



## СОНОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

М. С. Муллакаев\*<sup>1,2</sup>, Р. М. Муллакаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова  
Российской академии наук, Москва, Россия

### Sonochemical transportation technology high viscous oil

M. S. Mullakaev\*<sup>1,2</sup>, R. M. Mullakaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

#### ABSTRACT

The work is devoted to one of the urgent problems of the oil and gas complex - the transportation of high-viscosity oils. The object of the study was the high-viscosity high-sulphur mixed oil of the Ashalchinskoye field. The sonochemical treatment of oil made it possible to reduce the effective viscosity by 35-40% and the pour point by 15-20 °C. Pilot tests of the developed unit and sonochemical technology have shown the possibility of reducing the load on pumping stations of main pipelines, reducing the number of hot oil pumping stations, and reducing the amount of emissions of organic sulfur compounds into the atmosphere.

**Keywords:** high-viscosity oil; petroleum dispersed systems; ultrasound; pour point depressants; sonochemical effect; effective viscosity; pour point.

© 2023 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

#### Введение

Как известно структура запасов нефти ухудшается, так как большую долю составляют трудноизвлекаемые, битуминозные, высоковязкие нефти (ВВН) высокозастывающие нефти (ВЗН), которые создают проблемы не только при добыче, но и при их транспортировке и переработке [1]. Проблемы при транспортировке таких нефтей в основном связаны с их аномально высокой вязкостью, выпадением асфальтосмолопарафинистых отложений (АСПО). На сегодняшний день при добыче и транспортировке ВВН доминирующим методами являются тепловые. Но в последние десятилетия делаются серьёзные попытки использовать при добыче и транспортировке ВВН различные физические поля: магнитные, электромагнитные, акустические, причем наиболее перспективные в ультразвуковом (УЗ) диапазоне [2, 3].

Согласно современным представлениям [4, 5] в нефтяных дисперсных системах (НДС), образуются дисперсные частицы сложного строения на основе агрегатов асфальтенов, способные к самостоятельному существованию - сложные структурные единицы (ССЕ). ССЕ – это элементарная составляющая агрегативных комбинаций, в ее составе различают более упорядоченную внутреннюю область, образованную высокомолекулярными компонентами нефти (асфальтенами, парафинами) – ядро – и

сольватную оболочку, окружающую ядро, состоящую из смол. Дисперсионная среда в данной модели представлена углеводородной частью нефтяных объектов, включающей насыщенные и ароматические углеводороды.

УЗ-обработка ВВН приводит к разрушению надмолекулярных образований, связанных друг с другом Ван-дер-Ваальсовскими связями, диспергируют парафины (n-алканы), что значительно снижает скорость их осаждения на стенках трубопроводов, что способствует повышению эффективности перекачивания ВВН. После прекращения УЗ-обработки ВВН, начинаются процессы обратного «структурирования» НДС, которое можно остановить введением небольшого количества депрессорной присадки в УЗ-поле. Акустические течения, возникающие в НДС, перемешивают присадки на микроуровне, и не дают обратное построение надмолекулярных образований [3].

Изменение вязкости нефти при волновом воздействии становится возможным вследствие разрушения/ослабления высокомолекулярных компонентов и надмолекулярных структур нефти (наноагрегатов, кластеров или сложных структурных единиц на их основе). Главной причиной высокой вязкости нефти является высокое содержание смолисто-асфальтеновых компонентов (САК) в ее составе, обладающих высокой молекулярной массой и полярностью вследствие наличия гетероатомов в составе молекул. При этом молекулы асфальтенов, главным образом, за счёт взаимодействия π-систем конденса-

\*E-mail: [mullakaev@mail.ru](mailto:mullakaev@mail.ru)

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20230100816>

рованных бензольных колец образуют агрегаты молекул, которые в свою очередь могут образовывать кластеры или фрактальные агрегаты с размером более 100 нм.

Помимо этого, высокомолекулярные насыщенные углеводороды (парафины) со своей квазисферической формой при даже не очень низких температурах образуют кристаллические решётки. Подобная структура содержит ячейки, в которых заключена жидкая фаза и, таким образом, у нефти растёт вязкость.

Цель работы – разработка технологии транспортировки ВВН и ВЗН комбинированным воздействием ультразвуком и депрессорными присадками за счёт снижения ее вязкости и температуры застывания.

На Ашальчинском месторождении нефть добывается технологией парогравитационного воздействия на пласт. Нефть обладает высокой вязкостью и плотностью и относится к битуминозному типу, практически отсутствуют лёгкие бензиновые и керосиновые фракции, в составе которой преобладают разветвлённые алканы над нормальными с содержанием нафтенов до 60%. В нефти содержание дизельной фракции (200-350 °С) достигает 25%, широкой масляной фракции (350-450 °С) – 22%. Выход мазута может достигать до 78% и гудрона до 34% [6].

