

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.153-164>

EDN NSCCUO

УДК 622.276.6

Ультразвуковое воздействие как метод снижения вязкости тяжелых нефтей и битумов

¹Валеев Д.И., ¹Деньгаев А.В., ²Хайрtdинов Р.К., ³Хазиев Р.Р.

¹РГУ нефти и газа им. Губкина, Москва, Россия

²ЗАО «Предприятие Кара-Алтын», Альметьевск, Россия

³Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, Россия

Ultrasonic exposure as a method of reducing the viscosity of heavy oils and bitumen

¹D.I. Valeev, ¹A.V. Dengayev, ²R.K. Khairtdinov, ³R.R. Khaziev

¹Gubkin State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

²Closed (joint-stock) company "Kara-Altyn Enterprise", Almet'yevsk, Russia

³Institute of Ecology and Subsoil Use Problems of TAS, Kazan, Russia

E-mail: radmir361@mail.ru

Аннотация. Цель данной работы заключается в исследовании воздействия акустического поля на пробу тяжелой нефти. В ходе исследования был обоснован выбор оптимальной температуры нефти при воздействии на неё ультразвуком, приведена теоретическая схема промышленного реактора для ультразвукового воздействия на нефть, а также доказана эффективность его применения. Были рассмотрены различные методы борьбы с проблемами, вызванными тяжелыми нефтями, такие как применение специальных химических реагентов, физические методы, механические и тепловые методы. Каждый метод был описан подробно. В результате исследования были получены следующие выводы: влияние акустических полей на нефть не до конца изучено и требует дальнейших исследований, однако уже на данный момент виден потенциал обработки нефти ультразвуком, связанный с процессами кавитации, которые происходят в нефти при ультразвуковом воздействии и способствуют улучшению как физических, так и химических свойств нефти.

Ключевые слова: природные битумы, ультразвуковое воздействие, свойства нефти, вязкость нефти, кавитация, нефтяное месторождение, графики зависимости

Для цитирования: Валеев Д.И., Денгаев А.В., Хайрtdинов Р.К., Хазиев Р.Р. Ультразвуковое воздействие как метод снижения вязкости тяжелых нефтей и битумов // Нефтяная провинция.-2024.-№3(39).- С. 153-164. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.153-164>. - EDN NSCCUO

Abstract. The purpose of this work is to study the effect of an acoustic field on a sample of heavy oil. In the course of the study, the choice of the optimal oil temperature when exposed to ultrasound was justified, a theoretical scheme of a field reactor for ultrasonic exposure to oil was given, and the effectiveness of its application was proved. Various methods of dealing with problems caused by heavy oils were considered, such as the use of special chemical reagents, physical methods, mechanical and thermal methods. Each method has been described in detail. As a result of the study, the following conclusions were obtained: the effect of acoustic fields on oil has not been fully studied and requires further research, however, at the moment the potential of oil treatment with ultrasound is already visible, associated with cavitation processes that occur in oil under ultrasonic exposure and contribute to the improvement of both physical and chemical properties of oil.

Key words: *natural bitumen, ultrasonic exposure, oil properties, oil viscosity, cavitation, oil field, dependence graphs*

For citation: D.I. Valeev, A.V. Dengaev, R.K. Khairtdinov, R.R. Khaziev Ul'trazvukovoye vozdeystviye kak metod snizheniya vyazkosti tyazhelykh neftey i bitumov [Ultrasonic exposure as a method of reducing the viscosity of heavy oils and bitumen]. Neftyanaya Provintsiya, No. 3(39), 2024. pp. 153-164. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.153-164>. EDN NSCCUO (in Russian)

Введение

Одной из наиболее важных тенденций, наблюдаемых в мировой нефтедобывающей отрасли, является снижение объемов производства обычных легких нефтей. Напротив, спрос на энергоносители растет с такой скоростью, что количество добываемой сырой нефти в ближайшем будущем не сможет удовлетворить запросы. Одним из возможных путей для поддержания инфраструктуры нефтедобывающей отрасли является введение в разработку тяжелых нефтей и битумов. Однако ввиду высокой вязкости и плотности, а также высокое содержание асфальтенов, металлов и серы в углеводородах представляют основные проблемы, требующие практических, новых и экономически выгодных технологических решений.

