
СТРАНИЧКА МОЛОДОГО УЧЕНОГО

УДК 544.7

DOI: 10.15372/ChUR20202570

Влияние нефтяных смол и ультразвуковой обработки на свойства нефтеподобной системы

А. В. МОРОЗОВА, Г. И. ВОЛКОВА

*Институт химии нефти СО РАН,
Томск (Россия)**E-mail: anastassiya_petukhova@mail.ru*

(Поступила 11.03.20; после доработки 25.07.20)

Аннотация

Помехи в технологических процессах транспортировки углеводородного сырья (повышение вязкости, потеря текучести, образование асфальтосмолопарафиновых отложений на поверхности оборудования), возникающие при понижении температуры сырьевого потока, повышают энергозатраты и снижают эффективность данных процессов. В последнее десятилетие активно разрабатываются физические способы воздействия, а также их комбинации с химическими методами, позволяющие существенно улучшить структурно-механические свойства проблемных нефтей. Один из таких методов – ультразвуковая обработка. Исследовано влияние ультразвуковой обработки и добавки нефтяных смол на вязкостно-температурные и энергетические параметры 6 мас. % раствора нефтяного парафина в декане (НП-д), имитирующего высокопарафинистую нефтяную систему. Ультразвуковая обработка (частота поля 22 кГц, интенсивность 18 Вт/см², продолжительность 10 мин) раствора НП-д стимулирует кристаллизацию молекул нефтяного парафина по окончании процесса, что способствует увеличению вязкости, температуры застывания и количества парафиновых отложений. Введение в обработанный ультразвуком раствор НП-д бензолных и спиртобензолных смол, выделенных из высокосмолистой нефти, подавляет кристаллизацию молекул нефтяного парафина, способствуя тем самым снижению вязкостно-температурных характеристик, энергии активации вязкого течения, удельной энергии разрушения дисперсной системы, количества парафиновых отложений, изменению формы и структуры кристаллов нефтяного парафина. Показано, что спиртобензолные смолы, содержащие большее количество гетероатомных функциональных групп и имеющие более длинные алкильные заместители в ароматических и нафтеновых циклах, являются лучшими депрессорами вязкости и температуры застывания. Процесс осадкообразования в исследуемом растворе сильнее ингибируется бензолными смолами, содержащими большее количество ароматических структур.

Ключевые слова: нефтяные смолы, ультразвук, вязкость, кристаллизация, температура застывания**ВВЕДЕНИЕ**

Разработка новых технологий добычи и транспорта проблемных нефтей актуальна для России и других нефтедобывающих стран, поскольку доля такого углеводородного сырья в общем нефтяном балансе постоянно растет [1, 2]. В связи с этим проводятся многочисленные исследования, направленные на улучшение структурно-механических параметров

нефтяных дисперсных систем (НДС). Снижение вязкости и температуры застывания добываемой и транспортируемой нефти может быть достигнуто следующими методами: термической обработкой, физическим и химическим воздействием, разбавлением легкими фракциями нефти или растворителями различной природы [3–10]. Для повышения эффективности обработки часто используют комбинированные методы воздействия.

В настоящее время активно исследуется воздействие ультразвука на свойства НДС. Успешно проведены теоретические и экспериментальные исследования в области ультразвуковой кавитации и акустических течений, позволившие разработать новые технологические процессы [11–16]. Обзор работ [8, 10, 11–16] показал, что структурно-механические свойства нефтей различного компонентного состава после ультразвуковой обработки (УЗО) изменяются неоднозначно. Большинство исследований носят прикладной характер, так как факт изменения свойств нефтяных систем регистрируется без выявления физико-химических закономерностей процесса. В связи с этим для прогнозирования свойств углеводородного сырья после УЗО необходимо оценить влияние различных компонентов на характеристики НДС. Проведенные ранее исследования показали [17], что УЗО 6 мас. % раствора нефтяного парафина в декане (НП-д), имитирующего высокопарафинистую нефтяную систему, приводит к повышению температур фазовых переходов, энергетических и реологических параметров системы, а введение 0.3 мас. % силикагелевых смол в исходный раствор способствует существенному снижению данных параметров. Представляется важным установить, какие структурные единицы смол оказывают большее влияние на вязкостно-температурные и энергетические параметры нефтеподобных систем после УЗО.