После подъема нефти, вследствие разности давления и температуры в пласте и на поверхности, она превращается в жидкость со сложными реологическими свойствами, вследствие оседания смол и парафинов. Поэтому для перекачки нефти по трубопроводу требуется разработка инновационных, энерго- и ресурсосберегающих технологий, позволяющих снизить ее вязкость и температуру застывания.

В работах [7-9] изучены фракционный, компонентный, структурно-групповой, углеводородный состав Ашальчинской нефти и её фракций. Для данной нефти характерно высокое содержание алканов изопреноидного строения в топливных фракциях, а также доминирование высокомолекулярных алканов и полициклических насыщенных структур в масляных фракциях.

Свойства образцов битуминозной Ашальчинской нефти в диапазоне температур от 5 до 60 °С изучены в работах [10, 11]. Показано, что битуминозная нефть начинает проявлять неньютоновские свойства при температуре меньше 30 °С. В неньютоновской области течения битуминозная нефть Ашальчинского месторождения с высокой степенью точности описывается уравнением Карро [12].

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

где  $\mu_0$  – наибольшая вязкость практически неразрушенной структуры, Па·с;  $\mu_{\infty}$  – наименьшая вязкость предельно разрушенной структуры, Па·с;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>;  $n$  – показатель нелинейности реологической кривой  $\mu(\dot{\gamma})$ ;  $\lambda$  – время релаксации, с.

В ПАО «Татнефть» [13] активно внедряются комбинированные технологии (включая волновые) и их комбинации для интенсификации переработки ВВН и природных битумов, которые реализованы в реакторе «ЯРУС» для получения синтетических нефтей без предварительной подготовки сырья. При этом выход светлых фракций увеличивается до 70%, снижается плотность и вязкость синтетической нефти, облегчается транспортировка нефти по трубопроводу. Исследованиями в работе [14] установлено, что использование интегрированных

технологий при переработке тяжелой Ашальчинской нефти с применением аппаратов кавитационно-акустического воздействия позволяют довести выход бензиново-дизельной фракции до 60-70%.

Транспортировка нефти – это сложный технологический процесс, зависящий от многих факторов: географического расположения трубопровода, физико-химических свойств смешиваемых нефтей, режимы подогрева, использование химических реагентов и т.д. Используемые в настоящее время депрессорные присадки обладают рядом недостатков: недостаточно универсальны, для каждой нефти надо подбирать индивидуально; дороги как в производстве, так и в использовании, часто недостаточно эффективны при изменении внешних условий. Поэтому разработка универсальных присадок, которые могли бы регулировать структурно-механический и вязкостно-температурные свойства нефтей остаётся достаточно актуальной.

Перспективно направление их комбинированного использования совместно с различными физическими полями, в частности с ультразвуковыми, что позволило бы устранить ряд их недостатков при транспортировке ВВН. Авторы в работах [15-17] приводят результаты работ комплексной обработки нефтей с различным компонентным составом и физико-механическими свойствами, которые позволили снизить их температуру застывания и вязкость, за счёт рациональных режимных параметров обработки ультразвуком и реагентами, а также синергетику их комбинированного воздействия. В работе [2] для перекачки тяжелых нефтей предлагается гидродинамический кавитационный модуль, различные конструкции УЗ-модулей для интенсификации перекачки ВВН описаны в [18], экономическая обоснованность использования ультразвука в процессах транспортировки ВВН приведено в работе [19].

### Аппаратура и методика измерений

*Депрессорная присадка.* На основе анализа литературных данных в качестве депрессорной присадки была выбрана Flexoil CW288 (плотность  $\rho = 935$  кг/м<sup>3</sup>, температура застывания  $T_z = -40$  °С) производства ООО «Мастер Кемикалз». Перед введением присадки в пробу нефти, ее изначально нагревали до температуры 50 °С, а затем проводили термостатирование [20].

*Аппаратура и методика измерения вязкости.* Динамическую вязкость (мПа·с) 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 [21]:

$$\mu_{ef} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

где  $\mu_{ef}$  – эффективная вязкость, Па·с;  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, 1/с.

*Аппаратура и методика сонохимической обработки.* Порционная обработка 200-300 мл нефти проводилась в стальном реакторе, в том числе с введёнными реагентами при температуре 50 °С, использование преобразо-

вателя МСП 2/22, соединённого с генератором УЗГ-2М мощностью 2 кВт. Упругие колебания в жидкофазную нагрузку вводились с помощью стержневого волновода с диаметром рабочего торца 30 мм, амплитуда колебаний излучателя составляла 5-10 мкм при частоте 22 кГц. До начала УЗ-обработки и после ее окончания осуществлялось термостатирование указанной пробы в течение 30 мин при температуре 20 °С. При сонохимическом воздействии вначале добавлялся химический реагент, а затем образец нефти подвергался УЗ-воздействию. Вязкость образцов контролировали после УЗ-обработки в течение суток через каждые 6 часов.

