

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ НЕФТЯНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

© 2023 г. М. С. Муллакаев^а, *, Р. М. Муллакаев^а, **, И. Б. Есипов^а, ***

^аРоссийский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина,
Ленинский пр-т 65, Москва, 119991 Россия

*e-mail: mullakaev@mail.ru

**e-mail: r.m.mullakaev@mail.ru

***e-mail: igor.esipov@mail.ru

Поступила в редакцию 05.08.2022 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Показано, что ультразвуковое воздействие на нефтяные дисперсные системы приводит к значительному снижению их вязкоупругих свойств. Экспериментально определены режимные параметры ультразвукового воздействия на высоковязкую нефть с целью снижения ее эффективной вязкости и температуры застывания. Результаты опытно-промышленных испытаний разработанного ультразвукового модуля свидетельствуют, что воздействие на высоковязкую нефть в проточном режиме позволяет существенно модернизировать существующую технологию транспортировки высоковязкой нефти.

Ключевые слова: ультразвук, нефтяные дисперсные системы, высоковязкая нефть, эффективная вязкость, температура застывания, ультразвуковой модуль, опытно-промышленные испытания

DOI: 10.31857/S0320791922600408, **EDN:** QRAVIP

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, нефть является сложной системой с внутренней организацией, способной изменяться под воздействием внешних факторов. В нефти содержатся дисперсные частицы сложного строения на основе агрегатов асфальтенов, способные к самостоятельному существованию, и поэтому ее рассматривают как нефтяную дисперсную систему [1]. Среди эффективных методов воздействия на такую систему, с целью изменения ее вязкоупругих свойств, все более значимое место приобретают физические методы, характерной особенностью которых является использование в качестве “рабочего агента” не вещества (вода, пар, газ, химические реагенты и т.д.), а физических полей различной природы. При этом одним из наиболее эффективных физических методов воздействия на нефтяную дисперсную систему является ультразвуковое (УЗ) воздействие. Кроме того, с помощью ультразвука весьма информативно определяются различные параметры сплошной среды [2].

Исследования, направленные на изучение влияния УЗ-воздействия на вязкоупругие свойства нефтяной дисперсной системы, приводятся в работах [3–5]. В работе [3] приведены результаты исследований эффективности УЗ-воздействия

на вещество, а также особенности развития кавитации в жидкостях с различными физико-химическими свойствами. В работе [4] исследуется осесимметричная акустическая волна, распространяющаяся в сдвиговом течении в трубопроводе при различных значениях частоты и сдвигового среднего потока, а также влияние этих параметров на относительную фазовую скорость и коэффициент затухания волны, распространяющейся в воде и идеальном газе. Подробно обсуждаются возникающие при этом термовязкостные эффекты. Результаты экспериментального исследования затухания ультразвука от частоты (в диапазоне 10–23 МГц) и концентрации (от 0.1 до 10%) асфальтенов в смесях с толуолом приводятся в работе [5], которые свидетельствуют о том, что затухание имеет релаксационную природу и дает дополнительную информацию о структурных превращениях и фазовых переходах.

В работах показано, что в жидкостях существует неизвестный ранее низкочастотный вязкоупругий релаксационный процесс, обусловленный коллективными взаимодействиями больших групп молекул (ассоциатов, мицелл), причем время их релаксации может на много порядков превышать время оседлого существования отдельных молекул [6]. В работе [7] измерили модуль сдвига и

тангенс угла механических потерь для нескольких жидкостей в диапазоне частот от 10^4 до 10^5 Гц и установили, что увеличение частоты сопровождается уменьшением модуля сдвига и увеличением тангенса угла механических потерь. Дальнейшие экспериментальные результаты исследования низкочастотной (10^5 Гц) сдвиговой упругости коллоидной суспензии наночастиц различных размеров акустическим импедансным методом подтвердили, что это является их объемным свойством [8].

Известно, что нефтяные дисперсные системы проявляют свойство аномально медленного перехода к состоянию равновесия. Авторами работы [9] приведены результаты экспериментов по наблюдению медленной эволюции модулей вязкоупругости тяжелой нефти при различных частотах и температурах. Получено модельное дифференциальное уравнение, описывающее медленную кинетику изменения внутренних параметров среды. В отличие от принятой экспоненциальной временной зависимости, медленная кинетика приводит к логарифмической временной зависимости затухания возмущения. Новыми исследованиями [10] экспериментально установлено, что комплексный модуль сдвига линейно зависит от амплитуды сдвиговых возмущений, что возможно при линейной зависимости величины вязкоупругих характеристик от модуля деформации среды. В работе [11] показано, что при рациональных значениях мощности и времени УЗ-обработки, а также в зависимости от обводненности и исходной температуры тяжелой нефти, ее вязкость можно снизить на 86%. Причем эффект УЗ-обработки зависит от количества и распределения кристаллов парафинов в тяжелой нефти. Доказана также синергетика совместной обработки ультразвуком и химическими реагентами, приводящей к дополнительному снижению вязкости нефти.

