

DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-5-76-88
УДК 622.692.622.07

М.А. Промтов (Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация), **Р.З. Сунагатуллин** (ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», г. Москва, Российская Федерация), **С.Е. Кутуков** (Научно-технический центр трубопроводного транспорта ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», г. Уфа, Российская Федерация), **А.Н. Колиух**, **О.А. Шеина** (Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация), **Ф.С. Зверев**, **М.В. Суховой** (ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», г. Москва, Российская Федерация)

ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОПАРАФИНИСТОЙ НЕФТИ ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

Maksim A. Promtov (Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation), **Rustam Z. Sunagatullin** (Scientific Research Institute of Pipeline Transport LLC, Moscow, Russian Federation), **Sergey E. Kutukov** (Scientific and Technical Center of Pipeline Transport Scientific Research Institute of Pipeline Transport LLC, Ufa, Russian Federation), **Andrey N. Koliukh**, **Olga A. Sheina** (Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation), **Fedor S. Zverev**, **Maksim V. Suhovey** (Scientific Research Institute of Pipeline Transport LLC, Moscow, Russian Federation)

CHANGE OF RHEOLOGICAL PARAMETERS OF HIGH-PARAFFIN OIL UNDER MULTI-FACTOR IMPACT IN A ROTOR-STATOR DEVICE

Введение

Энергозатраты транспортировки нефти по трубопроводам существенно зависят от реологических свойств перекачиваемой среды. Положительные результаты по снижению вязкости нефти получены при гидромеханической и акустической обработке нефти, которая проводится в роторном импульсном аппарате, акустическое импульсное воздействие на нефть в котором осуществляется за счет пульсаций давления в каналах статора, которые генерируют кавитацию.

Background

The energy consumption of oil transportation through pipelines significantly depends on the rheological properties of the pumped medium. Positive results in reducing the viscosity of oil were obtained during hydro-mechanical and acoustic treatment of oil, which is carried out in a rotor-stator device, the acoustic impulse effect on oil in which is carried out due to pressure pulsations in the stator channels, which generate cavitation.

© Промтов М.А., Сунагатуллин Р.З., Кутуков С.Е., Колиух А.Н., Шеина О.А., Зверев Ф.С., Суховой М.В., 2020

Цели и задачи

Исследование физико-химических и реологических характеристик нефти при её обработке в роторном импульсном аппарате.

Результаты

Экспериментально исследована возможность изменения реологических свойств высокопарафинистой нефти за счет гидромеханического и акустического воздействия в роторном импульсном аппарате. Предложен механизм, объясняющий изменение структуры сложных структурных единиц нефти в результате обработки в роторном импульсном аппарате. Анализ реологических характеристик показал, что снижение вязкости обработанной высокопарафинистой нефти достигает 50 %.

Aims and Objectives

Investigation of the physicochemical and rheological characteristics of oil during its processing in a rotor-stator device

Results

The possibility of changing the rheological properties of highly paraffinic oil due to hydromechanical and acoustic effects in a rotor-stator device has been experimentally investigated. A mechanism is proposed that explains the change in the structure of complex structural units of oil as a result of processing in the rotor-stator device. Analysis of the rheological characteristics showed that the reduction in the viscosity of the treated highly paraffinic oil reaches 50 %.

Ключевые слова: вязкость; роторный импульсный аппарат; гидромеханическое воздействие, кавитация; кривая течения; нефть; реологические свойства

Key words: viscosity; rotor-stator device; hydromechanical action, cavitation; flow curve; crude oil; rheological properties

Введение

Энергозатраты транспортировки нефти по трубопроводам существенно зависят от реологических свойств перекачиваемой среды [1]. Вязкость нефти можно снизить методом добавления газового конденсата или маловязкой нефти к вязкой нефти, насыщения природным газом [2] или подогревом нефти [3-6]. К аналогичному технологическому эффекту приводит введение присадок [5]. Кроме этого, используются методы физической обработки, например наложения полей магнитного, электромагнитного, ультразвукового, кавитационного [3, 4, 7, 8].

Положительные результаты по снижению вязкости нефти получены при гидромеханической и акустической (ГА) обработке нефти, которая проводится в роторном импульсном аппарате (РИА) [7, 9-12].

Акустическое импульсное воздействие на нефть в РИА осуществляется за счет пульсаций давления в каналах статора, которые

генерируют кавитацию. Пульсации кавитационных пузырей в обрабатываемой жидкости динамически воздействуют на ее локальные микрообъемы. При схлопывании кавитационных пузырей возникают кумулятивные струи, имеющие большую скорость и действующие на микрочастицы в жидкости подобно движущемуся с большой скоростью твердому телу. Сдвиговые напряжения в жидкости, развитая турбулентность, пульсации скорости потока проявляются в гидродинамическом воздействии на нефтяную дисперсную структуру. Механическое воздействие на дисперсные частицы углеводородной коллоидной системы проявляется в ударах, срезающих и истирающих напряжениях при контактах с рабочими частями РИА [9-12].

Комплексная гидродинамическая, кавитационная и акустическая обработка нефти может вызвать разрыв межмолекулярных связей, а при определенных условиях и разрыв слабых внутримолекулярных связей, что способствует снижению вязкости и темпера-

туры застывания, изменению внутренней структуры коллоидной нефтяной системы [7, 13-18].

Теоретическая часть

Энергия и сила межмолекулярных взаимодействий являются объемными характеристиками нефтяной дисперсной системы. Внутренняя структура такой нефтяной системы определяется различными типами взаимодействий, зависящих от расстояния между молекулами.