*Аппаратура и методика измерения температуры застывания.* Температуру застывания образцов определяли на приборе «ИНПН» (Кристалл). Обработка результатов измерения осуществляется встроенным микропроцессором, а текущая информация отображается на жидкокристаллическом дисплее. Точность измерения температуры пробы составляет  $\pm 0.2$  °С. Перед измерениями 300 г образца нефти, подвергали УЗ-обработке при следующих режимных параметрах: 200 Вт/л в течение 15-20 мин. и затем проводили измерения температуры застывания. При сонохимическом воздействии вначале добавлялся химический реагент, а затем образец нефти подвергался УЗ-воздействию.

### Лабораторные исследования

Лабораторные исследования проводили высоковязкой высокосернистой смесевой нефти Ашальчинского месторождения, характеристики которой приведены в таблице 1.

Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для смесевой нефти Ашальчинского месторождения приведена на рисунке 1. Как показали эксперименты,

для образцов нефти характерно почти полное отсутствие начального напряжения сдвига  $\tau_0$ .

На рисунке 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, которая приводит к увеличению энергии активации вязкого течения.

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 рисунке 3 приведена зависимость динамической 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 масс. %.

Динамическая вязкость нефти после сонохимической обработки снижается примерно на 35-40 %, причём сонохимическая обработка более эффективна, чем УЗ-обработка и реагентная обработка в отдельности.

Результаты экспериментов, представленные на рисунке 4 показывают, что комбинированная обработка ВВН ультразвуком и присадками позволяет эффективно снизить температуру застывания смесевой Ашальчинской нефти.

Как видно из рисунка 4а УЗ-обработка пробы нефти в течение 15 мин, снижает температуру застывания на 53%, а обработка более 15 мин неэффективна, так как значительная температура 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 кон-

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

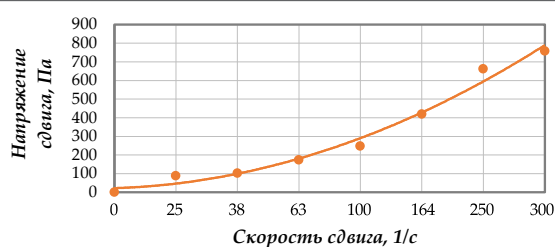


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для смесевой нефти Ашальчинского месторождения (при  $t = 20$  °С)

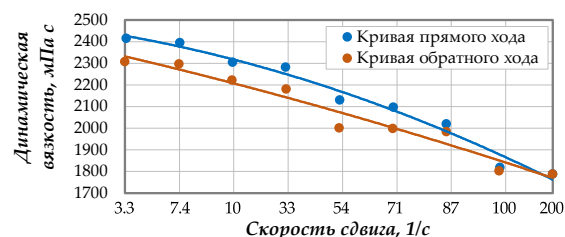


Рис. 2. Реологические кривые прямого и обратного хода после УЗ-обработки образца нефти ( $P_V = 200$  Вт/л,  $\tau = 10$  мин)

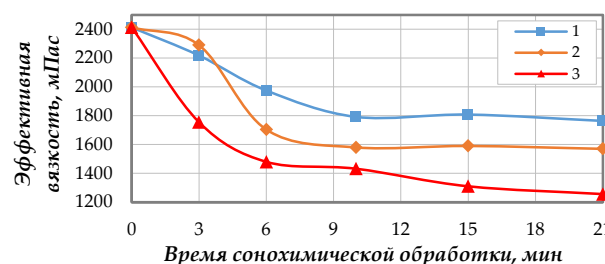


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости проб нефти от времени сонохимической обработки: 1 – УЗ-обработка ( $P_V = 200$  Вт/л,  $\tau = 10$  мин); 2 – реагентная обработка (присадка 0.025 масс. %), перемешивание мешалкой; 3 – сонохимическая обработка ( $P_V = 200$  Вт/л,  $\tau = 10$  мин, присадка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

центрации введённой присадки приведена на рисунке 4б. Введение присадки с концентрацией 0.025 масс.% снижает температуру застывания нефти на 67%. Хотя дозировка присадки 0.04 масс.% снижает температуру застывания более чем два раза, но при этом сильно ухудшаются экономические показатели технологии, вследствие дорогой стоимости присадки. Поэтому во всех последующих экспериментах использовали присадку с концентрацией 0.025 масс.%

Зависимости температуры застывания нефти от времени сонохимической обработки приведена на рисунке 4в. Перед введением присадки в пробу нефть изначально прогревали до 50 °С и затем проводили термостатирование. В результате рациональные режимные параметры сонохимической обработки, при которой температура застывания уменьшалась в 2.3 раза, следующе:

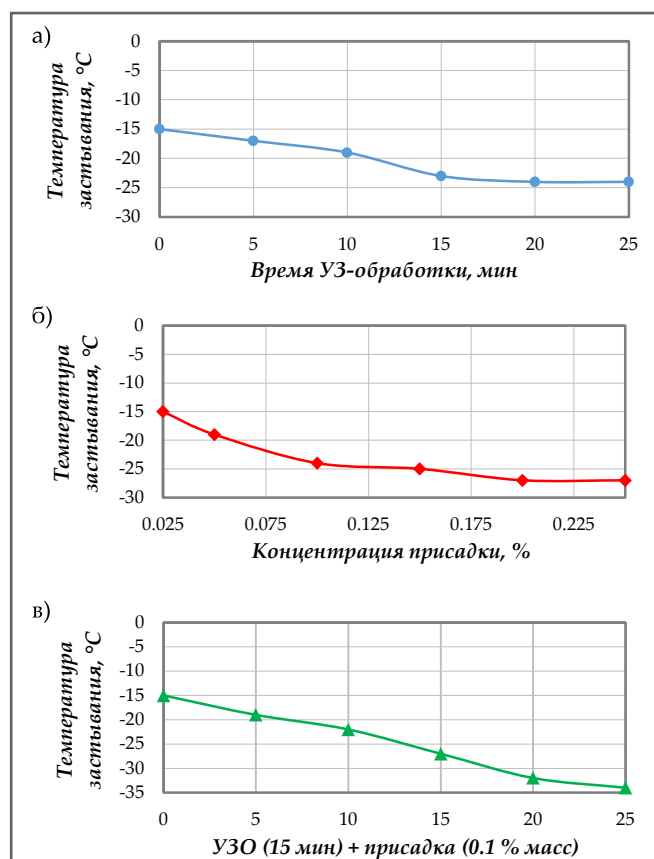


Рис. 4. Зависимость температуры застывания нефти от: а) времени УЗ-обработки, б) концентрации введённой присадки и в) времени сонохимической обработки

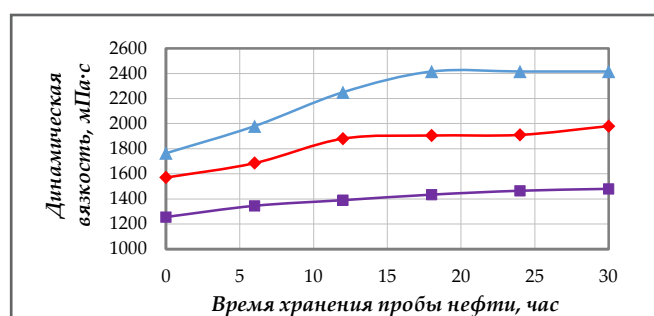


Рис. 5. Зависимости динамической вязкости от времени хранения пробы нефти: 1 – после УЗ-обработки ( $P_V=200$  Вт/л,  $\tau=15$  мин); 2 – реагентная обработка (присадка 0.025 масс.%); 3 – сонохимическая обработка ( $P_V=200$  Вт/л,  $\tau=15$  мин, присадка 0.025 масс.%)

щие: УЗ-обработка с удельной мощностью  $P_V=200$  Вт/л, время  $\tau=15$  мин, концентрация присадки 0.025 масс.%.

Важной задачей применения депрессорных присадок при транспортировке нефти является увеличение продолжительности простоя нефтепровода при его плановых остановках на ремонтные работы. С этой целью была исследована зависимости динамической вязкости от времени хранения пробы нефти после его сонохимической обработки. Как видно из рисунка 5, нефть после УЗ-обработки восстанавливает прежнее значение вязкости примерно через 10 часов. Нефть, после введения присадки 0.025 масс.% через 10 часов 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 масс.%), когда после 30 часов значение вязкости стабилизируются около значения 1480 мПа·с восстанавливая 18% от достигнутого снижения вязкости. Эти результаты хорошо согласуются с механизмом сонохимического воздействия на НДС, описанные в работе [3, 16], когда совместное применение реагентов и УЗ-воздействия более эффективно, когда за счёт УЗ воздействия химические реагенты равномерно распределяются по всему объёму и препятствуют обратному построению надмолекулярных образований.

#### Механизм сонохимического воздействия на нефтяные дисперсные системы

Основными механизмами снижения вязкости нефти при ее УЗ-обработке являются:

а) *Тепловой эффект*, связанный с выделением тепла и увеличением температуры среды. Повышение температуры ВВН нефти способствует: увеличению скорости броуновского движения молекул в НДС, а, следовательно, переводу НДС из устойчивого состояния в кинетически неустойчивую систему; ослаблению межмолекулярного взаимодействия, уменьшению размеров наноагрегатов и, как следствие, снижению вязкости нефти.