Цель данной работы – исследование влияния УЗО и добавки бензольных (БС) или спиртобензольных смол (СБС) на структурно-механические свойства 6 мас. % раствора НП-д.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходный 6 мас. % модельный раствор НП-д, имитирующий высокопарафинистую нефтяную систему, готовили с использованием нефтяного парафина (ГОСТ 23683-89) и декана (ТУ 6-09-3614-74). Ультразвуковую обработку раствора проводили с помощью ультразвукового дезинтегратора УЗДН-2Т (НПП “Укрросприбор”, Украина). Установка содержала магнетострикционный преобразователь (рабочая частота 22 кГц) и стержневой волновод с диаметром рабочего торца инструмента 1.72 см. Коэффициент полезного действия (КПД) преобразователей такого типа составляет 30–40 % [18]. Для оценки величины акустической мощности колебаний, поглощаемых водой, использовали кало-

риметрический метод [19]. Мощность ультразвукового воздействия составляла 42 Вт. Обработка осуществлялась в технологической камере объемом 0.1 дм³, поэтому акустическая мощность для реализации исследуемых процессов составила не менее 420 Вт/дм³. Интенсивность ультразвука при радиусе торца преобразователя 0.86 см равна 18 Вт/см². Продолжительность обработки исследуемых растворов объемом 0.1 дм³ составляла 10 мин при температуре окружающей среды 20 °С.

Бензольные и спиртобензольные смолы (БС и СБС соответственно) выделяли из высокосмолистой нефти месторождения Республики Коми по стандартным методикам [20]. Относительное содержание структурных фрагментов (структурно-групповой состав) смол определяли с использованием данных ИК-спектроскопии. ИК-спектры регистрировали с помощью FTIR-спектрометра NICOLET 5700 (Thermo Electron, США) в области 400–4000 см⁻¹. Обработку спектров и определение оптической плотности проводили с помощью программного обеспечения OMNIC 7.2. Для определения относительного содержания структурных фрагментов использовали следующие характеристические полосы поглощения: 1730, 1700, 1650 см⁻¹ – С=О-группы в сложных эфирах, кислотах и амидах соответственно, 1600 см⁻¹ – С=С-связи ароматического кольца, 850, 805, 760 см⁻¹ – ароматический триплет замещенных бензола, 1465 см⁻¹ – алифатические С–Н-связи, 1380 см⁻¹ – СН₃-группы, 1030 см⁻¹ – S=O-группы, 720 см⁻¹ – (CH₂)_n-группы в алифатических структурах с n > 4 [21]. Относительное содержание структурного фрагмента оценивали из соотношения D_i/D_{1465} , где D_i , D_{1465} – интегральные оптические плотности характеристической полосы поглощения и полосы при 1465 см⁻¹, использованной как внутренний стандарт, соответственно [22]. Согласно полученным значениям нормированных оптических плотностей (табл. 1), БС содержат большее количество ароматических структур, в то время как содержание сульфоксидных заместителей, С=О-групп (в том числе в амидах), степени алифатичности ($(D_{720} + D_{1380})/D_{1600}$) и степени разветвленности (D_{1380}/D_{1465}) ниже, чем в СБС.

Раствор нефтяных смол в хлороформе (1 : 2) вводили в раствор НП-д сразу после УЗО с помощью пипеточного дозатора. Добавленное количество хлороформа (0.6 г на 100 г раствора) не влияет на вязкостно-температурные свойства раствора НП-д.

ТАБЛИЦА 1

Данные ИК-спектроскопии нефтяных смол

Смолы	f_a	Положение полосы поглощения, см ⁻¹									
		1730	1700	1650	1600	1380	1030	850	805	760	725
		Значения нормированных оптических плотностей, D_i/D_{1465}									
БС	2.214	0.217	0.268	0.182	0.328	0.597	0.224	0.166	0.186	0.196	0.131
СБС	2.383	0.415	0.292	0.302	0.279	0.631	0.515	0.151	0.177	0.162	0.136

Примечание. Степень алифатичности $f_a = (D_{720} + D_{1380})/D_{1600}$; степень разветвленности = D_{1380}/D_{1465} .