По мере уменьшения межмолекулярных расстояний изменяется природа химических связей, растет их энергия. На дальних (0,7-2,0 нм) и сверхдальних (> 2,0 нм) расстояниях энергия связи между молекулами пропорциональна величине расстояния между взаимодействующими молекулами в шестой или в седьмой степени и может вызвать слабые межмолекулярные взаимодействия. На средних расстояниях (0,3-0,7 нм) энергия характеризуется значениями порядка 40-100 кДж/моль, что присуще физико-химическим взаимодействиям, а на близких (порядка $\leq 0,2-0,3$ нм) расстояниях химические связи между молекулами возникают с энергией более 100 кДж/моль [19].

Водородные связи с энергией 8-40 кДж/моль проявляющиеся практически для всех углеводородов в межмолекулярных комплексах нефти и могут разрушаться при тепловом воздействии [20].

Гидромеханическое и акустическое воздействие может вызвать как деструкцию дисперсной системы (при увеличении расстояния между молекулами), так и изменение ее углеводородного состава за счет химических реакций, происходящих между молекулами при уменьшении межмолекулярных расстояний до $\leq 0,2-0,3$ нм. Например, в работе [4] исследовано изменение сложных структурных единиц (ССЕ) и перехода комплексов из состава дисперсной фазы в дисперсионную среду, в результате чего возрастает доля низкомолекулярных *n*-алканов, ароматических и нафтеновых углеводородов.

В работах [14, 15] было отмечено, что многофакторное ГА воздействие снижает

вязкость нефти. Гидроакустическая обработка высокопарафинистой нефти вызывает разрушение кристаллов парафина, образующих ядро ССЕ, что приводит к увеличению удельной поверхности, и, закономерно, вызывает возрастание поверхностной энергии. После ГА воздействия нестабилизированная дисперсная углеводородная система постепенно снижает величину удельной поверхности. Если содержание смол и асфальтенов в высокопарафинистой нефти незначительно, то поверхностная энергия снижается за счет образования сплошной структурной сетки при перекристаллизации *n*-алканов. Это, в свою очередь, увеличивает структурные характеристики коллоидной системы [4].

Изменениям углеводородного состава нефти при многофакторной гидромеханической и акустической обработке посвящен ряд работ [14, 16-18]. В работе [14] обсуждается вероятность разрушения молекул алканов при ГА воздействии преимущественно по связи С-С, так эта связь слабее связи в соединении С-Н. По результатам исследований в работах [16-18] видно, что энергии, выделившейся при ГА обработке, достаточно для разрыва алкильных цепей и боковых цепей ароматических кольцевых структур. Отмечено, что свойства и состав образующихся продуктов зависят от реакций между свободными радикалами, которые образуются в результате разрыва связей С-Н и С-С в молекулах *n*-алканов. Согласно [18], при кавитации могут происходить реакции диспропорционирования и изомеризации *n*-алканы \leftrightarrow изоалканы, а продукты реакций определяются условиями ГА обработки. Вероятнее всего промежуточные реакции, в ходе которых *n*-алканы C_{18+} превращаются в низкомолекулярные соединения, проходят по так называемому «конденсация - деление» механизму [17, 18].

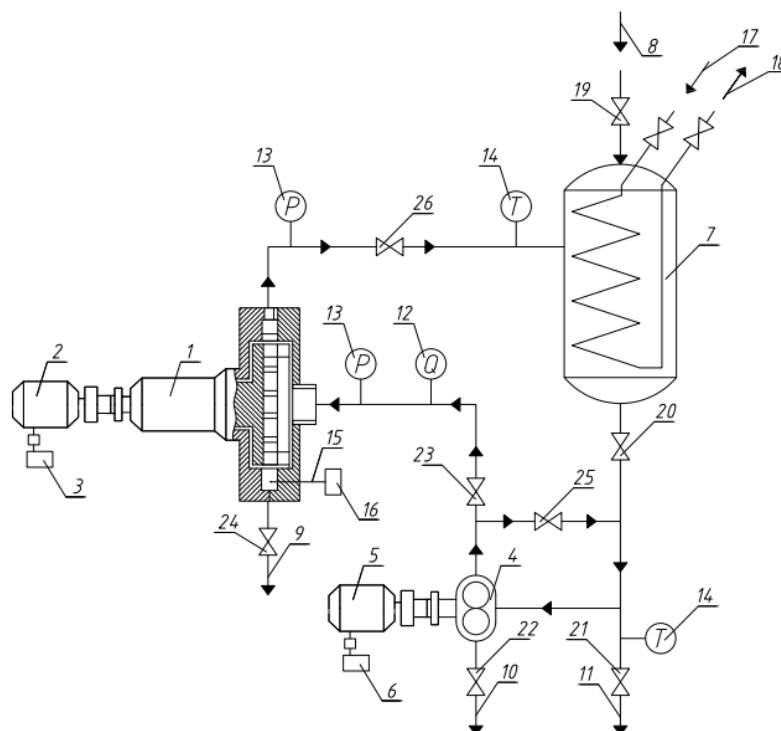
Теоретический анализ позволяет сделать вывод об эффективности применения многофакторного ГА воздействия на нефть для изменения слабых межмолекулярных связей разного генезиса, а также деструкции надмолекулярных структур с целью изменения ее реологических свойств.