б) *Кавитационное воздействие*. В результате обработки в кавитационном режиме происходит образование и схлопывание пузырьков газа в жидкой среде, что сопровождается локальным увеличением температуры и давления и образованием большого количества ударных волн. Результатом этого, при обработке высокой степени интенсивности, является интенсификация процессов тепла- и массопереноса, разложение высокоплавких высокомолекулярных парафинов и разрушение агрегатов асфальтенов, вследствие чего изменяются физико-химические свойства нефти. Также кавитационные эффекты препятствуют объединению поляризованных ассоциатов в крупные структуры, диспергируя их на более мелкие группы молекул.

в) *Сонохимическое воздействие*. В работах [3, 16] проведён оценочный расчет изменения вязкости нефти после УЗ-воздействия. УЗ-воздействие на НДС способно за счёт нелинейных акустических эффектов (ударные волны, радиационное давление, акустические течения, кавитация и др.), разрушить как первичные слоистопачечные ассоциаты, так вторичные надмолекулярные образования – мицеллы. Проведённые в работах [3, 16] эксперименты по оценке размеров ассоциатов до и после УЗ-обработки нефти Лузановского месторождения на

лазерном фотонном корреляционном спектрометре при разбавлении н-гексаном (1:100), показали, что разбавление нефти н-гексаном приводит к снижению средних радиусов, образующихся ассоциатов до 250...470 нм (в 1.5 раза), а дополнительная УЗ-обработка – до 150...260 нм (в 2 раза). Но нефть в течение суток после УЗ-обработки восстанавливает прежнее значение вязкости, что объясняется обратным построением надмолекулярных образований. В то же время сонохимическое воздействия более эффективно, когда за счёт УЗ-воздействия химические реагенты равномерно распределяются по всему объёму и препятствуют обратному построению надмолекулярных образований.

**Опытно-промышленные испытания сонохимической технологии**

В основу разработки опытно-промышленной технологии сонохимической транспортировки ВВН положены результаты экспериментальных исследований влияния УЗ-воздействия на нефти различного группового состава и физико-химических свойств при различных режимных и технологических параметрах [15-18]. На базе полученных результатов была спроектирована и разработана опытно-промышленная установка сонохимической обработки ВВН для ее для транспортировки в полевых условиях за счёт снижения вязкости и температуры застывания, технологическая схема которой представлена на рисунке 6.

Установка представляет собой модульный блок, смонтированный на базе трубы диаметром 530 мм и толщиной 10 мм, состоящий из смесительной камеры и блока УЗ-воздействия на нефть, рассчитанная на работу в проточном режиме при давлениях до 5 атм. и температурах до 90 °С. В состав установки входят следующие основные узлы и системы: модуль УЗ-воздействия на нефть, включающий двухканальный УЗ-генератор (3), два магнито-стрикционных преобразователя ПМС-2.5 (4), соединённых с волноводно-излучающей системой (5), штуцер для отбора проб, измерения температуры, газосброса и слива нефти во входной смесительной камере (1).

Для введения УЗ-колебаний в НДС были использованы волноводы-излучатели двух типов: «обратный конус» и «конус с полым обратным конусом-чаша» (рис. 7), передающих УЗ-колебания от магнито-стрикционных преобразователей в обрабатываемую среду.

Нефть подаётся насосом (6) на вход смесительной камеры, для чего перекрываются краны на дренажных штуцерах камер BV1 и BV3 и открываются краны на штуцерах сброса газа BV4 и BV5, через которые вытесняется воздух в камерах. После заполнения ректора нефтью выставляются режимные параметры для УЗ-обработки

нефти. Открывается отсечной клапан на выходе из установки GV2 и устанавливается необходимый расход нефти с помощью игольчатого вентиля NV1 и контролируется при помощи расходомера FI, расположенного на трубопроводе перед входом в установку. Химический реагент подается из ёмкости 7 и регулируется с помощью дозировочного насоса.

Температура потока нефти контролируется посредством термопары (ТТ), установленной в специальной защитной гильзе, закреплённой посредством фланцевого соединения на штуцере, расположенном на выходе из УЗ-реактора. Расход нефти через установку регулируется посредством вентиля (NV1) и измеряется с помощью расходомера (FI). Давление в аппарате, контролируются посредством манометров (PI), установленных на входе и выходе из установки.

ОПИ установки и технологии проводили на площадке НГДУ «Нурлатнефть» (ПАО «Татнефть») при транспортировке высоковязкой высокосернистой нефти Ашальчинского месторождения (табл. 1) в проточном режиме. В таблице 2 приведены параметры трубопроводного участка, в таблице 3 – технологические режимы работы установки.

