкости в процессе воздействия показывают, что характер нагрева для разных жидкостей отличается. Для сравнения на рисунке 5 показаны графики нагрева дистиллированной воды и образца нефти Н. Вода практически сразу начинает нагреваться, в то время как у нефти заметный нагрев начинается только через 20–25 секунд. Это объясняется тем, что вязкость нефти значительно выше вязкости воды и соответственно перемешивание жидкости, вызванное акустическим течением под действием ультразвука, в разных жидкостях неодинаковое. При нагреве нефти ее вязкость снижается и соответственно перемешивание жидкости происходит более интенсивно. При этом характер нагрева от длительности воздействия становится, как у воды, моно-

тонный. Следует отметить, что значения температуры, до которой за одинаковое время нагреваются вода и нефть, отличаются. Очевидно, что это определяется главным образом теплоемкостью жидкостей. На основании полученных данных и учитывая, что теплоемкость дистиллированной воды равна $C_{\text{вода}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, можно примерно оценить теплоемкость нефти, значение которой составило около $2490 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

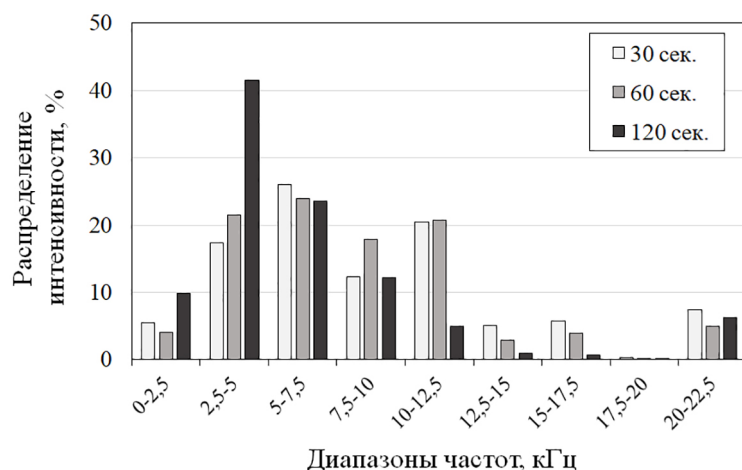


Рис. 4. Распределение интенсивности колебаний по частоте при ультразвуковом воздействии нефти

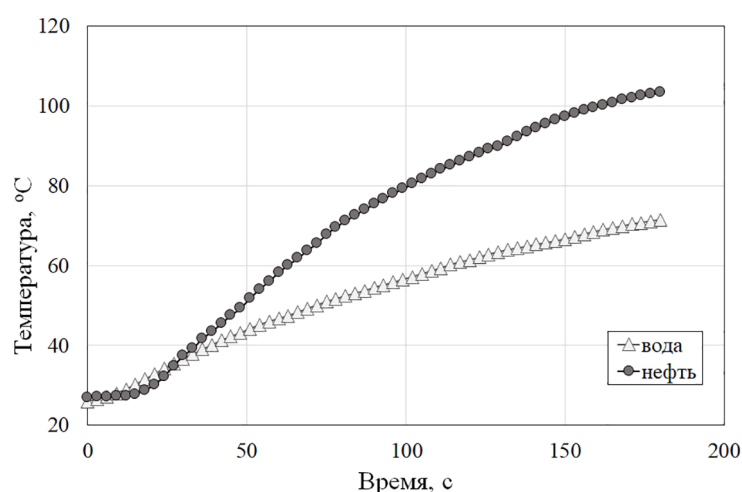


Рис. 5. Повышение температуры жидкости при ультразвуковом воздействии

Распространяющиеся ультразвуковые колебания приводят к явлению кавитации, при котором локальное снижение давления ниже критического в жидкости приводит к образованию полостей, заполненных паром или растворенными газами. Далее по мере повышения давления (при прохождении упругой волны) некоторые пузырьки схлопываются, в результате чего образуются сходящиеся микроскопические ударные волны. Факт проявления кавитации был подтвержден не только характерным шумом, но и образованием в жидкости пузырьков растворенного газа и паров. В прозрачной воде эти пузырьки были видны невооруженным глазом как внутри, так и на поверхности, а в непрозрачной нефти также наблюдалось, как пузырьки поднимались и всплывали на поверхность. По некоторым оценкам, давление и температура в центре пузырька в момент схлопывания достигают чрезвычайно высоких значений [30]. Этой энергии может быть достаточно для изменения структуры жидкости, что проявляется в изменении температурных зависимостей вязкости. На рисунке 6 показаны изменения вязкости, наблюдаемые в образце Н, после ультразвуковой обработки различной длительностью.