В работе [12] показано, что УЗ-воздействие в течение 2 мин (частота 32.5 кГц, удельная мощность 0.008 Вт/см²) снижает статический предел текучести на 17% у образца мазута-100, охлажденного до -15°C в пристеночном слое вращающегося патрубка. Получена также линейная регрессионная зависимость между отношением пороговой силы начала движения патрубка, тока потребления УЗ-преобразователя и температурой топлива.

Исследовано влияние УЗ-обработки на вязкоупругие свойства образцов сырой нефти [13] и установлено, что течение нефти носит псевдопластичный характер. Показано, что после УЗ-обработки нефти в течение 40 мин диспергируют тяжелые компоненты, причем вязкость и скорость флокуляции достигают минимума. В работе [14] исследовано влияние УЗ-волн частотой 25 и 68 кГц и мощностью 100, 250 и 500 Вт на вязкость парафина, синтетической нефти и керосина в

гладкой капиллярной трубке. Результаты показывают, что вязкость жидкостей уменьшается под воздействием ультразвука, что связывается с индуцированным выделением тепла и кавитацией внутри жидкости. Распространение УЗ-волн было использовано для исследования гелеобразования парафинистой сырой нефти, вызванного кристаллизацией парафина при снижении температуры ниже порогового значения ее застывания [15].

В работе [16] исследовано влияние УЗ-волн различных частот и мощности на изменение вязкости трех нефтепродуктов. После УЗ-обработки вязкость всех нефтепродуктов снижается, причем снижение вязкости возрастало с увеличением мощности УЗ-воздействия и изменялось обратно пропорционально увеличению его частоты. Авторами [17, 18] показано, что эффективность УЗ-воздействия зависит от компонентного состава нефти. После УЗ-обработки нефти с высоким содержанием парафинов и смол наблюдалось снижение температуры застывания на 16°C и вязкости при 10°C — в 6 раз. УЗ-обработка нефтей с высоким содержанием парафина и низким содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов ведет к повышению вязкости, температуры застывания и количества парафиновых отложений [19].

В работе [20] установлено, что УЗ-обработка приводит к уменьшению вязкости высокосмолистой нефти, что связано с разрушением структуры асфальтенового ядра дисперсной фазы и эффект снижения вязкости длится больше 1 года. В то же время УЗ-обработка нефти с высоким содержанием парафина приводит к возрастанию вязкости за счет диспергирования кристаллической фазы парафиновых углеводородов и взаимодействия их с асфальтенами, что приводит к структурированию нефти с переходом ее в связанно-дисперсное состояние. В работе [21] приведены результаты исследования УЗ-воздействия на нефть с высоким содержанием парафина, которые показали уменьшение кинематической вязкости на 8.4%, температуры застывания — на 14°C , эффект сохраняется в течение 20 сут.

Авторы в работе [22] показали, что УЗ-обработка нефти с высоким содержанием парафина и смол в течение 15 мин приводит к снижению динамической вязкости в области малых скоростей сдвига в 17 раз и температуры застывания — на 20°C , которые остаются неизменными в течение 5–7 сут. Исследование состава нефти и ее компонентов методами хромато-масс-спектрометрии и ИК-спектроскопии показали, что УЗ-обработка не приводит к заметному изменению компонентного состава нефти.

Анализ литературы показывает, что УЗ-обработка эффективна для тяжелых нефтей. В работе [23] показали, что при оптимальных режимных параметрах УЗ-обработки вязкость вакуумного остат-

ка уменьшилась на 23.6%, содержание асфальтенов уменьшилось на 5% массовых. Авторы [24] считают, что это связано с изменением структуры асфальтенов и смол после УЗ-обработки за счет отрыва углеводородных заместителей от колец и их раскрытия, что приводит к уменьшению содержания ароматических и увеличению содержания насыщенных соединений, что подтверждается данными ЯМР-спектроскопии.

Влияние сонохимического воздействия на вязкоупругие свойства нефтей различного компонентного состава исследовано в работе [25, 26]. Сонохимическое воздействие позволяет в 2–2.5 раза снизить динамическую вязкость исследуемых нефтей. С использованием лазерного фотонного спектрометра показано, что разбавление нефти н-гексаном приводит к снижению средних радиусов ассоциатов в 1.5 раза, а дополнительная УЗ-обработка в этом случае приводит к снижению средних радиусов ассоциатов в 2–2.5 раза.

Существенное снижение вязкости и температуры застывания нефти достигается при совместном воздействии ультразвука и реагента, причем прослеживается явная синергетика их действия [27]. В работе [28] авторы использовали сонохимический метод для обработки нефтей с высоким содержанием парафина и смол различных месторождений Казахстана, и в результате удалось снизить динамическую вязкость нефти в среднем на 30–40%. Термоакустическая обработка нефти с высоким содержанием парафина и смол показала, что после обработки вязкость нефти снижается в 1.7 раза, а температура застывания уменьшается на 32°C [29].