Реологические параметры растворов нефтяного парафина определяли с использованием ротационного вискозиметра НААКЕ Viscotester iQ (Thermo Scientific, США). Вязкостно-температурные зависимости регистрировали при непрерывном понижении температуры (T) со скоростью 0.3 °С/мин при скорости сдвига 1 с⁻¹, при которой разрушение структуры тиксотропной системы минимально. Энергию активации вязкого течения (E_a) определяли по тангенсу угла наклона прямолинейных участков зависимостей $\ln \mu = f(1/T)$, где μ – эффективная вязкость раствора, мПа·с; T – температура, К [23]. Энергию разрушения надмолекулярной структуры НДС рассчитывали по площади петли, образованной кривыми течения прямого и обратного хода, полученными при температуре 10 °С согласно методике, описанной в [24]. Реологические измерения проводили через 20 с при скоростях сдвига до 85 с⁻¹. Уравнение энергии системы записывается в виде

$$dW_u = dQ + dA + dZ \quad (1)$$

где W_u – внутренняя энергия системы; Q – теплота; A – работа; Z – энергия переноса массы.

При постоянной температуре и отсутствии переноса массы изменение внутренней энергии (dW_u) будет происходить за счет работы (dA).

Площадь между кривыми течения прямого и обратного хода пропорциональна энергии разрушения надмолекулярной структуры дисперсной системы (ΔW) до установившегося значения реологических параметров. Для расчета ΔW переходили от сдвиговых скоростей (γ_i) и напряжений сдвига (τ_i) к моментам сопротивления вращению цилиндра ротационного вискозиметра (M_i , Н·м) и угловым частотам вращения (ω_i , с⁻¹), которые определяли по формулам

$$M_i = 2\pi H r^2 \tau_i \quad (2)$$

$$\omega_i = (h/r) \cdot \gamma_i \quad (3)$$

где H – высота цилиндра; r – радиус цилиндра; h – зазор между стенками цилиндров вискозиметра.

По формулам (2) и (3) по шагам пересчитывали кривые течения. Плавное изменение ско-

рости сдвига от 0 до 85 с⁻¹ и обратно происходит за 720 с.

Далее рассчитывали механическую мощность вискозиметра (P_i) по формуле

$$P_i = M_i \omega_i \quad (4)$$

По кривым зависимостей механической мощности от времени $P_i(t)$ для прямого и обратного хода рассчитывали энергию (W_i) на каждом шаге временного интервала:

$$W_i = \Delta P \Delta t N, \quad (5)$$

где ΔP – цена деления оси мощности; Δt – временной интервал; N – число шагов.

Энергия разрушения дисперсной системы (ΔW) определяется как

$$\Delta W = W_i(\text{прямого хода}) - W_i(\text{обратного хода})$$

Чтобы значения энергии не зависели от параметров цилиндров, ввели величину удельной энергии разрушения дисперсной системы ($\Delta W_{уд}$, Дж) для 1 м³ образца:

$$\Delta W_{уд} = \Delta W / v$$

где v – объем жидкости, находящейся в зазоре между цилиндрами, м³.

Температуру начала кристаллизации и застывания растворов НП-д определяли с помощью прибора ИНПН “Кристалл” SX-800 (Россия). Температуру максимальной скорости кристаллизации при постепенном понижении температуры оценивали по дифференциальным зависимостям пропускания светового потока от температуры.

Процесс осадкообразования исследовали с использованием установки, работающей по принципу “холодного стержня” при следующих условиях: температура стержня 8 °С, температура образца 30 °С, время эксперимента 1 ч, навеска образца 40 г. Массу осадка, образовавшегося на стержне, определяли гравиметрически, полученные значения пересчитывали на 100 г раствора. Ингибирующую способность смол (I , %) рассчитывали по формуле:

$$I = (m_0 - m_c) \cdot 100 / m_0$$

где m_0 – масса осадка исходного раствора; m_c – масса осадка раствора со смолами.

