



Experimental Study of the Effect of Ultrasonic Treatment on the Rheological Properties of Oil and Paraffin-Containing Oil

E.A. Marfin [1, 2], A.I. Kadyirov [1], Y.V. Karaeva [1], M.M. Gabdukaev [2]
[1] IPEAT FRC Kazan Scientific Center of RAS, [2] Kazan Federal University

Summary

This paper is devoted to studying the effect of ultrasound on the rheological properties of natural and synthetic oil. Experimental data were obtained using a rheometer Physica MCR 102 and a vibration viscometer SV-10. It has been established that with prolonged ultrasound exposure, the viscosity of the oil increases. It is shown that ultrasound leads to a change in the activation energy of a viscous flow of paraffin-containing oil. Moreover, not only the percentage of paraffin and the duration of treatment, but also the temperature depend on the processing efficiency. The obtained results can be used to improve the regime parameters of the impact on oil during its production, transportation and storage.

Экспериментальное исследование влияния ультразвуковой обработки на реологические свойства нефти и парафинсодержащего масла

Е.А. Марфин* (ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН, КФУ), А.И. Кадыйров (ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН),
Ю.В. Караева (ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН), М.М. Габдукаев (КФУ)

Введение

Вовлечение в разработку месторождений тяжелых и высокопарафинистых нефтей, которые характеризуются высокой температурой застывания, повышенной вязкостью и склонностью к образованию асфальто-смолистых и парафиновых отложений в призабойной зоне пласта и на поверхности нефтепромыслового оборудования, заставляет решать важные задачи борьбы с отложениями, возникающими в процессах добычи, транспорта и хранения таких нефтей. В настоящее время для улучшения вязкостно-температурных свойств нефтей используют различные физические и химические методы. Одним из способов решения этой задачи является воздействие акустическим полем в ультразвуковом интервале частот. Главным преимуществом такого метода является низкая энергозатратность, по сравнению с другими методами, а также абсолютная экологическая безопасность. Однако, любое воздействие физическими полями приводит к изменению характера межмолекулярных взаимодействий между отдельными компонентами нефтяной системы, что в свою очередь может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на ее физико-химические свойства.

Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют о снижении вязкости нефти после ультразвуковой обработки. Так, в работе [1] показано уменьшение вязкости тяжелой нефти более 57%. Представленные в работе [2] результаты свидетельствуют о том, что вязкость нефти, транспортируемой по трубопроводу, после ультразвуковой обработки снижается с 13 до 3 Па·с. Причем такой эффект может длиться несколько суток, однако при нагреве нефти эффект исчезает. При этом содержание парафина в нефти неоднозначно сказывается на эффекте снижения вязкости. Так, в работе [3] показано, что у низкопарафинистой нефти, но с высоким содержанием смол и асфальтенов ультразвук приводит к более существенному снижению вязкости. Ультразвуковая обработка высокопарафинистой нефти приводит также к тому, что в осадке увеличивается доля высокомолекулярных n-алканов, а массовая доля асфальтенов и их средняя молекулярная масса уменьшаются [4]. В работах [5-7] также представлены данные о снижении вязкости нефти после ультразвуковой обработки.

Снижение вязкости высокопарафинистых нефтей наблюдается также при одновременной ультразвуковой обработке и добавлении в нефть полимерных добавок [8]. Причем в данном случае проявляется синергетический эффект, аналогичный совмещению акустического воздействия с технологиями увеличения нефтеотдачи при добыче нефти [9]. Влияние концентрации парафина исследовалось в работе [10], где показано, что максимальный эффект снижения вязкости достигается при концентрации 6%. В работе [11] показано, что использование растворов парафина в различных маслах позволяет адекватно описывать поведение высокопарафинистой сырой нефти в акустическом поле. Целью настоящей работы является экспериментальное изучение реологических свойств нефти и парафинсодержащего масла, а также изменение этих свойств под воздействием ультразвуковой обработки.