Для проведения ОПИ установка монтировалась на байпасной линии к нефтепроводу, начальное давление которого составляла 2.89 МПа. При введении присадки в нефть в количестве 0.025 масс.% и УЗ-обработки в течение 10 часов давление снизилось до 2.40 МПа (на 17%), затем концентрацию присадки увеличили до 0.035 масс.% 200 г/т, и через 24 часа давление снизилось до 1.86 МПа (на 40%). Снижение давления в трубопроводе связано с уменьшением вязкости нефти, благодаря чему её сопротивление перекачке снижается.

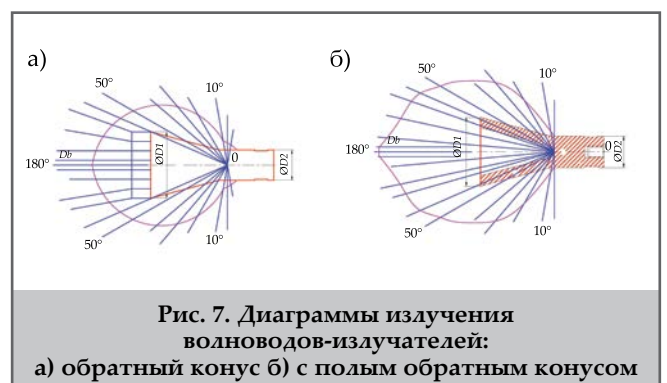
Результаты ОПИ показали, что сонохимическая технология позволяет снизить:

- динамическую вязкость нефти на 35-40%, а температуру застывания нефти на 18-20 °С;
- давление в трубопроводе на 24%;
- расход присадки в 1.5-2 раза.

Учитывая способность обработанной нефти сохранять низкую эффективную вязкость в течение суток, можно утверждать, что использование предлагаемой технологии позволит сократить количество тепловых станций, а также снизить мощность промежуточных насосных станций. Кроме того, нефть Ашальчинского месторождения высокосернистая (3-4.6 масс.%) и при ее «горячей» перекачке, происходит выброс большого количества органических соединений серы в атмосферу, что оказывает губительное воздействие на окружающую среду.



**Рис. 6. Технологическая схема установки**



**Рис. 7. Диаграммы излучения волноводов-излучателей: а) обратный конус б) с полым обратным конусом**

Таблица 2 Параметры трубопроводного участка	
Параметр	Значение
Протяжённость участка, км	27
Диаметр трубопровода, мм	530
Температура в начале участка, °С	40
Температура в конце участка, °С	24
Объёмный расход, м <sup>3</sup> /ч	377
Скорость потока нефти, м/с	0.228

Таблица 3 Технологические режимы работы установки	
Режимные параметры	Значение
Объёмный расход нефти, м <sup>3</sup> /ч	2-4
Температура нефти до УЗО, °С	20-30
Температура нефти после УЗО, °С	40-45
Давление в камере, атм	2-5
Интенсивность УЗО, Вт/см <sup>3</sup>	0.3-0.7
Резонансная частота УЗО, кГц	24.3 ±1.6

### Выводы

- Лабораторные исследования показали, что сонохимическое воздействие на ВВН Ашальчинского месторождения позволяет снизить ее эффективную вязкость на 35-40 %, температуру застывания на 15-20 °С.
- Результаты ОПИ показали, что сонохимическая технология позволяет:
  - снизить динамическую вязкость нефти на 25-30 %, а температуру замерзания на 15-18 °С;
  - в зависимости от режимных параметров обработки снизить давление в трубопроводе на 17-40 %.
- Учитывая способность обработанной нефти сохранять низкую эффективную вязкость в течение не менее суток, использование предлагаемой установки и технологии позволяет сократить количество станций «горячей» перекачки ВВН, а также снизить нагрузку насосных станций магистральных трубопроводов.
- Технико-экономическое обоснование технологии [19], показало:
  - простое аппаратное оформление сонохимических аппаратов, возможность их модульно-встраивания в существующие линии транспортировки нефти; низкие капитальные и операционные затраты на прокачку ВВН;
  - технология востребована при перекачке высокосернистой нефти, так как при «горячей» транспортировке, происходит выброс большого количества органических соединений серы в атмосферу, что губительно воздействует на окружающую среду.