Исследование микроструктуры осадков нефтяного парафина проводили методом оптичес-

кой микроскопии в проходящем свете с помощью микроскопа Zeiss AXIO LAB.A1 (Carl Zeiss, Германия). Полученные микрофотографии обрабатывали с использованием программ Zen и Axio Vision (Zeiss).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структурные преобразования, которые наблюдаются при охлаждении раствора НП-д, исследовали по зависимостям вязкости системы от температуры (рис. 1). Вязкостно-температурная кривая для исходного раствора НП-д представлена несколькими участками (см. рис. 1). При снижении температуры до 13 °С вязкость исследуемого раствора медленно повышается, что связано с зарождением частиц парафинов в исходной дисперсионной среде (декане). При дальнейшем охлаждении этой дисперсной системы наблюдается резкое увеличение вязкости, обусловленное агрегацией первичных кристаллов. При температуре около 2.5 °С наблюдается золь-гель переход, и система теряет текучесть.

После УЗО вязкость исходного раствора в температурном интервале 6–15 °С значительно снижается, однако уже при 5 °С она достигает исходного значения, а затем, при дальнейшем понижении температуры, превышает его. Такая вязкостно-температурная зависимость обуслов-

лена, вероятно, интенсивными релаксационными процессами, протекающими в системе.

После УЗО раствора НП-д с последующим введением как БС, так и СБС, вязкость существенно снижается, особенно в области температур ниже 13 °С. Процесс агрегации первичных кристаллов после комплексного воздействия замедлен, а вязкостно-температурные кривые сглажены. Температуры золь-гель перехода обработанных образцов смещаются в область отрицательных температур: –6.7 и –8.3 °С после внесения БС и СБС соответственно.

Вязкостно-температурные зависимости используются для расчета энергии активации вязкого течения (E_a) НДС по тангенсу угла наклона линейных участков кривой $\ln \mu = f(1/T)$ [23]. Для исходного раствора НП-д и образца после УЗО зависимость натурального логарифма вязкости от обратной температуры (рис. 2) выражается двумя линейными функциями с точкой перегиба при 2.5 °С, поэтому реологические свойства данных образцов в исследуемом интервале температур характеризуются двумя значениями энергии активации: E_a в интервале 3–15 °С составляет 55 и 174 кДж/моль, а ниже 3 °С – 340 и 520 кДж/моль соответственно. Для образцов с добавками смол наблюдаются прямолинейные зависимости в более широком температурном интервале (от –8 до 15 °С). Значения E_a для растворов НП-д после совместного

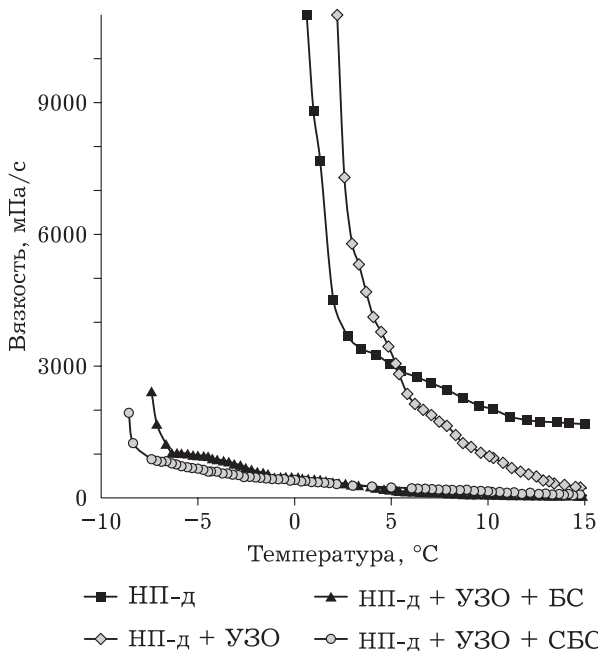


Рис. 1. Вязкостно-температурные кривые течения растворов НП-д.