Метод

В качестве объектов исследования были использованы два образца нефти: образец №1 – товарная нефть и образец №2 – сырая нефть из месторождения Новошешминского района Республики Татарстан. Кроме того, были использованы образцы синтетической нефти, полученной растворением в разогретом полусинтетическом моторном масле (SAE 10W-40) твердого парафина. Подготовленные образцы синтетической нефти, характеризуются массовым содержанием парафина в диапазоне от 0 до 9%.

Ультразвуковое воздействие на образцы осуществлялось с помощью ультразвукового технологического аппарата УЗТА-0,2/22-ОМ серии «Волна» с частотой 22 кГц. Интенсивность ультразвукового воздействия на образец нефти №1 составила $6,94 \text{ Вт/см}^2$, на образец №2 – $8,32 \text{ Вт/см}^2$ в течение 3- минут, а на образцы синтетической нефти – 10 Вт/см^2 в течение 1 и 3 минут. Термический нагрев образцов нефти осуществлялся с помощью термостата ВТ-8.

Измерения вязкости исследуемых образцов нефти при температуре 20°C осуществлялись с помощью реометра Physica MCR-102. Исследование реологических свойств синтетической нефти проводилось в температурном диапазоне от -6°C до 65°C на вибрационном вискозиметре SV-10. Методика обработки температурных зависимостей вязкости описана в работе [12]. По результатам такой обработки рассчитывается значение энергии активации вязкого течения.

Результаты

Измерения образцов нефти проводились при различных скоростях сдвига. На рисунке 1 показаны кривые течения этих образцов, полученные с помощью реометра Physica MCR-102. Видно, что товарная нефти (образец №1) обладает бингамовскими свойствами, а сырая нефти (образец №2) – псевдопластичными. Ультразвуковое воздействие и термическое воздействие на эти нефти привело к увеличению эффективной вязкости. При этом, если для образца №1 наибольшая вязкость наблюдается при термической обработке, то для образца №2 – при ультразвуковом воздействии. Наблюдаемый эффект увеличения вязкости после ультразвуковой обработки совпадает с данными работы [6]. Увеличение вязкости нефти при предварительной термической обработке объясняется повышенной скоростью охлаждения ее структурированием.

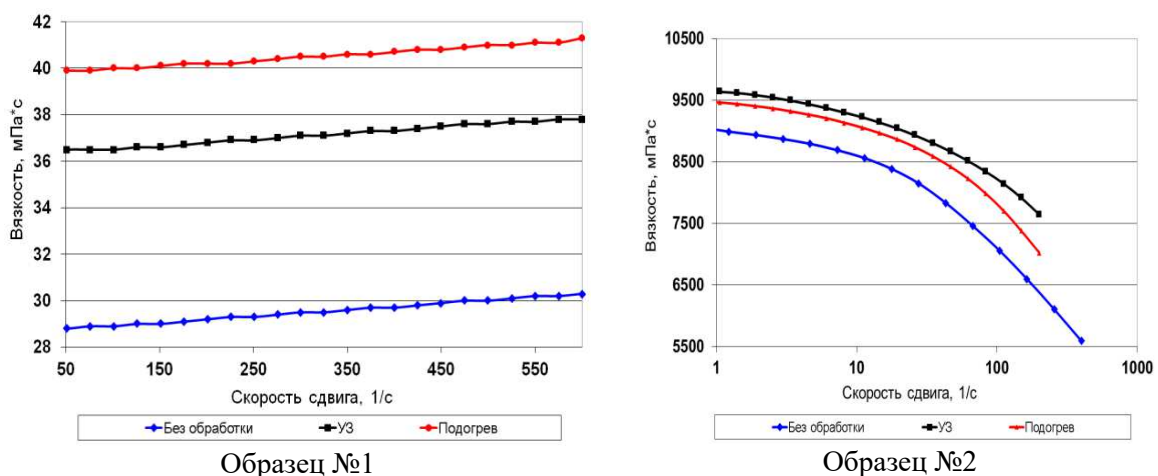


Рисунок 1. Кривые течения для образцов нефти при $T=20^\circ\text{C}$.