Экспериментальная часть

Технологическая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1 [21]. Установка состоит из РИА (1), ротор которого вращается от электродвигателя (2), шестеренчатого насоса (4), соединенного с электродвигателем (5), емкости со змеевиком (7), линий подвода и отвода теплоносителя в змеевик (17), (18), патрубков для залива нефти (8) и отбора проб (9), сливных патрубков (10), (11). Расход нефти измерялся счетчиком жидкости (12). Давление на входе РИА фиксировалось манометром (13), а температура - термометрами (14). В рабочей камере РИА был установлен гидрофон (15), который подключен к кавитометру (16), предназначенному для измерения и контроля интенсивности кавитации.

В конструкции установки была предусмотрена возможность регулирования частоты вращения ротора РИА и вала насоса. С этой целью к электродвигателю РИА был подключен частотный преобразователь (3), а к электродвигателю насоса - частотный преобразователь (6). Частотные преобразователи позволяли изменять частоту вращения валов электродвигателей РИА и насоса. Таким образом, обеспечивалась возможность управления интенсивностью обработки жидкости в РИА путем регулирования частоты вращения ротора и подачи насоса.

На входном патрубке аппарата был установлен манометр (13) для измерения давления в полости ротора. С помощью шаровых кранов (20), (25) и (26) перекрывались патрубки насоса и РИА при обработке жидкости и обслуживании установки [21].



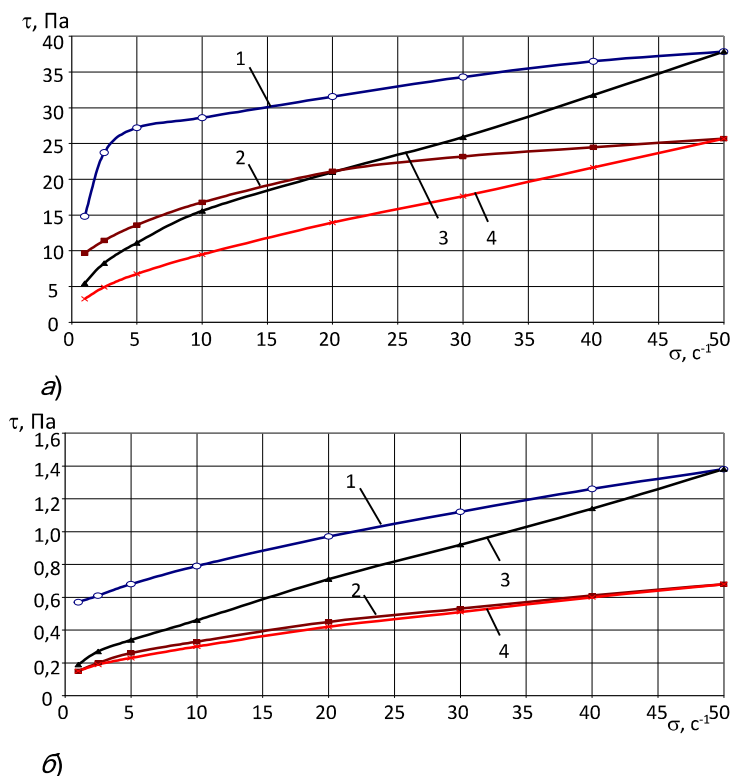
- 1 - роторный импульсный аппарат (РИА); 2 - электродвигатель РИА;
 3, 6 - частотные преобразователи; 4 - шестеренчатый насос;
 5 - электродвигатель насоса; 7 - емкость для нефти; 8 - патрубок залива жидкости;
 9 - патрубок отбора проб; 10, 11 - сливные патрубки; 12 - счетчик жидкости;
 13 - манометры; 14 - датчики температуры; 15 - гидрофон; 16 - кавитометр;
 17, 18 - патрубки подвода и отвода теплоносителя; 19 - 26 - шаровые краны

Рисунок 1. Технологическая схема экспериментальной установки [21]

Для измерения и контроля активности (интенсивности) кавитации к рабочей камере РИА был подключен кавитометр (16). С его помощью можно, в частности, оптимизировать режимы обработки нефти в РИА. Кавитометр состоит из электронного блока (16) и выносного датчика - гидрофона (15). Широкополосный гидрофон принимает пульсации давления множества кавитационных парогазовых пузырей, передает сигнал на анализатор, в котором происходит обработка спектра кавитационного шума. Анализатор сигнала показывает относительную величину интенсивности пульсаций кавитационных образований. Для ГА обработки эксперименты проводили на высокопарафинистой нефти, которая имела плотность 820 кг/м^3 ; концентрацию парафинов 20,57 %; асфальтенов 1,08 %; смол 8,14 %; мехпримесей 0,038 %; серы 0,25 %; температуру застывания $29 \text{ }^\circ\text{C}$. Вода в нефти по стандартной методике не была обнаружена.

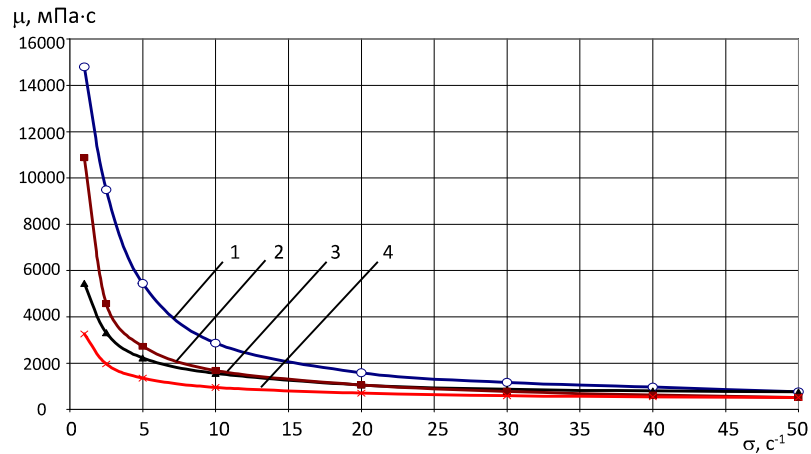
По содержанию парафинов образец нефти относится к высокопарафинистой (более 6 %) нефти, по содержанию смолисто-асфальтеновых компонентов - к малосмолистой (менее 18 %) нефти [22].