Исследования образцов высоковязкой нефти методом импульсной ЯМР-релаксометрии показали, что после УЗ-обработки с частотой 22 кГц в течение 180 с происходит пептизация асфальтосмолопарафинистых веществ с переходом парафинов в состав сольватного слоя по диффузионному механизму и усиление прочности его структуры [30]. Структура нефти становится двухъядерной: ядрами выступают асфальтены и молекулы парафина, т.е. создается двухфазная структура, где парафиновая фаза встроена в асфальтовую фазу.

В работах [2, 18] выявлен механизм УЗ-воздействия на нефтяные дисперсные системы. УЗ-воздействие на нефтяные дисперсные системы за счет нелинейных акустических эффектов разрушает как первичные (слоисто-пачечные ассоциаты), так и вторичные надмолекулярные образования (мицеллы). После прекращения УЗ-воздействия дисперсные частицы восстанавливают гибкую решетчатую структуру за счет броуновского движения. Но структуру можно стабилизировать введением реагентов, когда за счет УЗ-воздействия химические реагенты эффективно распределяют-

ся по всему объему и препятствуют обратному восстановлению надмолекулярных образований.

Задачей данной работы является экспериментальное исследование УЗ-воздействия на высоковязкую нефть с целью регулирования ее вязкоупругих свойств для разработки основ энерго- и ресурсосберегающей УЗ-технологии транспортировки высоковязкой нефти.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Аппаратура и методика ультразвуковой обработки

Порционная обработка 200–300 мл нефти проводилась в стальном реакторе, в том числе с введенными реагентами при температуре 50°C с использованием магнитострикционного преобразователя мощностью 2.2 кВт, работающего на резонансной частоте 22.1 кГц и питающегося от генератора УЗГ-2М мощностью 2 кВт. Ультразвуковые колебания в жидкофазную нагрузку вводились с помощью стержневого волновода с диаметром рабочего торца 30 мм, амплитуда колебаний излучателя составляла 10 мкм при частоте 22 кГц. До начала УЗ-обработки и после ее окончания осуществлялось термостатирование пробы нефти в течение 30 мин при температуре 20°C. При комбинированном воздействии вначале добавлялся химический реагент, а затем образец нефти подвергался УЗ-воздействию.

Аппаратура и методика измерения вязкости

Динамическую вязкость определяли на ротационном вискозиметре Brookfield DV–III Ultra. Измерения обрабатывались с использованием стандартной программы прибора “REOCALC” с погрешностью не более 3%. В методике измерения учтены требования международного стандарта ASTM D2602, международного стандарта ASTM D4684 и ГОСТ 1747-91. Эффективная вязкость (с учетом $\tau_0 \approx 0$) определялась по формуле:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}},$$

где μ_{eff} – эффективная вязкость [Па·с]; τ – напряжение сдвига [Па]; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига [1/с].

Температуру застывания образцов определяли на приборе “ИНПН” (Кристалл), с точностью $\pm 0.2^\circ\text{C}$. Перед измерениями 300 г образца нефти подвергали обработке с плотностью УЗ-мощности 200 Вт/л в течение 15–20 мин, и затем проводили измерения температуры застывания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на образцах высоковязкой нефти Ашаль-

Таблица 1. Физико-химические свойства нефти Ашальчинского месторождения

Показатели	Величины
Плотность при 15°C, кг/м ³	967
Вязкость кинематическая при 20°C, мм ² /с	2495
Вязкость динамическая при 20°C, мПа с	2413
Содержание серы, мас. %	4.18
Содержание воды, мас. %	0.650
Температура застывания, °C	–15
Массовая доля парафинов, %	2.2
Компонентный состав, мас. %	
углеводороды	59.7
смолы	32.1
асфальтены	8.2

чинского месторождения, характеристики которой приведены в табл. 1. Нефть высоковязкая, имеет высокую плотность и относится к битуминозному типу. После подъема нефти, вследствие разности давления и температуры в пласте и на поверхности, она превращается в жидкость со сложными вязкоупругими свойствами, вследствие оседания смол и парафинов. В работах [31, 32] приведены результаты исследования фракционного, компонентного, структурно-группового, углеводородного состава и физико-химических свойств нефти Ашальчинского месторождения и ее фракций. Вязкоупругие свойства образцов битуминозной нефти данного месторождения в диапазоне температур 5–60°C исследованы в работе [33]. Показано, что нефть начинает проявлять неньютоновские свойства при температуре меньше 30°C. В неньютоновской области течения динамическая вязкость нефти с высокой степе-

нью точности описывается уравнением Карро [33, 34]:

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}},$$

где μ_0 – наибольшая вязкость практически неразрушенной структуры [Па с], μ_{∞} – наименьшая вязкость предельно разрушенной структуры [Па с], $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига [с^{–1}]; n – показатель нелинейности реологической кривой $\mu(\dot{\gamma})$, λ – время релаксации [с].

Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для нефти Ашальчинского месторождения приведена на рис. 1. Как показали эксперименты, для образцов нефти характерно почти полное отсутствие начального напряжения сдвига τ_0 .

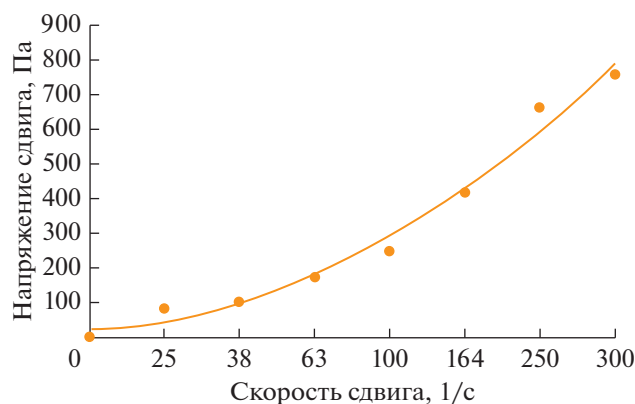
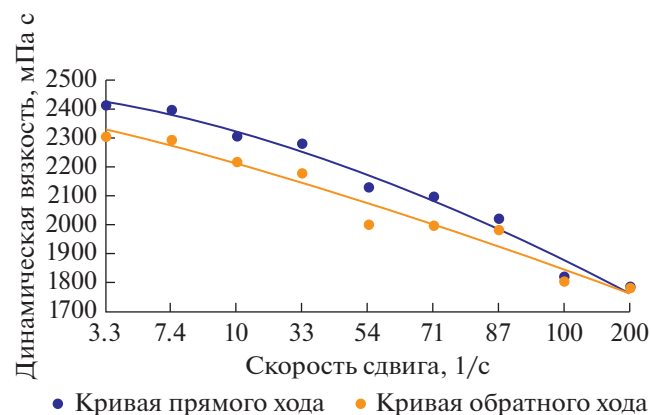
На рис. 2 показаны реологические кривые прямого и обратного хода после УЗ-обработки образца с удельной мощностью $P_V = 200$ Вт/л в течение $\tau = 10$ мин.

Полученные зависимости динамической вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига показали, что после УЗ-обработки изменяется ход реологических кривых, а также снижается вязкость исследуемых проб.

На рис. 3 приведена зависимость эффективной вязкости проб нефти от времени сонохимической обработки. УЗ-обработка пробы нефти проводилась с удельной мощностью $P_V = 200$ Вт/л в течение $\tau = 10$ мин. Реагентная обработка проводилась депрессорной присадкой Flexoil CW288 с концентрацией 0.025 мас. %.

Комбинированная обработка нефти ультразвуком и присадками позволяет эффективно снизить температуру застывания Ашальчинской нефти (рис. 4–5).

Как видно из рис. 4, УЗ-обработка пробы нефти в течение 15 мин снижает температуру застыва-

**Рис. 1.** Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для образца нефти Ашальчинского месторождения (при $t = 20^\circ\text{C}$).**Рис. 2.** Реологические кривые прямого и обратного хода после УЗ-обработки образца нефти ($P_V = 200$ Вт/л, $\tau = 10$ мин).

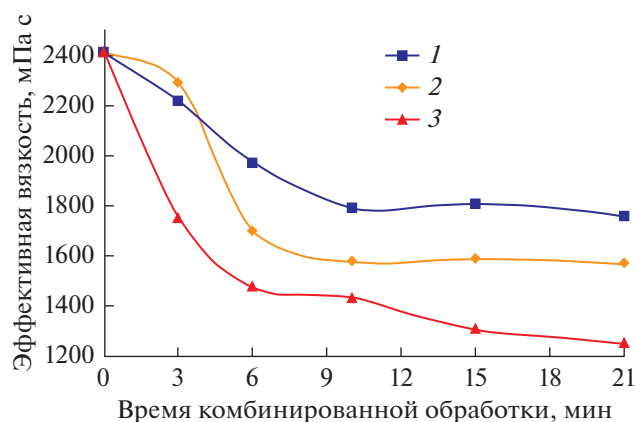


Рис. 3. Зависимость эффективной вязкости проб нефти от времени комбинированной обработки: 1 – УЗ-обработка ($P_V = 200$ Вт/л, $\tau = 10$ мин), 2 – реагентная обработка (присадка 0.025 мас. %), перемешивание мешалкой, 3 – комбинированная обработка ($P_V = 200$ Вт/л, $\tau = 10$ мин, присадка 0.025 мас. %).

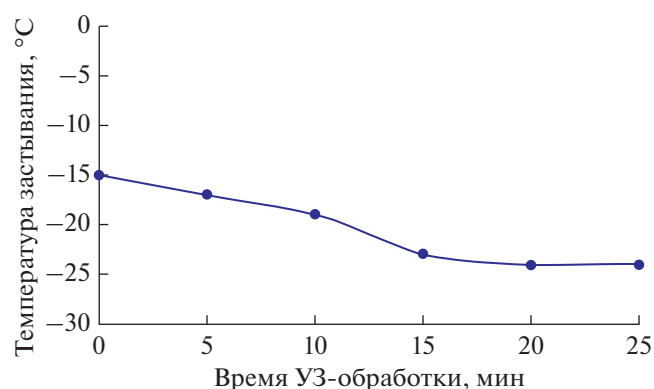


Рис. 4. Зависимости температуры застывания нефти от времени УЗ-обработки.

