

УДК 534.8

О НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В СУСПЕНЗИЯХ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПОНЕНТОВ НЕФТИ

© 2018 г. Б. Р. Ахметов^а, *, А. В. Вахин^а

^аКазанский федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий
420008 Казань, ул. Кремлевская 18, Россия

*e-mail: atalub@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.01.2018 г.

Представлены экспериментальные данные исследований частотной и концентрационной зависимостей дополнительного затухания ультразвуковых волн в образцах смесей асфальтенов в толуоле. Полученные результаты свидетельствуют, что дополнительное затухание определяется несколькими различными процессами и имеет релаксационный характер. Сопоставлением результатов с данными нескольких методов исследования аналогичных модельных дисперсных систем показывается, что изменения концентрационного коэффициента затухания и его частотной зависимости могут служить источниками дополнительной информации о структурных перестройках и фазовых переходах. Измерения частотной зависимости проводились в диапазоне 10–23 МГц. Концентрационная зависимость измерялась в том же диапазоне частот в пределах от 0.1 до 10 мас. %.

Ключевые слова: дисперсные системы, высокомолекулярные компоненты нефти, асфальтены, надмолекулярные комплексы, структурные перестройки, кластеры, коэффициент затухания, релаксационная теория, структурное поглощение

DOI: 10.1134/S0320791918050015

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к высокомолекулярным соединениям или компонентам нефти, так называемым смолисто-асфальтеновым веществам (САВ), вызван как общими задачами химии нефти, так и потребностями нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. В связи с истощением запасов месторождений легкой нефти и ростом потребления энергоносителей происходит активное вовлечение в разработку залежей тяжелой и битуминозной нефти, характеризующихся повышенным содержанием САВ. Наиболее высокомолекулярной частью САВ являются асфальтены (мол. масс. 300–1800 г/моль [1]), которые представляют собой в нормальных условиях твердые кристаллообразные вещества, хорошо смешивающиеся с ароматическими углеводородами и обладающие свойством выпадать в виде частиц твердой фазы при добавлении низкомолекулярных *n*-алканов. Молекулы асфальтенов построены из полициклических ароматических или нафтено-ароматических ядер, включающих гетероатомы (S, N, Cl, V, Ni, Fe и др.) и боковые заместители. Измерением молекулярной диффузии методами деполяризации флуоресценции с временным разрешением и спектроскопии ЯМР показано, что размер асфальтеновой молекулы варьирует в пределах 1.2–2.4 нм [1]. Асфальтены

характеризуются полярностью молекул, значительной поверхностной активностью и склонностью создавать надмолекулярные комплексы. Эти их свойства являются причиной различных осложнений при добыче, транспортировке и переработке сырья, таких как отложения на поверхности оборудования, стенках трубопроводов, выпадение в поровом пространстве пласта, снижение стабильности водонефтяных эмульсий при изменениях температуры, давления, состава флюида, сопровождающих технологические процессы. Определение условий начала структурообразования и флокуляции в модельных смесях позволяет разрабатывать различные способы модификации свойств САВ для снижения их негативного влияния и более рационального использования. В решении проблем, связанных с отложениями САВ и целенаправленным влиянием на свойства сырья, заинтересованы главным образом нефтедобывающие предприятия, поэтому благодаря финансированию в этом направлении уже довольно давно проводятся многочисленные исследования. Основные результаты и современные представления о природе асфальтенов систематизированы в весьма подробных обзорных публикациях [1, 2], в которых отмечается, что из-за дискуссионности многих вопросов, а иногда и противоречивости сведений, касающихся свойств