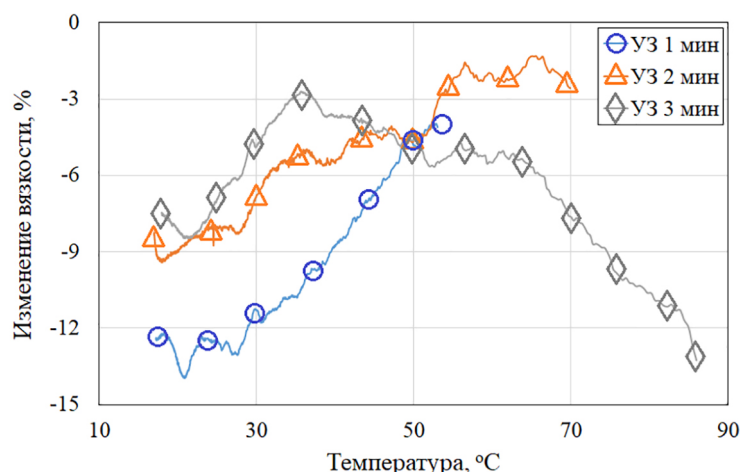


Рис. 6. Зависимости изменения вязкости образца нефти Н от температуры после ультразвукового воздействия

На этом и следующем рисунках представлено относительное изменение вязкости нефти, обработанной ультразвуком, по сравнению с вязкостью необработанной, но предварительно нагретой, нефти при одинаковой температуре. Для этого образца нефти Н вязкость снизилась после всех режимов обработки. Максимальное снижение составило 13% после 3-минутной обработки. После прекращения ультразвуковой обработки в течение 1 и 2 минут наблюдается монотонное снижение вязкости, в то время как после 3-минутной обработки изменение вязкости изменяется с -13% до -3% , а затем увеличивается до -7% . Значения энергии активации вязкого течения, рассчитанные по полученным кривым, составили 42,838, 44,02 и 44,24 кДж/моль для 1, 2 и 3 минут ультразвукового воздействия соответственно.

Характер изменения вязкости для высоковязкой нефти, содержащей мазут, отличается от образца Н. Хотя и максимальное снижение вязкости до 10% также было после 3-х минутной обработки, после прекращения воздействия вязкость восстанавливается и увеличивается на 12% (см. рис. 7). После 2-минутной обработки вязкость практически не меняется – изменения в пределах погрешности измерения вязкости. После 1-минутной обработки вязкость сперва увеличивается, а затем снижается до 5%. Значения энергии активации вязкого течения образцов нефти НМ, рассчитанные по полученным кривым, составили 49,897, 52,098 и 50,092 кДж/моль для 1, 2 и 3 минут ультразвукового воздействия соответственно.

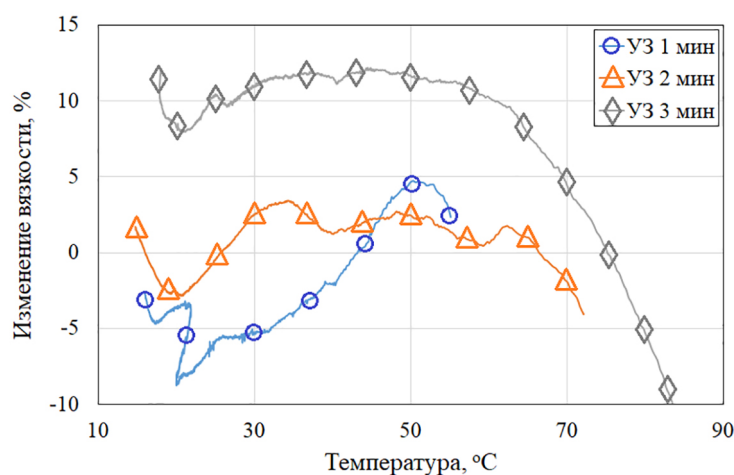


Рис. 7. Зависимости изменения вязкости образца нефти НМ от температуры после ультразвукового воздействия

Помимо изменения вязкости образцов нефти после ультразвуковой обработки произошли также изменения состава нефти. На рисунке 8 представлены результаты SARA анализа группового состава образцов нефти до и после 3-минутной обработки. В частности, видно, что у образца Н ультразвуковое воздействие приводит к снижению доли смол и увеличению содержания ароматических соединений. У образца НМ, несмотря на то, что снижение вязкости не такое заметное, как у образца Н, изменения группового состава более значительны. За счет снижения содержания смол и ароматических соединений возрастает содержание насыщенных углеводородов.