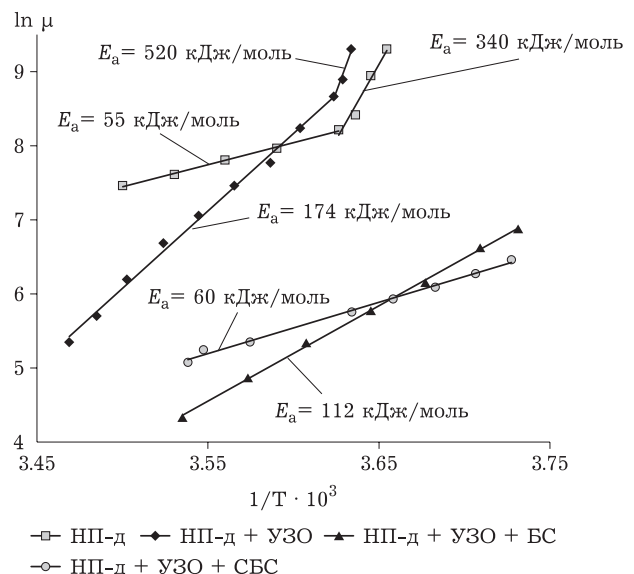


Рис. 2. Зависимость логарифма эффективной вязкости растворов НП-д от обратной температуры.

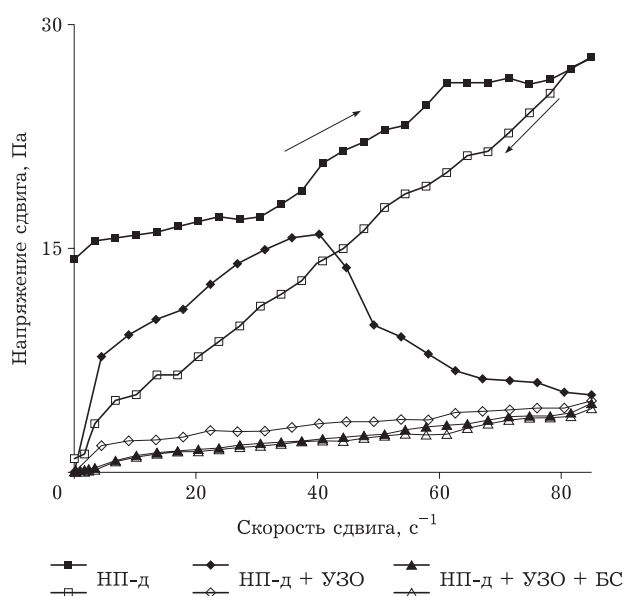


Рис. 3. Кривые течения прямого и обратного хода растворов НП-д при 10 °С.

воздействия УЗО и введения нефтяных смол ниже – 112 и 60 кДж/моль в присутствии БС и СБС соответственно.

Степень структурированности дисперсных систем можно описать с помощью удельной энергии разрушения надмолекулярной структуры ($\Delta W_{уд}$). На рис. 3 представлены восходящая и нисходящая кривые течения исходного раствора НП-д, которые образуют петлю гистерезиса. Гистерезисные явления в тиксотропных системах обычно связывают с запаздыванием процессов восстановления структуры или недостаточным разрушением исходной структуры [25]. Значение $\Delta W_{уд}$, рассчитанное по площади петли гистерезиса для исходного образца, составляет 54 Дж/м³. После УЗО значение $\Delta W_{уд}$ увеличивается (100 Дж/м³), что связано с формированием более прочных структур. Слияние кривых течения прямого и обратного хода и, следовательно, стремление к нулю значения $\Delta W_{уд}$ для растворов НП-д после УЗО с добавкой как БС,