### Литература

- (2021). Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов РФ в 2020 году. Москва: Министерство природных ресурсов и экологии РФ.
- Муллагаев, М. С. (2014). Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. Москва: ОАО «ВНИИОЭНГ».
- Mullakaev, M. S. (2018). Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. Moscow: HELRI.
- Сюняев, З. И., Сафиева, Р. З., Сюняев, Р. З. (1990). Нефтяные дисперсные системы. Москва: Химия.
- Syunyaev, R. Z., Safieva, R. Z., Safin, R. R. (2000). The influence of the internal structure and dispersity to structural-mechanical properties of oil systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 26, 31-39.
- Хайрудинов, Р. И. (2020). Особенности процесса неглубокого термолитиза и разработка технологии подготовки к транспортировке высоковязкой нефти. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа: УГНТУ.
- Frolov, I. N., Bashkirceva, N. Y., Firsin, A. A., et al. (2016). The steric hardening and structuring of paraffinic hydrocarbons in bitumen. *Petroleum Science and Technology*, 34(20), 1675-1680.
- Safiulina, A. G., Soldatova, R. R., Bashkirtseva, N. Y., et al. (2018). Modeling of paraffin wax deposition process in poorly extractable hydrocarbon stock. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 53(6), 897-904.
- Гуссамов, И. И., Петров, С. М., Ибрагимов, Д. А. и др. (2014). Компонентный и углеводородный состав битуминозной нефти Ашальчинского месторождения. *Вестник Казанского технологического университета*, 17(10), 207-211.
- Закиров, А. И., Каримов, А. И., Пшенин, В. В. (2015). Исследование реологических свойств битуминозной нефти Ашальчинского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 10, 382-389.
- Закиров, А. И. Обоснование режимов трубопроводного транспорта битуминозной нефти. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург: НМСУ «Горный».
- Kontopoulou, M. (2012). Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

13. Яруллин, Р. С., Угловский, С. Е., Зарифьянова, М. З., Вафина, С. Д. (2015). Интенсификация процессов переработки Ашальчинского природного битума с использованием импульсно-волнового реактора «ЯРУС». *Вестник технологического университета*, 18(14), 50-53.
14. Курочкин, А. К., Хазеев, Р. Р. (2015). Экспериментальный поиск перспективной технологии глубокой переработки Ашальчинской сверхвязкой нефти. *Сфера. Нефть. Газ*, 2, 52-72.
15. Abramov, O. V., Abramov, V. O., Mullakaev, M. S., Artemev, V. V. (2009). The efficiency of ultrasonic oscillations transfer into the load. *Acoustical Physics*, 55(6), 894-909.
16. Mullakaev, M. S., Volkova, G. I., 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.
17. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., et al. (2017). Acoustic and sonochemical methods for altering the viscosity of oil during recovery and pipeline transportation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35, 389-396.
18. Муллакаев, М. С., Муллакаев, Р. М., Волков, Г. И. (2020). Транспортировка высоковязкой нефти. *Neftegaz.RU*, 12, 64-70.
19. Муллакаев, М. С., Муллакаев, Р. М., Волков, Г. И. (2019). Техничко-экономическое обоснование сонохимической технологии транспортировки высоковязких нефтей. *Современная научная мысль*, 3, 222-231.
20. Матиев, К. И., Самедов, А. М., Ахмедов, Ф. М. (2021). Разработка депрессорных присадок для нефти и исследование их свойств. *SOCAR Proceedings*, 1, 90-96.
21. Ревель-Муроз, П. А., Бахтизин, Р. Н., Каримов, Р. М., Мастобаев, Б. Н. (2018). Совместная перекачка тяжелых и высокопарафинистых нефтей в смеси. *SOCAR Proceedings*, 2, 65-70.