смола и асфальтенов, общепринятого мнения относительно механизмов структурных перестроек в природных и модельных нефтяных дисперсных системах еще не существует. Это связано с тем, что свойства исследуемых систем зависят от многих факторов, таких как условия катагенеза исходной нефти, тип асфальтенов, способ их выделения, время контакта с осадителем и т.д. Кроме того, в объеме концентрированных образцов смесей поглощается значительная часть зондирующего излучения, и процессы структурообразования изучаются в основном в тонких пленках или в разбавленных смесях, поэтому выводы для широкого диапазона концентраций и всего объема образца носят во многом гипотетический характер [1, 2]. Нерешенные вопросы химии высокомолекулярных соединений нефти требуют применения самых разнообразных методов анализа и сопоставления полученных данных. Одними из достаточных развитых методов наблюдения структурных перестроек являются методы молекулярной акустики, изучающей неравновесные процессы в жидких и газообразных средах и получившей в связи с развитием электроники и техники ультразвука широкое применение во многих областях физической химии.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Смесь выделенных стандартным способом [3] асфальтенов в толуоле при относительно небольших концентрациях (порядка 0.01 мас. % и выше) принято считать полидисперсной системой (суспензией), где дисперсионной средой является толуол, а диспергированной фазой – частицы асфальтенов различного типа. Ультразвуковые волны, распространяясь в такой смеси, взаимодействуют с множеством распределенных в ней неоднородностей, отличающихся друг от друга и от окружающей их среды своими энергетическими характеристиками. Наблюдения за большим количеством различных дисперсных систем свидетельствуют, что эти локальные неоднородности могут образовывать некоторую структуру или хаотично распределяться в среде, вступать в межфазное взаимодействие, коагулировать или диспергировать. Данные явления отражаются на картине акустического поля, тесно связанного с характеристиками среды [4].

Потери акустической энергии в гетерогенных системах в рамках моделей молекулярной акустики объясняются возбуждением в дисперсионной среде и диспергированной фазе вторичных волн [5]. Такие волны принято обозначать исходя из доминирующего механизма диссипации. К ним относятся: вязкостные волны, вызванные силами трения, возникающими вследствие разности инерционных свойств дисперсионной среды и диспергированной фазы; тепловые волны, обу-

словленные теплообменом между жидкостью и частицами; волны рассеяния, зависящие от разности волновых сопротивлений частиц и жидкости, а также потери в самих частицах. Таким образом, затухание звука в дисперсной системе можно представить как сумму ослабления звуковых волн в объеме дисперсионной среды и диспергированной фазы:

$$\alpha_{\text{дс}} = \alpha_0 + \Delta\alpha, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{дс}}$ – затухание звука в дисперсной системе, α_0 – затухание звука в дисперсионной среде и $\Delta\alpha$ – дополнительное ослабление акустических волн, связанное с возбуждением вторичных волн на частицах диспергированной фазы. Считается, что в области малых концентраций оно подчиняется правилу аддитивности:

$$\Delta\alpha = \alpha_s + \alpha_T + \alpha_\eta + \alpha_R, \quad (2)$$

где α_s – ослабление звука в результате рассеяния на частицах, α_T – обусловленное теплообменом между фазой и средой и α_η – вызванное трением, возникающим между частицами диспергированной фазы и средой, α_R – потери в самих частицах.

Для частиц сферической формы с диаметром много меньше длины волны и в случае, когда количество частиц, приходящихся на длину волны, невелико, были предложены различные выражения для этих коэффициентов, которые приведены в работах [5–7] и имеют вид

$$\alpha_\eta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{a\xi(1 + \sqrt{\xi})}{(1 + \sqrt{\xi})^2 + \xi(1 + b\sqrt{\xi})^2},$$

$$\xi = \frac{\omega\rho_1 r^2}{2\eta_1}, \quad a = \frac{2n}{9}(\gamma - 1)^2, \quad b = \frac{2}{9}(1 + 2\gamma), \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

$$\alpha_T = n \left(\frac{1}{6\chi_1}\right) T_{\text{ср}} \rho_1^2 C_{p1}^2 \left(\frac{1}{5} + \frac{\chi_1}{\chi_2}\right) \times \\ \times r^2 \omega^2 \left(\frac{\alpha_1}{\rho_1 C_{p1}} - \frac{\alpha_2}{\rho_2 C_{p2}}\right)^2, \quad (4)$$

$$\alpha_s = nk^4 r^3 \left[\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 2}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{3\beta_2}{3\lambda_2 + 2\mu_2}\right)^2 \right], \quad (5)$$

где ω – циклическая частота, n – объемная концентрация частиц, ρ – плотность среды, r – радиус частицы, η – коэффициент вязкости, χ – коэффициент теплопроводности, T – абсолютная температура, c – скорость звука, C_p – теплоемкость при постоянном давлении, k – волновое число, β – коэффициент сжимаемости, λ и μ – константы упругости. Индексы 1 и 2 относятся к дисперсионной среде и диспергированной фазе соответственно.