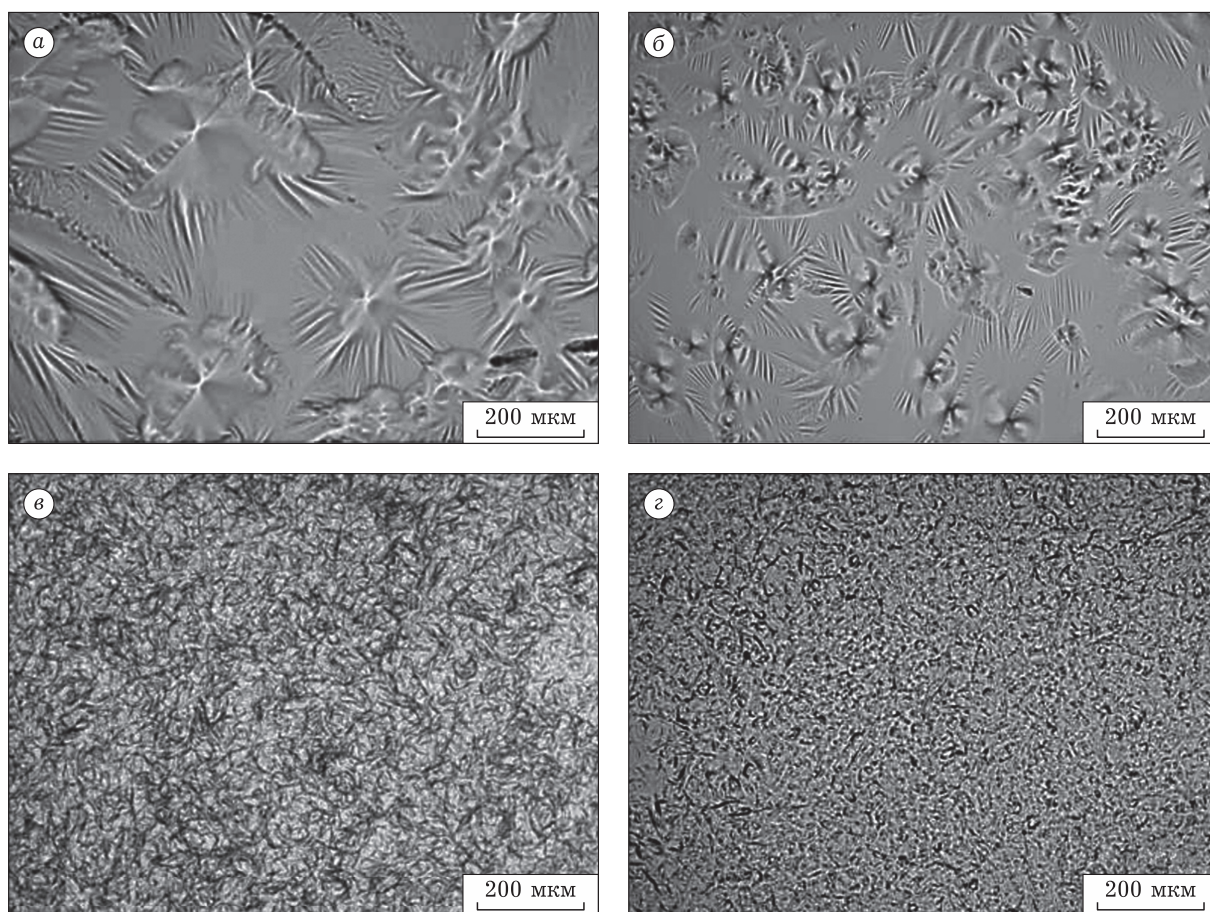


Рис. 4. Микрофотографии кристаллической структуры осадков, выделенных из растворов НП-д (а), НП-д + УЗО (б), НП-д + УЗО + БС (в), НП-д + УЗО + СБС (г).

ТАБЛИЦА 2

Влияние условий обработки на температурные параметры раствора НП-д

Образец	Температура, °С		
	начала кристаллизации	максимальной скорости кристаллизации	застывания
НП-д	17.6	16.0	10.0
НП-д + УЗО	18.3	17.4	13.0
НП-д + УЗО + СБС	19.4	18.7	1.2
НП-д + УЗО + БС	20.7	19.8	3.5

так и СБС свидетельствует о ньютоновском течении неструктурированной системы.