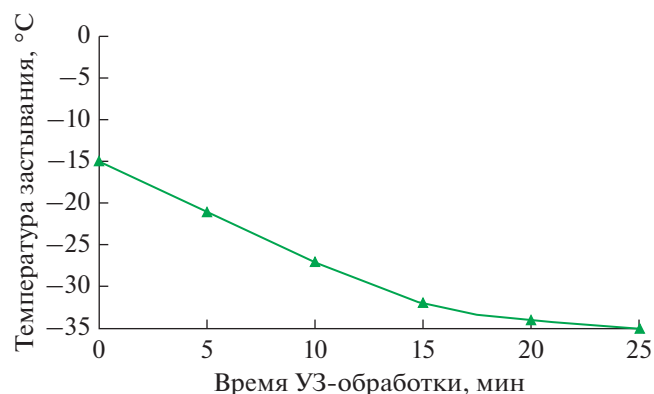


Рис. 5. Зависимости температуры застывания нефти от времени комбинированной УЗ-обработки.

ния на 8°C, а обработка более 15 мин неэффективна, так как значение температуры застывания снижается незначительно, а потери УЗ-энергии увеличиваются. Поэтому во всех последующих экспериментах УЗ-обработка проб нефти составляла не более 15 мин.

Зависимость температуры застывания нефти от времени комбинированной обработки приведена на рис. 5.

Перед введением присадки в пробу нефть изначально прогревали до 50°C и затем проводили термостатирование. В результате рациональные режимные параметры УЗ-обработки, при которой температура застывания уменьшалась в 2.3 раза, следующие: удельная мощность $P_V = 200$ Вт/л, время $\tau = 15$ мин, концентрация присадки 0.025 мас. %.

Была исследована зависимость динамической вязкости от времени хранения пробы нефти после ее комбинированной обработки (рис. 6). Как видно из рис. 6, нефть после УЗ-обработки восстанавливает прежнее значение вязкости примерно через 10 ч. Нефть, после введения присадки 0.025 мас. %, через 10 ч восстанавливает примерно 20% от достигнутого снижения вязкости и значение вязкости стабилизируются около значения 1880 мПа·с. Наиболее эффективна сонохимическая обработка пробы нефти ($P_V = 200$ Вт/л, $\tau = 15$ мин, присадка 0.025 мас. %), когда после 30 ч значение вязкости стабилизируются около значения 1480 мПа·с, восстанавливая 18% от достигнутого снижения вязкости.

Эти результаты хорошо согласуются с механизмом сонохимического воздействия на нефтяные дисперсные системы, описанным в работах [2, 18, 35], когда совместное применение реагентов и УЗ-воздействия более эффективно за счет того, что при УЗ-воздействии химические реагенты равномерно распределяются по всему объему и препятствуют обратному восстановлению надмолекулярных образований.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДУЛЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОУПРУГИХ СВОЙСТВ НЕФТИ И ЕГО ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

На основе полученных результатов разработан опытно-промышленный УЗ-модуль регулирования вязкоупругих свойств высоковязкой нефти для ее транспортировки по нефтепроводу за счет снижения вязкоупругих параметров (рис. 7).

УЗ-модуль представляет собой блок, смонтированный на базе трубы диаметром 530 мм и толщиной 10 мм, состоящий из смесительной камеры и блока УЗ-воздействия на нефть, в проточном режиме при давлениях до 5 атм и температурах до 90°C. В состав УЗ-модуля входят следующие ос-

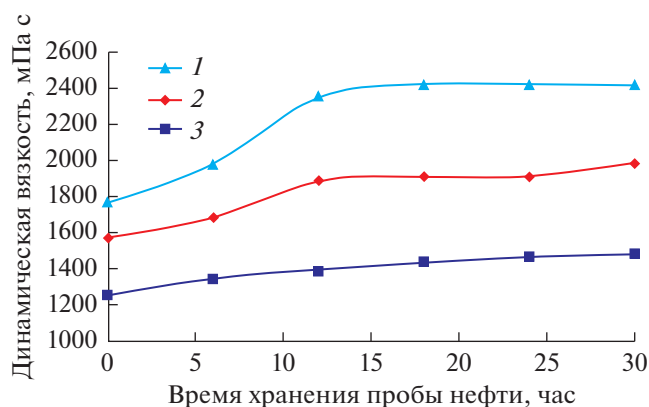


Рис. 6. Зависимости эффективной вязкости от времени хранения пробы нефти: 1 – после УЗ-обработки ($P_V = 200$ Вт/л, $\tau = 15$ мин), 2 – реагентная обработка (присадка 0.025 мас. %), 3 – комбинированная обработка ($P_V = 200$ Вт/л, $\tau = 15$ мин, присадка 0.025 мас. %).