Образцы нефти исследовали на вискозиметрах ротационного типа DV2T RV Брукфильд и DV2T LV Брукфильд с использованием SSA адаптера для малых образцов с камерой SC4-13RPY, датчиком температуры RTD. Термостатирование образцов нефти осуществлялось жидкостным криотермостатом LOIP FT 311-80. Ротационный вискозиметр позволял получать значения динамической вязкости и напряжения сдвига при заданной частоте вращения шпинделя и скорости сдвига. Изменения вязкости и напряжения сдвига нефти до обработки и после обработки в РИА определяли по графикам (рисунки 2, 3), построенным по данным измерений ротационного вискозиметра при температурах $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

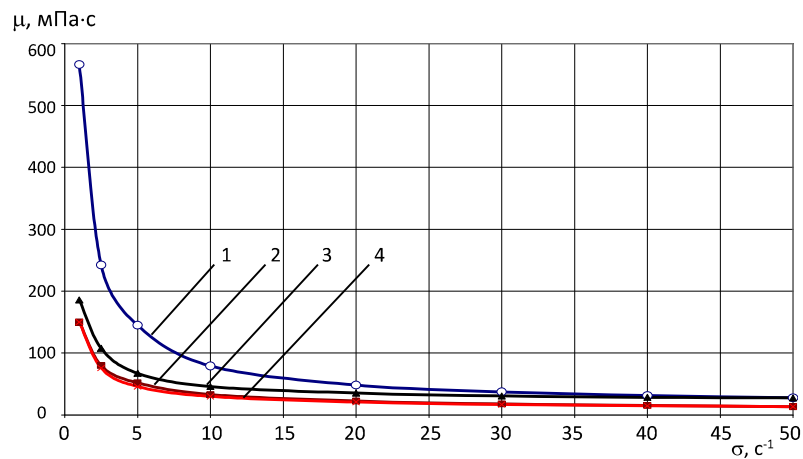


1,3- прямой и обратный ход для образца нефти без обработки;
2,4- прямой и обратный ход для образца нефти и после обработки в РИА

Рисунок 2. Графики зависимостей напряжения сдвига от скорости сдвига в нефти при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (а) и $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (б)



а)



б)

1, 3 - прямой и обратный ход для образца нефти без обработки;
2, 4 - прямой и обратный ход для образца нефти и после обработки в РИА

Рисунок 3. Графики зависимости динамической вязкости нефти от скорости сдвига при температурах 20 °С (а) и 40 °С (б)

Обсуждение результатов и выводы

Анализ графиков зависимостей напряжения сдвига от скорости сдвига необработанной и обработанной в РИА нефти показал наличие петель гистерезиса как при 20 °С, так и при 40 °С (рисунок 2). Кривые обратного хода не повторяют кривые прямого хода, что указывает на тиксотропные характеристики нефти.

Графические зависимости течения нефти при 20 °С и при 40 °С (рисунок 2, а и 2, б) аппроксимируются моделью Балкли-Гершеля (нелинейно-вязкопластичная жидкость с предельным напряжением сдвига) [23] и им соответствуют уравнения в следующем виде:

$$\tau = 8,8 + 10,27 \cdot \sigma^{0,27}$$

(кривая 1, рисунок 2, а); (1)

$$\tau = 0,513 + 0,059 \cdot \sigma^{0,687} \quad (2)$$

(кривая 2, рисунок 2, а);

$$\tau = 4,84 + 5,28 \cdot \sigma^{0,357} \quad (3)$$

(кривая 1, рисунок 2, б);

$$\tau = 0,076 + 0,077 \cdot \sigma^{0,527} \quad (4)$$

(кривая 2, рисунок 2, б).

Здесь σ - скорость сдвига, с⁻¹;

τ - напряжение сдвига, Па;

μ - динамическая вязкость нефти, Па·с.

В процессе обработки нефти в установке на базе РИА фиксировались параметры объема образца нефти, расхода, давления, температуры, силы тока в обмотках электродвигателей насоса и РИА, которые позволили рассчитать относительные затраты на обработку единицы объема и массы нефти (таблица 1).

Введем безразмерный параметр

$$K = \mu_{обр} / \mu_{исх},$$

где $\mu_{исх}$ - динамическая вязкость исходной нефти, Па·с;

$\mu_{обр}$ - динамическая вязкость обработанной нефти, Па·с.

Графики зависимости параметра K от скорости сдвига при 20 °С и 40 °С представлены на рисунке 4. Анализ графиков показывает, что с увеличением скорости сдвига происходит снижение параметра K . При скорости сдвига 50 с⁻¹ при 20 °С снижение вязкости нефти после обработки в РИА составляет не менее 30 %, при 40 °С снижение вязкости нефти после ГА воздействия составляет не менее 50 %.