Низкотемпературные свойства углеводородных систем можно характеризовать такими параметрами, как температуры начала кристаллизации, максимальной скорости кристаллизации и застывания (табл. 2). Для исследуемых систем прослеживается тенденция к увеличению температуры начала кристаллизации с 17.6 до 20.7 °С в ряду НП-д → НП-д + УЗО → НП-д + УЗО + СБС → НП-д + УЗО + БС (см. табл. 2). Такая же последовательность наблюдается для температуры максимальной скорости кристаллизации. Температура застывания (T_3) в растворах с добавкой смол, напротив, на 8–10 °С ниже, чем в исходной системе ($T_3 = 10$ °С). Внесение в обработанный раствор НП-д 0.3 мас. % БС способствует снижению T_3 на 6.5 °С. Максимальная депрессия T_3 (на 8.8 °С) раствора НП-д наблюдается в присутствии 0.3 мас. % СБС (см. табл. 2).

Изменение структурно-механических свойств растворов НП-д после УЗО и введения БС и СБС отражается на процессе осадкообразования. Добавка смол в раствор, обработанный ультразвуком, способствует снижению количества осадка, причем в присутствии БС ингибирование осадкообразования в исследуемом растворе выше (74 %), чем после введения СБС (37 %).

Структуру полученных осадков исследовали методом оптической микроскопии. Как видно на рис. 4, а, осадок исходного раствора НП-д представлен радиально-лучистыми кристаллическими агрегатами диаметром до 250 мкм и фибриллярными кристаллами длиной 30–240 мкм. После УЗО исследуемого раствора повышается степень дисперсности агрегатов (см. рис. 4, б). Совместное воздействие УЗО и нефтяных смол приводит к существенному изменению структуры кристаллизующегося нефтяного парафина: в присутствии БС формируется волокнистый осадок с элементами дендридов (см. рис. 4, в), а при добавлении СБС осадок представляет собой

систему дезориентированных стержнеобразных частиц (см. рис. 4, г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано влияние воздействия, включающего УЗО и введение БС или СБС, на структурно-механические свойства раствора НП-д. Независимо от структуры, нефтяные смолы, добавленные в предварительно обработанный раствор НП-д, способствуют улучшению вязкостно-температурных и энергетических параметров системы и снижают количество осадка. Введение нефтяных смол в раствор после УЗО сдвигает первую стадию кристаллизации (зарождение центров) в область более высоких температур и одновременно стабилизирует первичные кристаллические образования, изменяя форму и размеры кристаллов парафинов. Введение БС и СБС способствует формированию разупорядоченной структуры, что уменьшает затраты энергии на ее разрушение.

Согласно полученным результатам, СБС являются более сильными депрессорами вязкостно-температурных свойств. Это, вероятно, объясняется содержанием гетероатомов и большей длиной алкильных заместителей в ароматических и нафтеновых циклах молекул СБС по сравнению с БС. Поэтому СБС могут легче сорбироваться на поверхности зарождающихся кристаллов нефтяного парафина и препятствовать их росту с формированием трехмерной сетки.