В настоящее время существует множество технологий, применяемых для добычи и транспортировки тяжелой нефти [3], но практически все технологии экономически не эффективны; это обстоятельство объясняется несовершенством существующих ныне технологий и в будущем является предпосылкой для разработки новых методов и технологий повышения нефтеотдачи пластов и перекачки аномально высоковязких нефтей.

На современном этапе разрабатываются и применяются волновые технологии, такие как электрические и магнитные поля, микроволновое излучение и ультразвуковые волны. На наш взгляд метод ультразвукового поля является наиболее энергосберегающим, а благодаря физическим свойствам ультразвука, возникающим на границе нефть-вода хорошо известно, что ультразвуковая энергия способствует процессам тепло- и массообмена, что делает ее привлекательной для улучшения деэмульгирования, оптимизации процессов перекачки нефти и т.д [4]. В то же время считается, что ультразвук оказывает положительное влияние на процессы, протекающие на границе раздела нефть-вода, и на коллоидную структуру нефти. Более того, акустические волны способствуют образованию, росту и схлопыванию пузырьков в среде нефтяной фазы (процесс кавитации), и поэтому вблизи нее возникают пондеромоторные силы [5].

При воздействии ультразвуком состав сырой нефти может быть существенно изменен из-за разрушения высокомолекулярных компонентов нефти, таких как смолы и асфальтены. Эффективность такой обработки в первую очередь зависит от времени обработки, физических параметров ультразвуковой волны, температуры среды и концентрации асфальтенов. Наблюдается, что размер асфальтенового кластера в структуре нефтяной дисперсной системы уменьшается при ультразвуковом облучении [4].

Теоретическая часть

Ультразвуковая обработка также может быть использована для улучшения свойств существующих эмульсий. Например, битумные эмульсии при обработке ультразвуком улучшаются их структурные и технологические свойства, что приводит к снижению условной вязкости на 37,5%, повышению однородности и лучшей стабильности при хранении. Снижение вязкости обеспечивает лучшую подвижность, что расширяет область применения этих эмульсий.

Соединения серы являются одним из наиболее распространенных загрязняющих веществ, обнаруживаемых в нефти, и значительное количество этих соединений переносится в топливо в процессе переработки. Присутствие этих загрязняющих веществ в топливе может привести к различным проблемам с окружающей средой и здоровьем, а также к снижению топливной экономичности. Следовательно, удаление этих загрязняющих веществ является важнейшим этапом процесса очистки. Ультразвук является одним из наиболее перспективных методов очистки топлива от этих загрязнений. При использовании ультразвука в жидком топливе образуются полости, что может улучшить кинетику процесса окислительной десульфурации. Этот процесс выполняется поэтапно в присутствии катализатора и окислителя с последующим удалением очищенного топливного продукта.

Воздействие ультразвука на коллоидную структуру парафинов и нефтей, богатых смолами, особенно актуально с практической точки зрения. В исследовании, проведенном на Усинском месторождении, воздействие акустического поля частотой 18 кГц и интенсивностью 8 кВт/м² в течение 30-60 мин было обнаружено, что первоначальное воздействие ультразвуком снижало вязкость при низкой скорости сдвига, но после релаксации наблюдалось увеличение вязкости (Рис. 1).