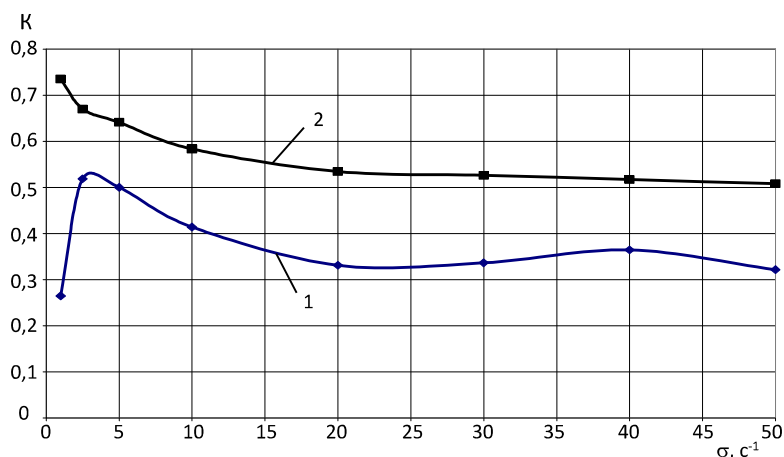
После ГА обработки высокопарафинистая нефть имела следующие параметры: плотность 815,8 кг/м³; содержание асфальтенов 0,97 %; смол 7,92 %; парафинов 19,98 %; механических примесей 0,059 %; серы 0,3 %; воды - н/о; температура застывания 28 °С.

Анализ физико-химических параметров показывает, что для обработанной нефти нет заметных изменений. Величины отклонений физико-химических параметров обработанной нефти находятся в пределах погрешности измерений.

На основании анализа экспериментальных данных и теоретических предположений, можно сделать вывод, что физико-химические и реологические характеристики нефти могут быть изменены при обработке нефти в РИА.

Таблица 1. Параметры проведения экспериментов по обработке нефти в РИА

Параметр	Величина
Давление на входном патрубке РИА, МПа	0,1
Подача нефти в РИА, л/с	0,67
Объем обрабатываемой нефти, м ³	0,015
Температура нефти до обработки, °С	30,3
Температура нефти после обработки, °С	31,9
Время обработки, с	16
Потребляемая мощность, Вт	5055
Удельная потребляемая мощность на обработку нефти, Вт/кг	386
Удельная затраченная энергия на обработку нефти, Дж/кг	6575
Расчетная мощность ГА воздействия на 1 тонну нефти, кВт·ч/т	1,83



1 - прямой ход при 20 °C;
2 - прямой ход при 40 °C

Рисунок 4. Зависимость параметра К от скорости сдвига

Многофакторное ГА воздействие приводит к деформации, изменению структуры и разрушению ССЕ, способствует разрушению надмолекулярных структур, разрыву межмолекулярных связей различной природы. В коллоидной углеводородной системе могут разрываться слабые внутримолекулярные связи больших молекул. При разрыве связей между молекулами нефти могут образовываться новые дисперсные структуры с другими физико-химическими характеристиками.

При обработке малосмолистой высокопарафинистой нефти в РИА происходит диспергирование твердых кристаллов парафинов, а также разрушение ССЕ и межмолекулярных связей и связей между агломератами дисперсных соединений. Вероятнее всего происходит изменение структуры парафиновых соединений за счет адгезии смолистых веществ и образования смешанных кристаллов. Смолы распределяются между твердой и жидкой фазами, изменяют строение агломератов кристаллов парафина, разрыхляют их кристаллическую структуру. Смолистые соединения адсорбируются на вновь образо-

ванных поверхностях кристаллов парафина и предотвращает их агрегацию. Предполагается, что чем больше смол находится в нефти, тем больше они закроют вновь образованные поверхности кристаллов парафина. Открытые активные поверхности зерен парафина стремятся к формированию ССЕ и ассоциатов ССЕ. Предположительно, если бы в образце нефти смолы были в большем количестве, то они закрывали бы поверхности парафинов в большей мере, тем самым обеспечивая снижение способности частиц парафинов к образованию объемной сетчатой структуры. В этом случае снижение вязкости нефти после обработки в РИА возможно было бы в большей степени.

Снижение вязкости высокопарафинистой нефти значительно проявляется при 40 °C по сравнению со снижением вязкости при 20 °C.

Вероятнее всего это обусловлено плавлением парафинов, которые начинают плавиться при температуре выше 35 °C. Так как кристаллы парафина после обработки в РИА могли быть разрушены и иметь меньший

размер после ГА обработки, то мелкие кристаллы начинают плавиться, терять твердую форму и объемную сетчатую структуру при более низкой температуре.

Это предположение подтверждается кривой течения обработанной нефти, на которой линии прямого и обратного хода расположены близко друг к другу, что свидетельствует о снижении тиксотропных свойств обработанной нефти.

Вывод

Разработка технологий обработки тяжелых нефтей методами физико-химического

воздействия - перспективное направление повышения энергоэффективности трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

Ротационно-импульсная обработка аппаратами РАИ позволяет существенно снизить вязкость тиксотропных нефтей без нагрева, что благоприятно сказывается на потребительских и транспортабельных свойствах перекачиваемого продукта за счет разрушения нативной структуры ССЕ, диспергирования твердых кристаллов парафинов, а также равномерного распределения химреагентов в сверхмалых концентрациях по всему сечению потока.