Процесс осадкообразования в большей степени замедляется при добавке БС, что может быть обусловлено формированием кристаллов парафинов, на периферии которых содержится большее количество объемных конденсированных ароматических структурных фрагментов, предотвращающих агрегацию первичных кристаллических образований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Яценко И. Г. Вязкие и тяжелые нефти российской Арктики: проблемы рационального использования // Эколог. вестн. России. 2015. № 8. С. 26–30.
- 2 Эдер Л. В., Филимонова И. В., Немов В. Ю., Проворный И. А. Добыча, переработка и экспорт нефти и нефтепродуктов в России // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Науки о Земле. 2014. № 4. С. 83–97.
- 3 Лоскутова Ю. В., Прозорова И. В., Юдина Н. В. Улучшение структурно-реологических свойств высокопарафинистой нефти с помощью химических реагентов и вибрационной обработки // Химия и технология топлив и масел. 2011. № 5. С. 21–23.
- 4 Мусина Н. С., Марютина Т. А. Применение магнитной обработки для изменения состава и физико-химических свойств нефти и нефтепродуктов // Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71, № 1. С. 29–36.
- 5 Лоскутова Ю. В., Ивлева А. М., Юдина Н. В., Ремнев Г. Е. Результаты обработки высокосмолистых нефтей переменным ассиметричным током // Изв. вузов. Нефть и газ. 2012. № 4. С. 103–107.
- 6 Савиных Ю. В., Орловский В. М., Лоскутова Ю. В. Воздействие электронного пучка на вязкостные характеристики нефти // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 9–3. С. 131–134.
- 7 Ганиева Т. Ф., Фахрутдинов Р. З. Механико-акустическое воздействие на высоковязкую нефть // Вестн. Каз. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 1. С. 211–212.
- 8 Abramov V. O., Abramova A. V., Bayazitov V. M., Altunina L. K., Gerasin A. S., Pashin D. M., Mason T. J. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery // Ultrason. Sonochem. 2015. Vol. 25, No. 1. P. 76–81.
- 9 Litvinets I. V., Prozorova I. V., Yudina N. V., Kazantsev O. A., Sivokhin A. P. Effect of ammonium-containing polyalkyl acrylate on the rheological properties of crude oils with different ratio of resins and waxes // J. Pet. Sci. Eng. 2016. Vol. 146. P. 96–102.
- 10 Волкова Г. И., Шелест Н. Н., Прозорова И. В., Юдина Н. В. Влияние природы разбавителей на вязкость смолистых нефтей // Нефтепереработка и нефтехимия. 2011. № 1. С. 17–20.
- 11 Wang Z., Zeng J., Song H., Li F. Research on ultrasonic excitation for the removal of drilling fluid plug, paraffin deposition plug, polymer plug and inorganic scale plug for near-well ultrasonic processing technology // Ultrason. Sonochem. 2017. Vol. 36. P. 162–167.
- 12 Wang Z., Xu Y. Review on application of the recent new high-power ultrasonic transducers in enhanced oil recovery field in China // Energy. 2015. Vol. 89. P. 259–267.
- 13 Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S. B., Katti S. S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry // Ultrason. Sonochem. 2018. Vol. 42. P. 493–507.
- 14 Huang X., Zhou C., Suo Q., Zhang L., Wang S. Experimental study on viscosity reduction for residual oil by ultrasonic // Ultrason. Sonochem. 2018. Vol. 41. P. 661–669.
- 15 Mousavi S. M., Ramazani A., Najafi I., Davachi S. M. Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils // Pet. Sci. 2012. Vol. 9. P. 82–88.
- 16 Salehzadeh M., Akherati A., Ameli F., Dabir B. Experimental study of ultrasonic radiation on growth kinetic of asphaltene aggregation and deposition // Can. J. Chem. Eng. 2016. Vol. 94, No. 11. P. 2202–2209.
- 17 Петухова А. В., Калинина Т. В., Волкова Г. И. Влияние нефтяных смол и ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства раствора нефтяного парафина в декане // Вестн. Том. ун-та. 2017. № 7. С. 35–44.
- 18 Абрамов О. В., Абрамов В. О., Муллакаев М. С., Артемьев В. В. Анализ эффективности передачи ультразвуковых колебаний в нагрузку // Акустич. журн. 2009. Т. 55, № 6. С. 828–844.
- 19 Муллакаев М. С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов: Дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2011. 391 с.
- 20 Современные методы исследования нефтей: Справ.-метод. пособие / под ред. А. И. Богомолова, М. Б. Темялко, Л. И. Хотынцевой. Л.: Недра, 1984. 431 с.
- 21 Сафиева Р. З., Кошелев В. Н., Иванова Л. В. ИК-спектроскопия в анализе нефти и нефтепродуктов // Вестн. Башк. ун-та. 2008. Т. 13, № 4. С. 869–874.
- 22 Petrova L. M., Abbakumova N. A., Foss T. R., Romanov G. V. Structural features of asphaltene and petroleum resin fractions // Petroleum Chemistry. 2011. Vol. 51. P. 252–256.
- 23 Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 440 с.
- 24 Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности: сб. статей / под ред. А. К. Хорькова. Томск: ТГУ, 2002. Т. 2. 408 с.
- 25 Матвеев В. Н., Кирсанов Е. А., Ремизов С. В. Высокопарафинистая нефть как дисперсная система. Выбор уравнения течения // Коллоид. журн. 1994. Т. 56, № 3. С. 393–399.