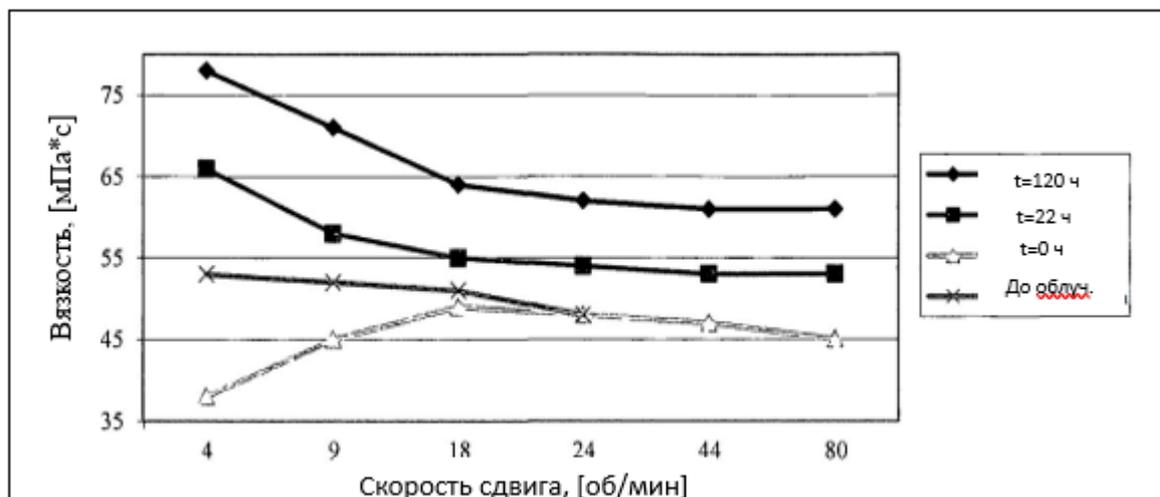


Рис.1. Вязкость высокопарафинистой нефти до и после ультразвуковой обработки

Такое поведение нефти объясняется тем, что сырая нефть, содержащая парафины и смолы, имеет периодическую коллоидную структуру, образующуюся при повышенных температурах и давлениях в пластовых условиях. Ультразвуковая обработка разрушает коллоидную структуру, и в новых условиях происходит новое структурирование, которое изменяет сами коллоидные частицы и увеличивает вязкость нефти [1, 2].

Воздействие ультразвуковой обработки на парафины является комбинированным, приводящим к изменению структуры под воздействием механических вибраций, химических изменений, таких как разрыв молекул, образование свободных радикалов и нагрев, ультразвуковой нагрев также может быть использован для очистки парафиновых отложений. В первую очередь, ультразвук рассматривают, как технологию для очистки резервуаров от отложений, но он также может применяться при добыче нефти.

Энергия ультразвука может быть использована для разрушения агрегации асфальтенов, что значительно снижает вязкость жидкости. Однако в некоторых случаях наблюдалось, что вязкость сырой нефти может быть увеличена до необработанного уровня и иногда даже превышать вязкость нефти

до обработки ультразвуком. Такое поведение нефти связывают с образованием новой молекулярной структуры в нормальных условиях, которое обусловлено явлением релаксации.

Явление релаксации в химии связано с задержкой между внешним воздействием и реакцией системы. После резкого изменения давления или температуры требуется время для восстановления равновесия молекулярной или атомной структуры в новых условиях взаимодействия. После восстановления молекулярной структуры, в нефти могут образовываться более длинные цепочки углеводородов, что и приводит к увеличению вязкости нефти. Данного эффекта можно избежать путем применения химических реагентов после облучения.

Экспериментальная часть

В экспериментальной части стояла задача выяснить оптимальную температуру обрабатываемой нефти для наибольшего уменьшения вязкости.

Проводились испытания на Ашальчинской нефти с временем облучения 180 секунд. В качестве температур для исследования были выбраны температуры, наиболее приближенные к тем, которые можно создать в промышленных условиях с наименьшими экономическими затратами, т.е. 30°; 40°; 50°.

Для фиксации оптимальной температуры облучения было принято решение использовать реактор, технологические особенности которого позволяли держать заданную температуру нефти при длительном воздействии ультразвуком.