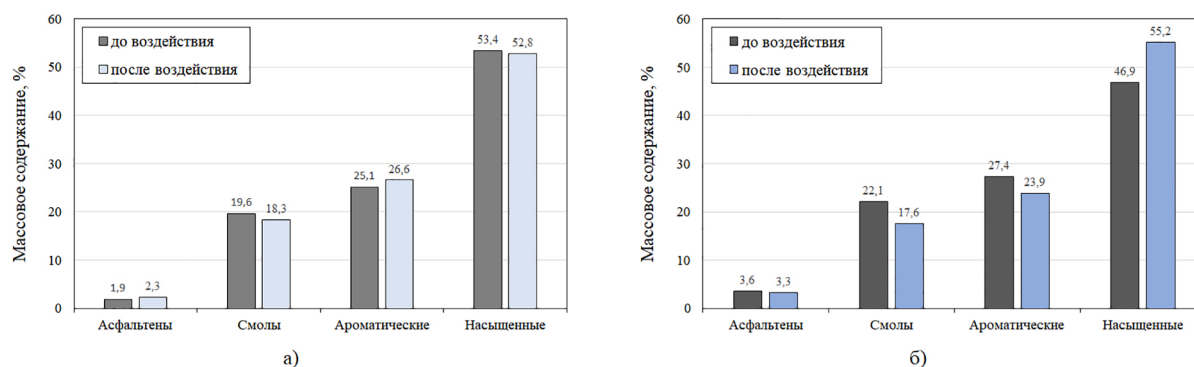


Рис. 8. Изменение группового состава образцов нефти Н (а) и НМ (б) после 3-минутного ультразвукового воздействия

5. Заключение

Ультразвуковое воздействие представляет собой эффективную и экологически безопасную технологию, позволяющую повысить нефтеотдачу, снизить эксплуатационные расходы и энергопотребление. Научная новизна проведенной экспериментальной работы заключается в том, что впервые подробно изучен эффект ультразвука на вязкость и состав высоковязкой нефти. Результаты исследования показывают, что ультразвуковая обработка снижает вязкость нефти до 13% и изменяет её химический состав, что открывает новые возможности для улучшения процессов её переработки и транспортировки. Основным механизмом ультразвукового воздействия является кавитация, которая разрушает большие молекулы углеводородов, что способствует снижению вязкости и изменению состава нефти. Вместе с тем кавитация приводит к генерации звуковых колебаний, и такие механические вибрации могут дополнительно способствовать снижению вязкости нефти, что требует дальнейших исследований. Также было установлено, что добавление в нефть высоковязких компонентов снижает эффективность ультразвуковой обработки. Кроме того, ультразвуковая обработка привела к изменениям в химическом составе нефти: для одного образца уменьшилась доля смол и увеличилось содержание ароматических углеводородов, в то время как для другого наблюдалось увеличение содержания насыщенных углеводородов. Таким образом, полученные результаты демонстрируют высокий потенциал ультразвуковых технологий для повышения эффективности добычи, переработки и транспортировки нефти, а также открывают новые перспективы для дальнейших исследований в этой области.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение №71/2024-ПД).