Для изучения влияния содержания парафина предварительно были проведены исследования вязкости чистого парафина. Ультразвуковая обработка его не выявила заметных изменений в реологических свойствах. Тем не менее, измерения вблизи температуры кристаллизации показали, что после обработки ультразвуком температура начала кристаллизации парафина незначительно, но уменьшается (рисунок 2). Полученный результат подтверждается результатами исследований, опубликованных в работах [3,10].

Исследования температурных кривых синтетической нефти, состоящей из масла и растворенного в нем парафина, выявили наличие двух прямолинейных участка в графике зависимости логарифма вязкости от обратной температуры. Первый - в области низких температур, второй - в области высоких. Такая зависимость характерна для чистого парафина. Соответственно, обработка каждого из этих участков дает разные значения энергии активации вязкого течения по уравнению Френкеля.

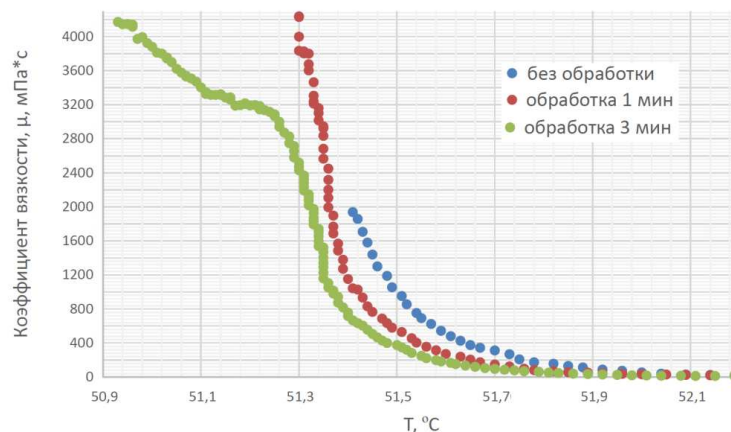


Рисунок 2. Температурные зависимости вязкости парафина вблизи температуры начала кристаллизации

На рисунке 3а представлены зависимости энергии активации вязкого течения от процентного содержания парафина в масле в диапазоне высоких температур. Из графиков видно, что непродолжительное ультразвуковое воздействие незначительно снижает энергию активации, причем при концентрации парафина больше 6%, значение энергии активации совпадает с необработанной жидкостью. Длительная обработка ультразвуком выявила следующую особенность. При незначительном менее 1 % содержании парафина ультразвуковое воздействие не оказывает влияние на энергию активации вязкого течения. С увеличением же концентрации парафина энергия активации значительно возрастает. При 9% содержании энергия активации вязкого течения возрастает более, чем на 80%.

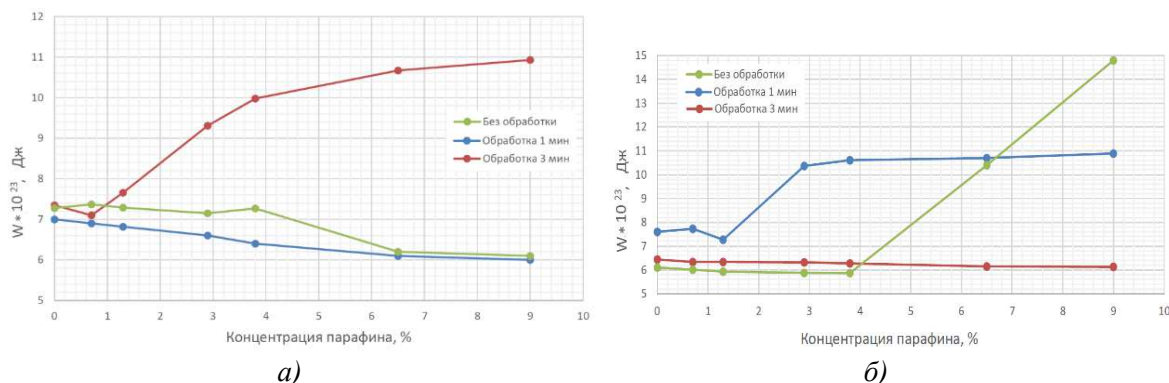


Рисунок 3. Зависимости энергии активации вязкого течения парафинсодержащего масла от концентрации парафина при температурах: а) от 25 °С до 65 °С, б) -6 °С до 25 °С.