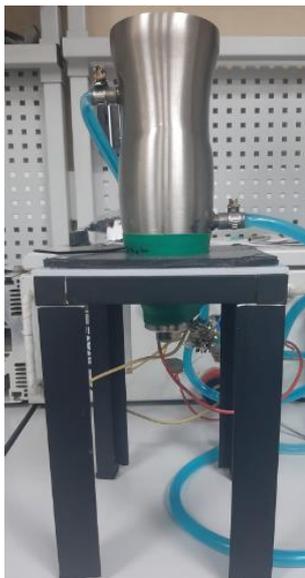


Рис. 2. Реактор, поддерживающий температуру во время облучения

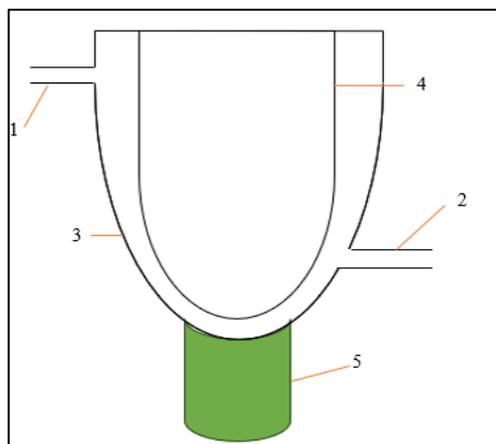


Рис.3. Схема реактора, поддерживающего температуру во время облучения (1 - входное отверстие; 2 - выходное отверстие; 3 - внешний стакан; 4 -внутренний стакан; 5 - пьезокерамический ультразвуковой преобразователь)

Между внешним и внутренним стаканами через входное отверстие поступает жидкость заданной температуры, что позволяет задавать необходимую температуру реактору. За циркуляцию жидкости в полости между стаканами, отвечает прибор КРИО-ВТ-12-1 (Рис. 4), более того, данный прибор не только создает заданную температуру, но и поддерживает ее на протяжении всего времени облучения. Такое использование установки КРИО-ВТ-12-1 (Рис. 4) и реактора (Рис. 3) позволило поддерживать заданную температуру во время облучения (до облучения $T=30^{\circ}$, после облучения $T=30,5^{\circ}$).

При таком незначительном изменении температуры за время воздействия можно делать выводы о наиболее эффективной температуре облучения.

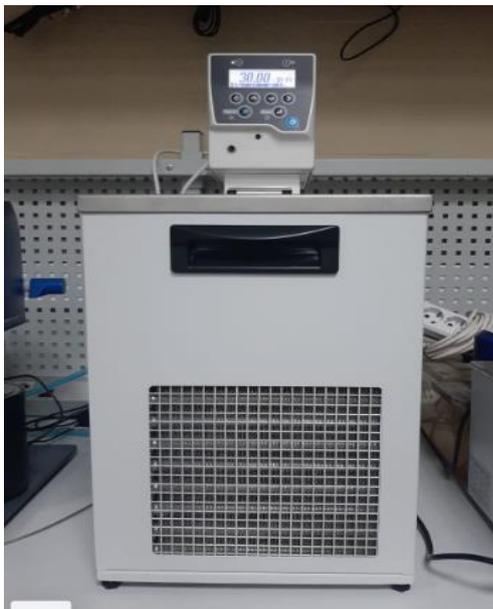


Рис. 4. Установка КРИО-ВТ-12-1

На реакторе, способном поддерживать свою температуру, были проведены испытания при тех же температурах (30°; 40°; 50°). При входной мощности облучения 60 Вт, временем облучения 180 с. Объем облучаемой нефти составлял 120 мл. Вязкость была замерена до и после облучения на вискозиметре RVI 2 (Рис. 5). В результате измерений, были получены следующие результаты:

1) Динамическая вязкость до облучения:

- T=30°, $\mu=1290$ мПа*с;
- T=40°, $\mu=627$ мПа*с;
- T=50°, $\mu=362,5$ мПа*с;

2) Динамическая вязкость после облучения:

- T=30°, $\mu=1080$ мПа*с;
- T=40°, $\mu=489$ мПа*с;
- T=50°, $\mu=322$ мПа*с.



Рис.5. Вискозиметр RVI 2

После чего рассчитали процентное уменьшение вязкости нефти для каждой температуры и построили график зависимости уменьшения динамической вязкости нефти от температуры воздействия.