новные узлы и системы: блок УЗ-воздействия на нефть, включающий двухканальный УЗ-генератор (3), два магнестрикционных преобразователя мощностью 2 кВт, работающие на резонансной частоте 22.1 кГц (4), соединенных с волноводно-излучающей системой (5), штуцер для отбора проб, измерения температуры, газосброса и слива нефти во входной смесительной камере (1). Используются волноводы-излучатели двух типов: “обратный конус” и “конус с полым обратным конусом-чаша” (рис. 8). Первый тип волновода позволяет увеличить площадь поверхности излучения и тем самым повышает его эффективность, а второй тип – концентрировать излучение в локальной области в форме цилиндра.

Опытно-промышленные испытания установки проводили на площадке ПАО “Татнефть” при транспортировке высоковязкой нефти Ашальчинского месторождения (табл. 1) в проточном

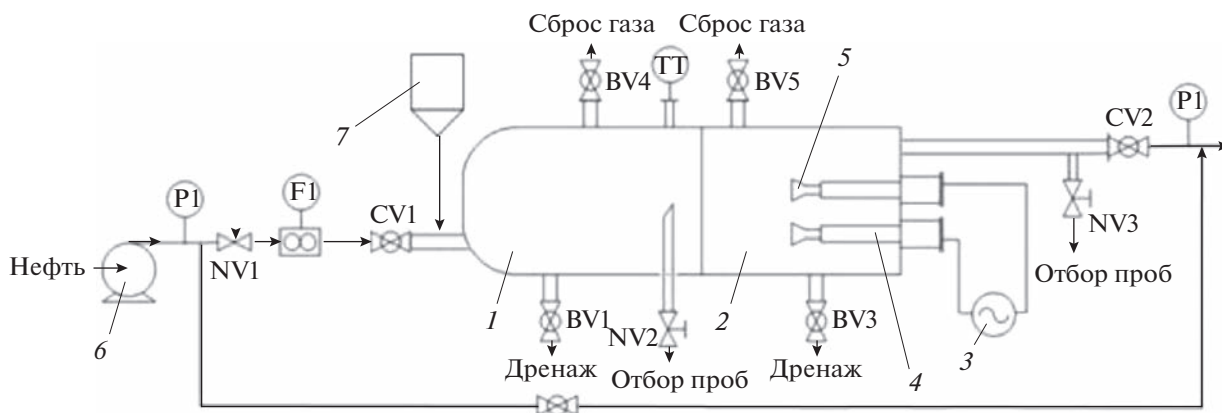


Рис. 7. УЗ-модуль: 1 – смесевая камера, 2 – УЗ-реактор, 3 – УЗ-генератор, 4 – магнестрикционный преобразователь, 5 – волноводно-излучающая система, 6 – насос, 7 – емкость реагента, BV1–BV5 – краны, NV1–NV3 – игольчатые вентили, GV1–GV2 – клапана.

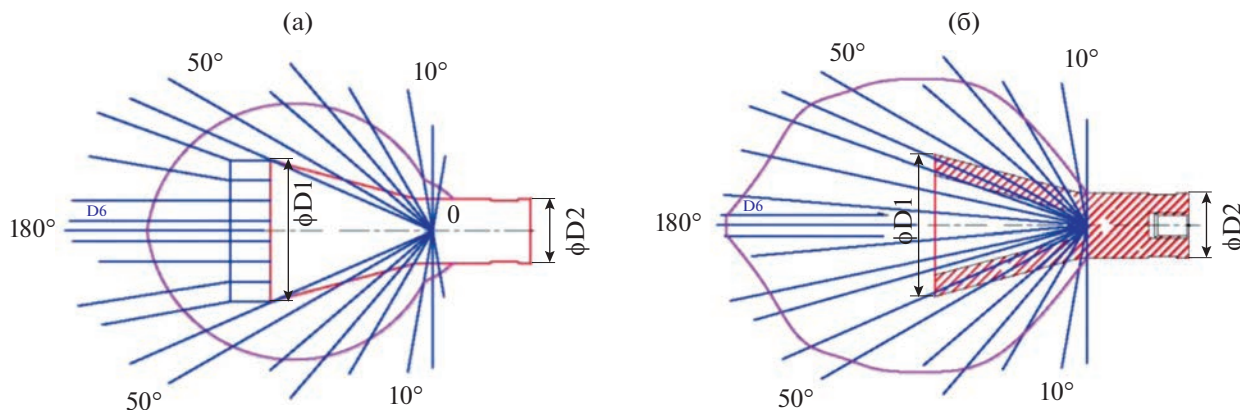


Рис. 8. Диаграммы излучения волноводов-излучателей: (а) – обратный конус, (б) – с полым обратным конусом.