Список литературы

1. Ревель-Муроз П.А., Фридлянд Я.М., Кутуков С.Е. Оценка гидравлической эффективности нефтепроводов по данным мониторинга технологических режимов эксплуатации // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 1. С. 8-19. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-1-8-19.
2. Брот Р.А., Кутуков С.Е. Определение реофизических параметров газонасыщенных нефтей // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. № 2. С. 37. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Brot/Brot_1.pdf (дата обращения: 14.08.2020).
3. Хасанов И.И., Шакиров Р.А., Леонтьев А.Ю. Обзор современных методов воздействия на реологические свойства тяжелых высоковязких нефтей // НефтеГазоХимия. 2018. № 3. С. 49-54. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10305.
4. Волкова Г.И., Ануфриев Р.В., Юдина Н.В. Влияние ультразвуковой обработки на состав и свойства парафинистой высокосмолистой нефти // Нефтехимия. 2016. Т. 56. № 5. С. 454-460. DOI: 10.7868/S0028242116050208.
5. Ревель-Муроз П.А., Фридлянд Я.М., Кутуков С.Е. Оценка эффективности технологии перекачки нефти с применением противотурбулентных присадок // Нефтяное хозяйство. 2020. № 1. С. 90-95. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-1-90-95.
6. Гольянов А.И., Гриша Б.Г., Кутуков С.Е., Четверткова О.В. Сравнительная оценка эффективности «горячей» перекачки // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 6. С. 642-649.
7. Промтов М.А. Технологии импульсного энергетического воздействия на нефть и нефтепродукты // Экологический вестник России. 2011. № 3. С. 14-16.

References

1. Revel-Muroz P.A., Fridlyand Ya.M., Kutukov S.E. Otsenka gidravlicheskoj effektivnosti nefteprovodov po dannym monitoringa tekhnologicheskikh rezhimov ekspluatatsii [Assessing the Hydraulic Efficiency of Oil Pipelines According to the Monitoring Of Process Operation Conditions]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov - Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2019, Vol. 9, No. 1, pp. 8-19. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-1-8-19. [in Russian].
2. Brot R.A., Kutukov S.E. Opredelenie reofizicheskikh parametrov gazonasyschennykh neftei [Determination of Rheophysical Parameters of Gas-Saturated Oils]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» - Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2005, No. 2, pp. 37. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Brot/Brot_1.pdf (accessed 14.08.2020). [in Russian].
3. Khasanov I.I., Shakirov R.A., Leont'ev A.Yu. Obzor sovremennykh metodov vozdeistviya na reologicheskie svoistva tyazhelykh vysokovyazkikh neftei [Review of Modern Methods of Influence on the Rheological Properties of Heavy Highly Viscous Oils]. *NefteGazokHimiya - Oil and Gas Chemistry*, 2018, No. 3, pp. 49-54. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10305. [in Russian].
4. Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V. Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki na sostav i svoistva parafinistoi vysokosmolistoi nefiti [Influence of Ultrasonic Treatment on the Composition and Properties of Paraffinic Highly Resinous Oil]. *Neftekhimiya - Petroleum Chemistry*, 2016, Vol. 56, No. 5, pp. 454-460. DOI: 10.7868/S0028242116050208. [in Russian].
5. Revel-Muroz P.A., Fridlyand Ya.M., Kutukov S.E. Otsenka effektivnosti tekhnologii perekachki nefiti s primeneniem protivoturbulentnykh prisadok [Assessing the Efficiency of the Technology of Oil Transport with the Use of Turbulence-Inhibiting Additives]. *NefteGazokHimiya - Oil and Gas Chemistry*, 2020, No. 1, pp. 90-95. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-1-90-95.