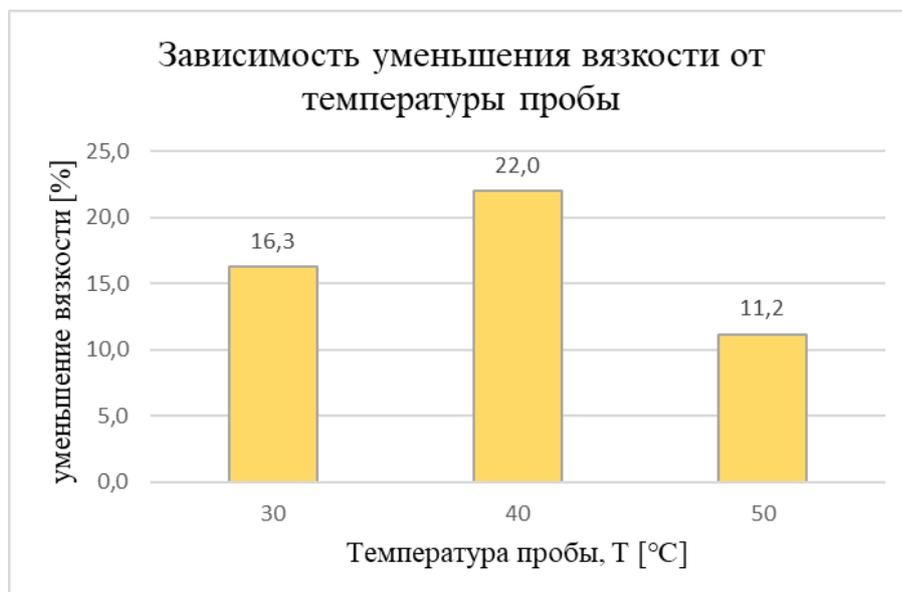


Рис. 6. График процентного уменьшения вязкости после обработки ультразвуком

По графику (Рис. 6) можно сделать вывод, что наиболее эффективная температура облучения 40°.

Заключение

В ходе испытаний удалось выявить оптимальную температуру, при обработке нефти ультразвуком. Были проведены исследования при температурах 30°; 40°; 50° на пробе Ашальчинского месторождения. Наибольшее снижение вязкости нефти было зафиксировано при температуре пробы нефти и реактора равным 40°.

Стоит отметить, что температура 40° является оптимальной лишь для уменьшения вязкости т.е. для физического эффекта ультразвуковой обработки, с точки зрения оптимальной температуры для получения химической эффективности, испытания не проводились, эта температура может отличаться от оптимальной температуры, которую получили для уменьшения вязкости.

Список литературы

1. Chemical Viscosity Reduction of Heavy Oil by Multi-Frequency Ultrasonic Waves with the Main Harmonics of 20–60 kHz; Aleksey V. Dengaeв, Aydar A. Kayumov, Andrey A. Getalov, Firdavs A. Aliev, Gadel F. Baimukhametov, Boris V. Sargin, Alexander F. Maksimenko and Alexey V. Vakhin; Department of Petroleum Engineering, Gubkin National University of Oil and Gas, Leninskiy Prospect, 65, 119991 Moscow; *Fluids* 2023, 8, 136.
2. Innovations in Oil Processing: Chemical Transformation of Oil Components through Ultrasound Assistance; Aleksey V. Dengaeв, Mohammed A. Khelkhal, Andrey A. Getalov, Gadel F. Baimukhametov, Aydar A. Kayumov, Alexey V. Vakhin and Marat R. Gafurov; Department of Petroleum Engineering, Gubkin National University of Oil and Gas, Leninskiy Prospect 65, 119991 Moscow, Russia; *Fluids* 2023, 8, 108.
3. Ильин А.В., Давлетшин Р.Р., Курамшин А.И. Химическая технология нефти и её переработка: учебное пособие. — Казань: Казанский Федеральный Университет. Химический институт им. А.М. Бутлерова, 2018 г., — 80 с.
4. Хмелёв А. Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности: учебник / А. Н. Хмелев. – Бийск: АГТУ им. Ползунова, 2010 г. — 176 с.
5. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. - М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. - 168 с.