Список литературы

1. Guo K., Li H., Yu Z. In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: a review // *Fuel*. 2016. V. 185. P. 886–902. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.047>.
2. Souas F., Safri A., Benmounah A. A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation // *Petroleum Research*. 2021. V. 6. P. 116–136. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001>.
3. Ramirez-Gonzalez P.V., Quinones-Cisneros S.E.E. Rheological behavior of heavy and extra-heavy crude oils at high pressure // *Energy&Fuels*. 2021. V. 34, N 2. P. 116–136. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001>.
4. Luo P., Gu Y. Effects of asphaltene content on the heavy oil viscosity at different temperatures // *Fuel*. 2007. V. 86, N 7–8. P. 1069–1078. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.017>.
5. Li X., Chi P., Guo X., Sun Q. Effects of asphaltene concentration and asphaltene agglomeration on viscosity // *Fuel*. 2019. V. 255. P. 115825. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115825>.
6. Xiong R., Piette J.H., Zhang Z., Guo J., Hatzikiriakos S.G. Effect of asphaltene on the rheological properties of bitumen // *Physics of Fluids*. 2022. V. 34, N 8. P. 083111. <https://doi.org/10.1063/5.0108538>.
7. Hasan S.W., Ghannam M.T., Esmail N. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation // *Fuel*. 2010. V. 89, N 5. P. 1095–1110. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.021>.
8. Taborda E. A., Alvarado V., Franco C. A., Cortes F. B. Rheological demonstration of alteration in the heavy crude oil fluid structure upon addition of nanoparticles // *Fuel*. 2017. V. 189. P. 322–333. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.110>.
9. Zhang S., Sun X., Yan S., Liu C., Miao X., Zhao K. Effect of laser irradiation on a heavy crude oil sample: Changes in viscosity and implications for oil recovery and transport // *Physics of Fluids*. 2022. V. 34, N 12. P. 127122. <https://doi.org/10.1063/5.0130925>.
10. Yakasai F., Jaafar M.Z., Bandyopadhyay S., Agi A., Sidek M. A. Application of iron oxide nanoparticles in oil recovery – A critical review of the properties, formulation, recent advances and prospects // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. V. 208. P. 109438. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109438>.
11. Hafez M., Ratanpara A.P., Martiniere Y., Dagois M., Ghazvini M., Kavosi M., Mandin P., Kim M. CO₂-monoethanolamine-induced oil swelling and viscosity reduction for enhanced oil recovery // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. V. 206. P. 109022. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109022>.
12. Adeyemi I., Meribout M., Khezzar L. Recent developments, challenges, and prospects of ultrasound-assisted oil technologies // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. V. 82. P. 105902. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105902>.
13. Qiao J., Zuo K., Sun Y., Song W., Zhang X., Dai L., Wang W., Jian C. Experimental studies on the effect of ultrasonic treatment and hydrogen donors on residual oil characteristics // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. V. 69. P. 105266. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105266>.
14. Gao J., Li C., Xu D., Wu P., Lin W., Wang X. The mechanism of ultrasonic irradiation effect on viscosity variations of heavy crude oil // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. V. 81. P. 105842. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105842>.
15. Suslick K.S. Sonochemistry // *Science*. 1990. V. 247, N 4949. P. 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>.