8. Волкова Г.И., Лоскутова Ю.В., Прозорова И.В., Березина Е.М. Подготовка и транспорт проблемных нефтей (научно-практические аспекты). Томск: Изд-во ТГУ, 2015. 134 с.
9. Промтов М.А. Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти в роторном импульсном аппарате // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2018. Т. 24. № 3. С. 455-460. DOI: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460.
10. Промтов М.А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Т. 23. № 3. С. 412-419. DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419.
11. Промтов М.А., Авсеев А.С. Импульсные технологии для переработки нефти и нефтепродуктов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2007. № 6. С. 22-24.
12. Промтов М.А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 2. С. 6-8.
13. Сурков В.Г., Головкин А.К., Можайская М.В. Влияние условий механического воздействия на изменение состава парафинов нефти // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 3. С. 148-152.
14. Бранд А.Э., Закирзаков А.Г., Торопов С.Ю., Соколов С.М. Гидродинамическая кавитационная обработка как способ снижения вязкости высоковязких нефтей и повышения эффективности транспортировки // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 2-3. С. 26. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23508> (дата обращения: 16.08.2020).
15. Промтов М.А., Гатапова Н.Ц., Борщев В.Я., Колиух А.Н., Степанов А.Ю., Шеина О.А. Влияние гидроимпульсной обработки на реологические параметры нефти // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26. № 2. С. 243-253. DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253.
16. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Егорова Е.В. Превращение алканов под действием единичного импульса гидродинамической кавитации. II. Поведение среднецепных алканов C₂₁-C₃₈ // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова. 2014. Т. 9. № 4. С. 59-69.
17. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Антонюк С.Н., Егорова Е.В., Иванов С.В., Кравченко В.В., Городский С.Н. Использование многоциклового кавитации для интенсификации переработки нефтяного сырья // Технологии нефти и газа. 2015. № 2 (97). С. 9-17.
18. Торховский В.Н., Антонюк С.Н., Воробьев С.И., Николаева М.В. Превращение короткоцепных n-алканов под действием гидродинамической кавитации // Тонкие химические технологии. 2017. Т. 12. № 5. С. 65-70.
19. Туманян Б.П. Научные и прикладные аспекты [Estimation of the Oil Pumping Technology Effectiveness with Drag Reduction Agents]. *Neftyanoe khozyaistvo - Oil Industry*, 2020, No. 1, pp. 90-95. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-1-90-95. [in Russian].
6. Golyanov A.I., Grisha B.G., Kutukov S.E., Chetvertkova O.V. Sravnitel'naya otsenka effektivnosti «goryachei» perekachki [Comparative Evaluation of the «Hot» Batching Efficiency]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov - Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2018, Vol. 8, No. 6, pp. 642-649. [in Russian].
7. Promtov M.A. Tekhnologii impul'snogo energeticheskogo vozdeistviya na nef' i nefteprodukt [Technologies of Impulse Energy Impact on Oil and Oil Products]. *Ekologicheskii vestnik Rossii - Ecological Bulletin of Russia*, 2011, No. 3, pp. 14-16. [in Russian].
8. Volkova G.I., Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Berezina E.M. *Podgotovka i transport problemnykh nefei (nauchno-prakticheskie aspekty)* [Preparation and Transportation of Problem Oils (Scientific and Practical Aspects)]. Tomsk, TGU Publ., 2015. 134 p. [in Russian].
9. Promtov M.A. Gidroiimpul'snaya kavitatsionnaya obrabotka nefi v rotnom impul'snom apparate [Hydro-Pulse Cavitation Treatment of Crude Oil in the Rotor-Stator Device]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta - Transactions of TSTU*, 2018, Vol. 24, No. 3, pp. 455-460. DOI: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460. [in Russian].
10. Promtov M.A. Izmenenie fraktsionnogo sostava nefi pri gidroiimpul'snoi kavitatsionnoi obrabotke [Change in Fractional Composition of Oil in Hydro-Pulse Cavitation Processing]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta - Transactions of TSTU*, 2017, Vol. 23, No. 3, pp. 412-419. DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419. [in Russian].
11. Promtov M.A., Avseev A.S. Impul'snye tekhnologii dlya pererabotki nefi i nefteproduktov [Pulse Technologies for Petroleum and Oil Products Refining]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt - Oil Processing and Petrochemistry*, 2007, No. 6, pp. 22-24. [in Russian].
12. Promtov M.A. Kavitatsionnaya tekhnologiya uluchsheniya kachestva uglevodorodnykh topliv [Cavitation Technology to Improve the Quality of Hydrocarbon Fuels]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie - Chemical and Petroleum Engineering*, 2008, No. 2, pp. 6-8. [in Russian].
13. Surkov V.G., Golovko A.K., Mozhaikaya M.V. Vliyanie uslovii mekhanicheskogo vozdeistviya na izmenenie sostava parafinov nefi [Influence of Conditions of Mechanical Action on the Change in the Composition of Oil Paraffins]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, Vol. 321, No. 3, pp. 148-152. [in Russian].
14. Brand A.E., Zakirzakov A.G., Toropov S.Yu., Sokolov S.M. Gidrodinamicheskaya kavitatsionnaya obrabotka kak sposob snizheniya vyazkosti

пекты теории нефтяных дисперсных систем. М.: Изд-во «Техника», 2000. 335 с.

20. Сюняев З.И., Сафиева Р.З., Сюняев Р.З. Нефтяные дисперсные системы. М.: Химия, 1990. 224 с.

21. Промтов М.А., Степанов А.Ю., Алешин А.В. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 147 с.

22. Вержичинская С.В., Дигуров Н.Г., Синицин С.А. Химия и технология нефти и газа. М.: ИНФРА-М, 2007. 400 с.

23. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 311 с.

vysokovyazkikh neftei i povysheniya effektivnosti transportirovki [Hydrodynamic Cavitation Treatment as a Way Reduce the Viscosity of Heavy Oil and Efficiency Transport]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» - Digital Scientific Magazine «Modern Problems of Science and Education»*, 2015, No. 2-3, pp. 26. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23508> (accessed 16.08.2020). [in Russian].

15. Promptov M.A., Gatapova N.Ts., Borshchev V.Ya., Koliukh A.N., Stepanov A.Yu., Sheina O.A. Vliyaniye gidroimpul'snoi obrabotki na reologicheskie parametry nefiti [The Influence of Hydropulse Processing on Rheological Oil Parameters]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta - Transactions of TSTU*, 2020, Vol. 26, No. 2, pp. 243-253. DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253. [in Russian].

16. Torkhovskii V.N., Vorobev S.I., Egorova E.V. Prevrashchenie alkanov pod deistviem edinichnogo impul'sa gidrodinamicheskoi kavitatsii. II. Povedenie srednetsepynykhalkanov C₂₁-C₃₈ [Transformation of Alkanes Under Treatment of Single Impulse of Hydrodynamic Cavitation. II. Behaviour of Medium-Chain Alkanes C₂₁-C₃₈]. *Vestnik MITKhT im. M.V. Lomonosova - Fine Chemical Technologies (Vestnik MITHT)*, 2014, Vol. 9, No. 4, pp. 59-69. [in Russian].

17. Torkhovskii V.N., Vorob'ev S.I., Antonyuk S.N., Egorova E.V., Ivanov S.V., Kravchenko V.V., Gorodskii S.N. Ispol'zovanie mnogotsiklovoi kavitatsii dlya intensivatsii pererabotki neftyanogo syr'ya [Intensification of Petroleum Feedstock Processing by Multi-Cycle Cavitation]. *Tekhnologii nefiti i gaza - Science and Technology of Hydrocarbons*, 2015, No. 2 (97), pp. 9-17. [in Russian].