References

1. Chemical Viscosity Reduction of Heavy Oil by Multi-Frequency Ultrasonic Waves with the Main Harmonics of 20–60 kHz; Aleksey V. Dengaeв, Aydar A. Kayumov, Andrey A. Getalov, Firdavs A. Aliev, Gadel F. Baimukhametov, Boris V. Sargin, Alexander F. Maksimenko and Alexey V. Vakhin; Department of Petroleum Engineering, Gubkin National University of Oil and Gas, Leninskiy Prospect, 65, 119991 Moscow; *Fluids* 2023, 8, 136. (in English).
2. Innovations in Oil Processing: Chemical Transformation of Oil Components through Ultrasound Assistance; Aleksey V. Dengaeв, Mohammed A. Khelkhal, Andrey A. Getalov, Gadel

- F. Baimukhametov, Aydar A. Kayumov, Alexey V. Vakhin and Marat R. Gafurov; Department of Petroleum Engineering, Gubkin National University of Oil and Gas, Leninskiy Prospect 65, 119991 Moscow, Russia; Fluids 2023, 8, 108. (in English).
3. Ilyin A.V., Davletshin R.R., Kuramshin A.I. *Ximicheskaya texnologiya neft' i eyo pererabotka: uchebnoe posobie*. [Chemical technology of oil and its processing: a textbook.] — Kazan: Kazan Federal University. A.M. Butlerov Chemical Institute, 2018, — 80 p. (in Russian)
 4. Khmelev A. N. *Primenenie ul'trazvuka vy`sokoj intensivnosti v promy`shlennosti: uchebnyk* [Application of high-intensity ultrasound in industry: textbook] / A. N. Khmelev. — Biysk: AGTU named after Polzunova, 2010 — 176 p. (in Russian)
 5. Mullakaev M.S. *Ul'trazvukovaya intensivifikaciya doby`chi i pererabotki nefti* [Ultrasonic intensification of oil production and refining]. - M.: JSC "VNII OENG", 2014. - 168 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Валеев Данис Ирекович, бакалавр кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений РГУ нефти и газа им. Губкина
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 65
E-mail: danis_v02@mail.ru

Деньгаев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений РГУ нефти и газа им. Губкина
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 65
E-mail: nttm_smena@mail.ru

Хайрtdинов Руслан Камилевич, заместитель генерального директора, главный геолог ЗАО «Предприятие Кара Алтын»
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Шевченко, 48
E-mail: ruslan@karaaltyn.com

Хазиев Радмир Римович, старший научный сотрудник лаборатории геологического и экологического моделирования Института проблем экологии и недропользования АН РТ
Россия, 420087, Казань, ул. Даурская, 28
E-mail: radmir361@mail.ru

Authors

D.I. Valeev, Bachelor of the Department of Development and Operation of Oil Fields at Gubkin Russian State University of Oil and Gas
65, Leninsky Avenue, Moscow, 119991, Russian Federation
E-mail: danis_v02@mail.ru

A.V. Dengayev, Ph.D., Associate Professor of the Department of Development and Operation of Oil Fields at Gubkin Russian State University of Oil and Gas
65, Leninsky Avenue, Moscow, 119991, Russian Federation
E-mail: nttm_smena@mail.ru

R.K. Khairtdinov, Deputy General Director, Chief Geologist of CJSC Kara Altyn Enterprise
48, Shevchenko Str., Almet'yevsk, 423450, Russian Federation
E-mail: ruslan@karaaltyn.com

R.R. Khaziev, Researcher at the Laboratory of Geological and Environmental Modeling at the Institute of Ecology and Subsoil Use Tatarstan Academy of Sciences
28, Daur'skaya Str., Kazan, 420087, Russian Federation
E-mail: radmir361@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2024

Принята к публикации 14.09.2024

Опубликована 30.09.2024