16. Волкова Г.И., Зубарев Д.А. Влияние ультразвуковой обработки на свойства высокопарафинистой малосмолистой нефти, осадков и рафинатов // Химия твердого топлива. 2023. № 2–3. С. 65–70. <https://doi.org/10.31857/S0023117723020160>.
17. Lv S., Peng S., Zhang R., Guo Z., Du W., Zhang J., Chen G. Viscosity reduction of heavy oil by ultrasonic // Petroleum Chemistry. 2020. V. 60, N 9. P. 998–1002. <https://doi.org/10.1134/S0965544120090194>.
18. Razavifar M., Qajar J. Experimental investigation of the ultrasonic wave effects on the viscosity and thermal behaviour of an asphaltenic crude oil // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2020. V. 153. P. 107964. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107964>.
19. Abramov V.O., Abramova A.V., Bayazitov V.M., Altunina L.K., Gerasin A.S., Pashin D.M., Mason T.J. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery // Ultrasonics Sonochemistry. 2015. V. 25. P. 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.014>.
20. Volkova G.I., Morozova A.V. Effects of Petroleum Resins and Ultrasonic Treatment on the Properties of Petroleum Paraffin Solutions in n-Decane and on the Structural-Group Composition of Precipitated Resins // Petroleum Chemistry. 2023. V. 63, N 1. P. 111–119. <https://doi.org/10.1134/s096554412302010x>.
21. Mohsin M., Meribout M. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation // Ultrasonics Sonochemistry. 2015. V. 23. P. 413–423. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.007>.
22. Volkova G.I., Zubarev D.A., Kadychagov P.B. Effect of Ultrasonic Treatment on the Properties and Composition of High-Wax Crude Oil and Its Precipitates // Petroleum Chemistry. 2024. V. 64. P. 540–547. <https://doi.org/10.1134/s0965544124020026>.
23. Razavifar M., Qajar J., Riazi M. Experimental study on pore-scale mechanisms of ultrasonic-assisted heavy oil recovery with solvent effects // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. V. 214. P. 110553. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110553>.
24. Baimukhametov G.F., Dengaev A.V., Safiullina E.U., Kayumov A.A., Drozdov I.M., Shishulin V.V., Boushra A., Vakhin A.V., Sargin B.V., Sidibe M.S. Relaxation Process in Crude Oil after Ultrasonic Treatment // International Journal of Engineering. 2024. V. 37, N 5. P. 896–903. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.05b.08>.
25. Frenkel J. The Viscosity of Liquids // Nature. 1930. V. 125. P. 581–582. <https://doi.org/10.1038/125581b0>.
26. Kadyirov A., Karaeva J. Ultrasonic and Heat Treatment of Crude Oils // Energies. 2019. V. 12. P. 3084. <https://doi.org/10.3390/en12163084>.
27. Марфин Е.А., Галимзянова А.Р., Гатауллин Р.Н., Натфуллин Р.А. Влияние ультразвуковой обработки на реологические свойства парафинистой нефти // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2024. Т. 14, № 1. С. 74–83. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-74-83>.
28. Galimzyanova A.R., Gataullin R.N., Stepanova Yu.S., Marfin E.A., Khelkhal M.A., Vakhin A.V. Elucidating the impact of ultrasonic treatment on bituminous oil properties: A comprehensive study of viscosity modification // Geoenergy Science and Engineering. 2024. V. 233. P. 212487. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212487>.
29. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. V. 215. P. 110705. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110705>.
30. Luche J.-L. Synthetic Organic Sonochemistry. Springer US : Boston, MA, 1998. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1910-6>.

References

1. Guo K., Li H., Yu Z. In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: a review. *Fuel*. 2016. V. 185. P. 886–902. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.047>.
2. Souas F., Safri A. Benmounah A. A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation. *Petroleum Research*. 2021. V. 6. P. 116–136. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001>.
3. Ramirez-Gonzalez P.V., Quinones-Cisneros S.E.E. Rheological behavior of heavy and extra-heavy crude oils at high pressure. *Energy&Fuels*. 2021. V. 34, N 2. P. 116–136. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001>.
4. Luo P., Gu Y. Effects of asphaltene content on the heavy oil viscosity at different temperatures. *Fuel*. 2007. V. 86, N 7–8. P. 1069–1078. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.017>.
5. Li X., Chi P., Guo X., Sun Q. Effects of asphaltene concentration and asphaltene agglomeration on viscosity. *Fuel*. 2019. V. 255. P. 115825. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115825>.
6. Xiong R., Piette J.H., Zhang Z., Guo J., Hatzikiriakos S.G. Effect of asphaltene on the rheological properties of bitumen. *Physics of Fluids*. 2022. V. 34, N 8. P. 083111. <https://doi.org/10.1063/5.0108538>.
7. Hasan S.W., Ghannam M.T., Esmail N. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel*. 2010. V. 89, N 5. P. 1095–1110. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.021>.
8. Taborda E. A., Alvarado V., Franco C. A., Cortes F. B. Rheological demonstration of alteration in the heavy crude oil fluid structure upon addition of nanoparticles. *Fuel*. 2017. V. 189. P. 322–333. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.110>.
9. Zhang S., Sun X., Yan S., Liu C., Miao X., Zhao K. Effect of laser irradiation on a heavy crude oil sample: Changes in viscosity and implications for oil recovery and transport. *Physics of Fluids*. 2022. V. 34, N 12. P. 127122. <https://doi.org/10.1063/5.0130925>.
10. Yakasai F., Jaafar M.Z., Bandyopadhyay S., Agi A., Sidek M. A. Application of iron oxide nanoparticles in oil recovery – A critical review of the properties, formulation, recent advances and prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. V. 208. P. 109438. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109438>.
11. Hafez M., Ratanpara A.P., Martiniere Y., Dagois M., Ghazvini M., Kavosi M., Mandin P., Kim M. CO₂-monoethanolamine-induced oil swelling and viscosity reduction for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. V. 206. P. 109022. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109022>.
12. Adeyemi I., Meribout M., Khezzar L. Recent developments, challenges, and prospects of ultrasound-assisted oil technologies. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. V. 82. P. 105902. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105902>.
13. Qiao J., Zuo K., Sun Y., Song W., Zhang X., Dai L., Wang W., Jian C. Experimental studies on the effect of ultrasonic treatment and hydrogen donors on residual oil characteristics. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. V. 69. P. 105266. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105266>.
14. Gao J., Li C., Xu D., Wu P., Lin W., Wang X. The mechanism of ultrasonic irradiation effect on viscosity variations of heavy crude oil. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. V. 81. P. 105842. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105842>.
15. Suslick K.S. Sonochemistry. *Science*. 1990. V. 247, N 4949. P. 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>.