18. Torkhovskii V.N., Antonyuk S.N., Vorobev S.I., Nikolaeva M.V. Prevrashchenie korotkotsepynykh n-alkanov pod deistviem gidrodinamicheskoi kavitatsii [Transformation of Short-Chain n-Alkanes Under Treatment of Hydrodynamic Cavitation]. *Tonkie khimicheskie tekhnologii - Fine Chemical Technologies*, 2017, Vol. 12, No. 5, pp. 65-70. [in Russian].

19. Tumanyan B.P. *Nauchnye i prikladnye aspekty teorii neftyanykh dispersnykh sistem* [Scientific and Applied Aspects of the Theory of Oil Dispersed Systems]. Moscow, «Tekhnika» Publ., 2000. 335 p. [in Russian].

20. Syunyaev Z.I., Safieva R.Z., Syunyaev R.Z. *Neftyanye dispersnye sistemy* [Oil Dispersed Systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 224 p. [in Russian].

21. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Alechin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods for Calculating the Characteristics of a Rotary Pulse Apparatus]. Tambov, TGTU Publ., 2015. 147 p. [in Russian].

22. Verzhichinskaya S.V., Digurow N.G., Sinitsin S.A. *Khimiya i tekhnologiya nefiti i gaza*

[Chemistry and Technology of Oil and Gas]. Moscow, INFRA-M Publ., 2007. 400 p. [in Russian].

23. Shramm G. *Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii* [A Practical Approach to Rheology and Rheometry]. Moscow, KolosS Publ., 2003. 311 p. [in Russian].

Авторы

• Промтов Максим Александрович, д-р техн. наук, профессор
Тамбовский государственный технический университет
Профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»
Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106
тел. (4752) 63-91-52
e-mail: fmo@mail.tstu.ru

• Сунагатуллин Рустам Зайтунович
ООО «НИИ Транснефть»
Директор Центра исследований гидравлики трубопроводного транспорта
Российская Федерация, 117186, Москва, Севастопольский проспект, 47а
тел. (495) 950-82-95
e-mail: niitnn@niitnn.transneft.ru

• Кутуков Сергей Евгеньевич, д-р техн. наук
НТЦ ООО «НИИ Транснефть»
Главный научный сотрудник Управления математического моделирования и технологий трубопроводного транспорта,
Российская Федерация, 450055, г. Уфа, проспект Октября, 144/3
e-mail: KutukovSE@niitnn.transneft.ru

• Колиух Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент
Тамбовский государственный технический университет
доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»
Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106
тел. (4752) 63-91-52
e-mail: kvidep@cen.tstu.ru

The Authors

• Promtov Maksim A., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Tambov State Technical University
Professor of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety Department
106, Sovetskaya Str., Tambov, 392000, Russian Federation
tel: (4752) 63-91-52
e-mail: fmo@mail.tstu.ru

• Sunagatullin Rustam Z.
Transneft R&D Institute
Head of Pipeline Hydraulics Research Center
47a, Sevastopol prospect, Moscow, 117186, Russian Federation
tel: (495) 950-82-95
e-mail: niitnn@niitnn.transneft.ru

• Kutukov Sergey E., Doctor of Engineering Sciences
Science & Technology Center of Transneft R&D Institute
Chief Researcher of Mathematic Simulation and Pipeline Technologies Department
144/3, Octoder avenue, Ufa, 450055, Russian Federation,
e-mail: KutukovSE@niitnn.transneft.ru

• Koliukh Andrey N., Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Tambov State Technical University
Associate Professor of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety Department
106, Sovetskaya str., Tambov, 392000, Russian Federation
tel: (4752) 63-91-52
e-mail: kvidep@cen.tstu.ru

• Шеина Ольга Александровна, канд. хим. наук,
доцент
Тамбовский государственный технический
университет
Старший педагог дополнительного образования
кафедры «Общетеоретические дисциплины»
Российская Федерация, 392000, г. Тамбов,
ул. Советская, 106
тел. (4752) 63-02-19
e-mail: tstu.fmo.otd@yandex.ru

• Sheina Olga A., Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor
Tambov State Technical University
Senior Pedagogue of Additional Education
of General Theoretical Disciplines Department
106, Sovetskaya str., Tambov, 392000,
Russian Federation
tel: (4752) 63-02-19
e-mail: tstu.fmo.otd@yandex.ru

• Зверев Федор Сергеевич, канд. техн. наук
ООО «НИИ Транснефть»
заведующий лабораторией химических реагентов
Российская Федерация, 117186, Москва,
Севастопольский проспект, 47а
тел. (495) 950-82-95
e-mail: niitnn@niitnn.transneft.ru

• Zverev Fedor S., Candidate of Engineering Sciences
Transneft R&D Institute
Head of Chemical Agent Laboratory
47a, Sevastopol prospect, Moscow, 117186,
Russian Federation
tel: (495) 950-82-95
e-mail: niitnn@niitnn.transneft.ru

• Суховой Максим Валерьевич
ООО «НИИ Транснефть»
Ведущий научный сотрудник лаборатории
химических реагентов
Российская Федерация, 117186, Москва,
Севастопольский проспект, 47а
тел. (495) 950-82-95
e-mail: niitnn@niitnn.transneft.ru

• Suhovey Maksim V.
Transneft R&D Institute
Leading Researcher of Chemical Agent Laboratory
47a, Sevastopol prospect, Moscow, 117186,
Russian Federation
tel: (495) 950-82-95
e-mail: niitnn@niitnn.transneft.ru