Таблица 2. Режимные параметры УЗ-обработки

Режимные параметры	Значение
Объемный расход нефти, м ³ /ч	2–4
Температура нефти до УЗ-обработки, °С	20–30
Температура нефти после УЗ-обработки, °С	40–45
Давление в камере, атм	2–5
Плотность УЗ-мощности, Вт/л	150–200
Резонансная частота УЗ-обработки, кГц	24.3 ± 1.6

режиме. В табл. 2 приведены режимные параметры УЗ-обработки высоковязкой нефти.

Для проведения опытно-промышленных испытаний установка монтировалась на байпасной линии к нефтепроводу, начальное давление которого составляла 2.89 МПа. При введении присадки в нефть в количестве 0.025 мас. % и УЗ-обработки в течение 10 ч давление снизилось до 2.40 МПа (на 17%), затем концентрацию присадки увеличили до 0.035 мас. % (200 г/т), и через 24 ч давление снизилось до 1.86 МПа (на 40%). Снижение давления в трубопроводе связано с уменьшением вязкости нефти, благодаря чему ее сопротивление перекачке снижается. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что УЗ-технология позволяет снизить: динамическую вязкость нефти на 35–40%, а температуру застывания нефти на 18–20°С; давление в трубопроводе на 24%; расход реагента в 1.5–2 раза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ литературы [6–11] показал, что существует низкочастотный вязкоупругий релаксационный процесс, обусловленный коллективными взаимодействиями больших групп молекул (ассоциатов, мицелл), причем время их релаксации может на много порядков превышать время оседлого существования отдельных молекул.

2. Высоковязкие нефтяные дисперсные системы со временем структурируются: дисперсные частицы за счет Ван-дер-Ваальсовских сил образуют упругую решетку коагуляционного типа, заполненную дисперсной фазой, а УЗ-воздействие разрывает эти связи, что и приводит к значительному снижению вязкоупругих свойств нефтяных дисперсных систем. После прекращения УЗ-воздействия дисперсные частицы стремятся восстановить гибкую решетку за счет броуновского движения, но этот процесс можно стабилизировать введением реагентов в УЗ-поле.

3. Экспериментальные исследования показали, что УЗ-воздействие на высоковязкую нефть Ашальчинского месторождения позволяют снизить ее эффективную вязкость на 35–40%, температуру застывания на 15–20°С.

4. Результаты опытно-промышленных испытаний разработанного УЗ-модуля показали, что УЗ-технология позволяет: снизить вязкость нефти на 25–30%, температуру застывания на 15–20°С; снизить давление в трубопроводе на 17–40%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syunyaev R.Z., Safieva R.Z., Safin R.R. The influence of the internal structure and dispersity to structural-mechanical properties of oil systems // J. Pet. Sci. Eng. 2000. V. 26. P. 31–39.
2. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и переработки нефтешламов. М.: НИИ ИЭП, 2019. 412 с.
3. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Муллакаев М.С., Артемьев В.В. Анализ эффективности передачи ультразвуковых колебаний в нагрузку // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 6. С. 828–844.
4. Che X., Che Y., Huan Y., Bai Y., Hu D., Feic S. Study of thermoviscous dissipation on axisymmetric wave propagating in a shear pipeline flow confined by rigid wall. Part II. Numerical Study // Acoust. Phys. 2016. V. 62. № 2. P. 143–150.
5. Ахметов Б.Р., Вахин А.В. О некоторых особенностях затухания ультразвука в суспензиях высокомолекулярных компонентов нефти // Акуст. журн. 2018. Т. 64. С. 566–571.
6. Бадмаев Б.Б., Дамдинов Б.Б. Исследование вязкоупругих свойств органических жидкостей акустическим методом // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 487–489.
7. Бадмаев Б.Б., Бальжинов С.А., Дамдинов Б.Б., Дембелова Т.С. Низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 5. С. 602–605.
8. Макарова Д.Н., Дембелова Т.С., Бадмаев Б.Д. Низкочастотная сдвиговая упругость коллоидной суспензии наночастиц // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 6. С. 610–612.
9. Миронов М.А., Шеломихина И.А., Зозуля О.М., Есипов И.Б. Медленная кинетика вязкоупругих свойств нефти при низкочастотных сдвиговых колебаниях // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 1. С. 132–140.
10. Есипов И.Б., Зозуля О.М., Миронов М.А. Медленная кинетика нелинейности вязкоупругих свойств нефти при сдвиговых колебаниях. // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 2. С. 166–172.
11. Qiang H. Experimental studies on viscosity reduction of heavy crude oil by ultrasonic irradiation // Acoust. Phys. 2020. V. 66. № 5. P. 495–500.
12. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A. Effect of ultrasonic oscillations on the fluidity of heavy oil products at low temperatures // Acoust. Phys. 2010. V. 56. № 5. P. 734–738.
13. Mousavi S.M., Ramazani A., Najafi I., Davachi S.M. Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltic crude oils // Pet. Sci. 2012. V. 9. Iss. 1. P. 82–88.
14. Hamidi H., Mohammadian E., Junin R., Rafati R., Azdarpour A., Junid M. The effect of ultrasonic waves