16. Volkova G.I., Zubarev D.A. Effect of Ultrasonic Treatment on the Properties of High-Paraffin Low-Resin Oil, Sediments, and Raffinates. *Solid Fuel Chemistry*. 2023. N 2–3. P. 65–70. <https://doi.org/10.31857/S0023117723020160>. (in Russian).
17. Lv S., Peng S., Zhang R., Guo Z., Du W., Zhang J., Chen G. Viscosity reduction of heavy oil by ultrasonic. *Petroleum Chemistry*. 2020. V. 60, N 9. P. 998–1002. <https://doi.org/10.1134/S0965544120090194>.
18. Razavifar M., Qajar J. Experimental investigation of the ultrasonic wave effects on the viscosity and thermal behaviour of an asphaltenic crude oil. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2020. V. 153. P. 107964. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107964>.
19. Abramov V.O., Abramova A.V., Bayazitov V.M., Altunina L.K., Gerasin A.S., Pashin D.M., Mason T.J. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015. V. 25. P. 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.014>.
20. Volkova G.I., Morozova A.V. Effects of Petroleum Resins and Ultrasonic Treatment on the Properties of Petroleum Paraffin Solutions in n-Decane and on the Structural-Group Composition of Precipitated Resins. *Petroleum Chemistry*. 2023. V. 63, N 1. P. 111–119. <https://doi.org/10.1134/s096554412302010x>.
21. Mohsin M., Meribout M. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015. V. 23. P. 413–423. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.007>.
22. Volkova G.I., Zubarev D.A., Kadychagov P.B. Effect of Ultrasonic Treatment on the Properties and Composition of High-Wax Crude Oil and Its Precipitates. *Petroleum Chemistry*. 2024. V. 64. P. 540–547. <https://doi.org/10.1134/s0965544124020026>.
23. Razavifar M., Qajar J., Riazi M. Experimental study on pore-scale mechanisms of ultrasonic-assisted heavy oil recovery with solvent effects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. V. 214. P. 110553. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110553>.
24. Baimukhametov G.F., Dengayev A.V., Safullina E.U., Kayumov A.A., Drozdov I.M., Shishulin V.V., Boushra A., Vakhin A.V., Sargin B.V., Sidibe M.S. Relaxation Process in Crude Oil after Ultrasonic Treatment. *International Journal of Engineering*. 2024. V. 37, N 5. P. 896–903. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.05b.08>.
25. Frenkel J. The Viscosity of Liquids. *Nature*. 1930. V. 125. P. 581–582. <https://doi.org/10.1038/125581b0>.
26. Kadyirov A., Karaeva J. Ultrasonic and Heat Treatment of Crude Oils. *Energies*. 2019. V. 12. P. 3084. <https://doi.org/10.3390/en12163084>.
27. Marfin E.A., Galimzyanova A.R., Gataullin R.N., Natfullin R.A. Effect of ultrasonic treatment on the rheological properties of paraffinic oil. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2024. V. 14, N 1. P. 74–83. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-74-83>. (in Russian).
28. Galimzyanova A.R., Gataullin R.N., Stepanova Yu.S., Marfin E.A., Khelkhal M.A., Vakhin A.V. Elucidating the impact of ultrasonic treatment on bituminous oil properties: A comprehensive study of viscosity modification. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024. V. 233. P. 212487. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212487>.
29. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. V. 215. P. 110705. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110705>.
30. Luche J.-L. *Synthetic Organic Sonochemistry*. Springer US : Boston, MA, 1998. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1910-6>.