В области низких температур происходят совершенно иные изменения энергии активации вязкого течения. Так, если необработанное масло с содержанием до 4% имеет энергию активации равную около 6 %, то при увеличении содержания парафина энергия активации резко возрастает (рисунок 3б). Более продолжительная обработка ультразвуком (3 минуты) приводит к тому, что энергия активации практически не меняется от содержания парафина, по крайней мере, в исследуемом диапазоне концентраций. Необходимо отметить, что непродолжительное ультразвуковое воздействие в течение 1 минуты привело к повышению значения энергии активации практически во всем диапазоне.

Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что ультразвуковое воздействие неоднозначно влияет на реологические характеристики нефти по отношению к термическому воздействию и зависит от состава нефти, что требует проведения

дальнейших исследований. Наличие в масле растворенного парафина приводит к различным результатам ультразвуковой обработки в диапазоне температур от -6 до 65 °С. На низких температурах длительное воздействие ультразвука оказывает положительный эффект снижения вязкости, при высоких температурах наоборот длительное ультразвуковое воздействие приводит к отрицательному результату.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №18-31-20034, №18-48-160001 и №18-08-01047.

Библиография / References

1. Shi, C., Yang, W., Chen, J., Sun, X., Chen, W., An, H., Duo, Y. and Pei, M. [2017] Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction. *Ultrasonics Sonochemistry*, **37**, 648-653.
2. Qiao, J., Song, W., Wang, W., Yuan, X. and Li, L. [2017] Experimental study of aging oil viscosity reduction caused by ultrasound. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, **32** (1), 030007.
3. Mullakaev, M.S., Volkova, G.I. and Gradov, O.M. [2015] Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **49** (3), 287-296.
4. Anufriev, R.V. and Volkova, G.I. [2016] Influence of ultrasonic treatment on structural-mechanical properties of oil and sedimentation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, **327** (10), 50-58.
5. Ershov, M.A., Baranov, D.A., Mullakaev, M.S. and Abramov, V.O. [2011] Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field. *Chemical and Petroleum Engineering*, **47** (7-8), 457-461.
6. Fasfiev, B.R., Marfin, E.A. and Khusnullina, A.A. [2018] The change in the temperature dependence of the viscosity of oil under ultrasonic action. *Geomodel 2018*. DOI: 10.3997/2214-4609.201802359
7. Mullakaev, M.S., Asylbaev, D.F., Prachkin, V.G. and Volkova, G.I. [2014] Influence of ultrasound and heat treatment on the rheological properties of Ust-Tegusskoe oil. *Chemical and Petroleum Engineering*, **49** (9-10), 584-587.
8. Loskutova, Yu.V., Prozorova, I.V. and Yudina, N.V. [2011] Improving the structural-rheological properties of high-paraffin crude oil using chemical reagents and vibrational treatment. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, **47** (5), 358-361.
9. Marfin, E.A., Kravtsov, Y.I., Abdrashitov, A.A., Gataullin, R.N. and Galimzyanova, A.R. [2015]. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results. *Petroleum Science and Technology*, **33** (15-16), 1526-1532.
10. Prozorova, I.V., Litvinets, I.V., Volkova, G.I., Morozova, A.V. and Kazantsev, O.A. [2018] Effect of ultrasonic treatment and polymer additive on structural-mechanical properties of solutions of paraffinic hydrocarbons. *AIP Conference Proceedings*, 2051, 020246.
11. Anufriev, R.V., Volkova, G.I. and Yudina, N.V. [2018] Influence of dispersion medium composition on properties of wax disperse systems after sonication. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, **329** (4), 45-53.
12. Abdrashitov, A. and Marfin, E. [2019] Influence of paraffin content on temperature dependences of viscosity of synthetic oil. *Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition*.