- on oil viscosity // *Pet. Sci. Technol.* 2014. V. 32. Iss. 19. P. 2387–2395.
15. *Lionetto F., Coluccia G., D'Antona P., Maffezzoli A.* Gelation of waxy crude oils by ultrasonic and dynamic mechanical analysis // *Rheologica Acta*. 2007. V. 46. P. 601.
 16. *Hamidi H., Mohammadian E., Junin R., Rafati R., Manan M., Azdarpour A., Junid M.* A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium // *Ultrasonics*. 2013. V. 54. P. 423–432.
 17. *Волкова Г.И., Прозорова И.В., Ануфриев Р.В., Юдина Н.В., Муллакаев М.С., Абрамов В.О.* Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения вязкостно-температурных характеристик // *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2012. № 2. С. 3–6.
 18. *Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M.* Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2015. V. 49. P. 287–296.
 19. *Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Салтыков Ю.А., Ануфриев Р.В., Волкова Г.И.* Влияние условий ультразвуковой обработки на свойства парафинистой нефти // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2012. № 12. С. 18–21.
 20. *Tukhvatullina A.Z., Barskaya E.E., Kouryakov V.N., Ganeeva Y.M., Yusupova T.N.* Supramolecular structures of oil systems as the key to regulation of oil behavior. *J. Pet. Environ Biotechnol.* 2013. V. 4. № 4. 152. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000152>
 21. *Омароалиев Т.О., Алимбаев К.Р., Сарсенбаева А.У., Нуридинова У.* // *Материалы IV междунар. конф. "Химия нефти и газа"*. Томск. 2000. Т. 1. С. 433.
 22. *Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V.* Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of paraffinic high-pitch oil // *Petrol. Chem.* 2016. V. 56. P. 454–460.
 23. *Maye P.E.E., Jingyi Y., Taoyan Y., Xinru X.* Study on the modification of vacuum residue by ultrasonic radiation // *China Pet. Process. Petrochemical Technol.* 2017. V. 19. P. 114–122.
 24. *Kaushik P., Kumar A., Bhaskar T., Sharma Y.K.* Ultrasound cavitation technique for up-gradation of vacuum residue // *Fuel Process. Technol.* 2012. V. 93. P. 73–77.
 25. *Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Волкова Г.И., Прозорова И.В., Юдина Н.В.* Исследование влияния ультразвукового воздействия и химических реагентов на реологические свойства вязких нефтей // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2010. № 5. С. 31–34.
 26. *Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Градов О.М., Новоторцев В.М., Еременко И.Л.* Исследование воздействия ультразвуковой обработки и химических реагентов на реологические свойства нефти Лузановского месторождения // *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2011. № 11. С. 23–28.
 27. *Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Асылбаев Д.Ф., Прачкин В.Г.* Исследование комбинированного воздействия ультразвука и химических реагентов на реологические свойства нефти Боровского месторождения // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2013. № 5. С. 34–36.
 28. *Ershov M.A., Baranov D.A., Mullakaev M.S., Abramov V.O.* Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field // *Chem. Pet. Eng.* 2011. V. 47. Iss. 7–8. P. 457–461.
 29. *Mullakaev M.S., Asylbaev D.F., Prachkin V.G., Volkova G.I.* Influence of Ultrasound and Heat Treatment on the Rheological Properties of Ust-Tegusskoe Oil // *Chem. Pet. Eng.* 2014. V. 47. P. 584–587.
 30. *Kemalov R.A., Kemalov A.F., Valiev D.Z.* Thermodynamics of activation of a viscous current and structural dynamic analysis high-viscosity oil at ultrasonic influence // *Oil industry*. 2012. № 12. P. 2–5.
 31. *Frolov I.N., Bashkirceva N.Y., Firsin A.A., Ziganshin M.A., Okhotnikova E.S.* The steric hardening and structuring of paraffinic hydrocarbons in bitumen // *Pet. Sci. Technol.* 2016. V. 34. № 20. P. 1675–1680.
 32. *Safiulina A.G., Soldatova R.R., Bashkirtseva N.Y., Ibragimova D.A., Baibekova L.R., Petrov S.M.* Modeling of paraffin wax deposition process in poorly extractable hydrocarbon stock // *Chem. Tech. Fuels Oils*. 2018. V. 53. № 6. P. 897–904.
 33. *Закиров А.И., Каримов А.И., Пшенин В.В.* Исследование реологических свойств битуминозной нефти Ашальчинского месторождения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № 10. С. 382–389.
 34. *Kontopoulou M.* Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. New Jersey, 2012. P. 357.
 35. *Abramov V.O., Abramova A.V., Bayazitov V.M., Mullakaev M.S., Marnosov A.V., Ildiyakov A.V.* Acoustic and sonochemical methods for altering the viscosity of oil during recovery and pipeline transportation // *Ultrason. Sonochem.* 2017. V. 35. P. 389–396.