### References

1. (2021). State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020». *Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation*.
2. Mullakaev, M. S. (2014). Ultrasonic intensification of oil production and processing. *Moscow: VNIIOENG*.
3. Mullakaev, M. S. (2018). Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. *Moscow: HELRI*.
4. Sunyaev, Z. I., Safieva, R. Z., Sunyaev, R. Z. (1990). Oil dispersed systems. *Moscow: Chemistry*.
5. Syunyaev, R. Z., Safieva, R. Z., Safin, R. R. (2000). The influence of the internal structure and dispersity to structural-mechanical properties of oil systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 26, 31-39.
6. Khairudinov, R. I. (2020). Features of the process of shallow thermolysis and development of technology for preparing high-viscosity oil for transportation. PhD Thesis. *Ufa: USPTU*.
7. Frolov, I. N., Bashkirceva, N. Y., Firsin, A. A., et al. (2016). The steric hardening and structuring of paraffinic hydrocarbons in bitumen. *Petroleum Science and Technology*, 34(20), 1675-1680.
8. Safiulina, A. G., Soldatova, R. R., Bashkirtseva, N. Y., et al. (2018). Modeling of paraffin wax deposition process in poorly extractable hydrocarbon stock. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 53(6), 897-904.
9. Gussamov, I. I., Petrov, S. M., Ibragimova, D. A., et al. (2014). Component and hydrocarbon composition of bituminous oil of the Ashalchinskoye field. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 17(10), 207-211.
10. Zakirov, A. I., Karimov, A. I., Pshenin, V. V. (2015). Study of the rheological properties of bituminous oil from the Ashalchinskoye field. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 10, 382-389.
11. Zakirov, A. I. (2016). Substantiation of modes of pipeline transport of bituminous oil. PhD Thesis. *Sankt-Peterburg: NMSU «Mountain»*.
12. Kontopoulou, M. (2012). Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications. *Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.*
13. Yarullin, R. S., Uglovsky, S. E., Zarifyanova, M. Z., Vafina, S. D. (2015). Intensification of Ashalchinskoye natural bitumen processing processes using the YARUS pulse-wave reactor. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, 18(14), 50-53.
14. Kurochkin, A. K., Khazeev, R. R. (2015). Experimental search for a promising technology for deep processing of Ashalchinskaya superviscous oil. *Sphere. Oil. Gas*, 2, 52-72.
15. Abramov, O. V., Abramov, V. O., Mullakaev, M. S., Artemev, V. V. (2009). The efficiency of ultrasonic oscillations transfer into the load. *Acoustical Physics*, 55(6), 894-909.
16. Mullakaev, M. S., Volkova, G. I., 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.
17. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., et al. (2017). Acoustic and sonochemical methods for altering the viscosity of oil during recovery and pipeline transportation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35, 389-396.
18. Mullakaev, M. S., Mullakaev, R. M., Volkov, G. I. (2020). Transportation of high-viscosity oil. *Neftegaz.RU*, 12, 64-70.
19. Mullakaev, M. S., Mullakaev, R. M., Volkov, G. I. (2019). Feasibility study of sonochemical technology for transporting high-viscosity oils. *Modern Scientific Thought*, 3, 222-231.
20. Matiev, K. I., Samedov, A. M., Akhmedov, F. M. (2021). Development of pour point depressants for crude oil and study of their properties. *SOCAR Proceedings*, 1, 90-96.
21. Revel-Muroz, P. A., Bakhtizin, R. N., Karimov, R. M., Mastobaev, B. N. (2018). Joint transportation of heavy and wax oil blended. *SOCAR Proceedings*, 2, 65-70.

## Сонохимическая технология транспортировки высоковязкой нефти

*М. С. Муллакаев<sup>1,2</sup>, Р. М. Муллакаев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова  
Российской академии наук, Москва, Россия

### Реферат

Работа посвящена одной из актуальных проблем нефтегазового комплекса – транспортировке высоковязких нефтей. Объектом исследования являлась высоковязкая высокосернистая смешевая нефть Ашальчинского месторождения. Сонохимическое воздействие на нефть позволило снизить эффективную вязкость на 35-40 %, температуру застывания на 15-20 °С. Опытные-промышленные испытания разработанной установки и сонохимической технологии показали возможность снижения нагрузки на насосные станции магистральных трубопроводов, сокращения количества станций «горячей» перекачки нефти, уменьшения количества выбросов органических соединений серы в атмосферу.

**Ключевые слова:** высоковязкая нефть; нефтяные дисперсные системы; ультразвук; депрессорные присадки; сонохимическое воздействие; эффективная вязкость; температура застывания.

## Yüksək özlülüklü neftin nəqli üçün sonokimyəvi texnologiya

*M. S. Mullakayev<sup>1,2</sup>, R. M. Mullakayev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>İ. M. Qubkin adına Rusiya Dövlət Neft və Qaz Universiteti (ETU), Moskva, Rusiya

<sup>2</sup>Rusiya Elmlər Akademiyasının N. S. Kurnakov adına Ümumi və  
Qeyri-üzvi Kimya İnstitutu, Moskva, Rusiya

### Xülasə

Məqalə neft-qaz kompleksinin aktual problemlərindən birinə – yüksək özlülüklü neftlərin nəqlinə həsr olunmuşdur. Tədqiqatın obyektı Aşalçın yatağının yüksək özlülüklü yüksək kükürlü qarışıq nefti olmuşdur. Neftə sonokimyəvi təsir effektiv özlülüüyü 35-40 %, donma temperaturunu isə 15-20 °C azaltmağa imkan vermişdir. İşlənmiş qurğunun və sonokimyəvi texnologiyanın təcrübi-sənaye sınaqları magistral boru kəmərlərinin nasos stansiyalarının yükünün aşağı salınmasının, «isti» neft vurulma stansiyalarının sayının azaldılmasının, üzvi kükürd birləşmələrinin atmosfərə atılmasının miqdarının azaldılmasının mümkünliyünü göstərmişdir.

**Açar sözlər:** yüksək özlülüklü neft; neft dispers sistemləri; ultrasəs; depressor aşqarlar; sonokimyəvi təsir; effektiv özlülük; donma temperaturu.