Исследования различных гетерогенных систем с помощью акустических методов ведутся с 1940-х годов, и результаты многих из них свидетельствуют о значительном отклонении экспериментальных данных от уравнения Стокса—Кирхгофа [4]. Полученные результаты часто хорошо описываются различными релаксационными теориями. Например, еще в работе [5] на основе релаксационной теории Мандельштама—Леонтовича, была рассмотрена возможность релаксации вязкостных потерь в суспензиях и высказано предположение, что диссипация акустической энергии, обусловленная трением между частицами и дисперсионной средой, зависит от соотношения между периодом волны и временем релаксации. В работах [6, 7] были рассмотрены возможные механизмы релаксации потерь, связанных с теплообменом, а также потерь, связанных со сдвигом фаз между давлением в акустической волне и сжатием частиц. Такой сдвиг фаз теоретически способен вызывать значительное дополнительное затухание, которое определяется как структурное. Сжатие и растяжение надмолекулярных комплексов под воздействием акустических волн сопровождается изменением формы и перестройкой их отдельных частей, при которых они переходят из одного равновесного состояния в другое за некоторое конечное время τ , называемое временем релаксации. На структурные перестройки затрачивается некоторая часть акустической энергии, при этом показывается, что если структурное поглощение превышает классические потери, то частотная зависимость дополнительного коэффициента затухания имеет релаксационный характер [8, 9].

Введение коэффициента дополнительного затухания удобно тем, что, измеряя непосредственно коэффициент затухания звука в дисперсной среде, а затем в образцах дисперсных систем, его можно вычислить как $\Delta\alpha = \alpha_{\text{дс}} - \alpha_0$. Сопоставляя его динамику с изменением внешних параметров и характеристик исследуемых смесей, а также с течением времени, в некоторых случаях можно на качественном уровне оценивать кинетику структурных перестроек, происходящих в сложных, не поддающихся строгому количественному расчету полидисперсных системах. Для двухкомпонентных смесей с известными физико-химическими свойствами диспергированной фазы и дисперсионной среды можно, решая численными методами уравнения (1)–(5), определить вклад каждого вида потерь в суммарное затухание и их динамику. Модели, подобные ЕСАН или ЕСАН/LB [10], позволяют оценивать размеры частиц и строить кривую их распределения или гранулометрический состав. Если исходить из гипотезы, что добавочное по сравнению с классическими потерями затухание ультразвуковых волн в мелкодисперсных взвесьях взаимодействующих частиц

связано со структурными эффектами, то из (1) можно определить коэффициент структурного поглощения [11]. Полученные экспериментальные данные указывают на релаксационный характер затухания ультразвуковых волн в суспензиях асфальтенов. Подобное явление обнаруживается также в образцах сырой нефти в толуоле [12], и это позволяет предположить, что путем сопоставления соответствующих частотных зависимостей затухания в достаточно широком диапазоне частот, в нефти и в отдельных ее компонентах можно оценить степень влияния на характеристики структурообразования различных фракций. Считается, что размер, форма упаковки надмолекулярных структур асфальтенов зависят во многом от концентрации и типа асфальтенов [1, 2, 13]. Таким образом, построение концентрационной зависимости дополнительного затухания в двухкомпонентной смеси “асфальтены—толуол” при постоянных параметрах и сопоставление ее с данными, полученными другими методами, является необходимым условием для оценки как измерительных возможностей используемой ультразвуковой техники, так и предложенного метода наблюдения структурных перестроек.

Измерительно-вычислительный комплекс Matec Zeta-APS компании Matec Applied Sciences (США) с помощью импульсного метода переменного расстояния позволяет определять частотную зависимость затухания ультразвуковых импульсов в изучаемом образце, а также электрокинетическую звуковую амплитуду сигналов, электропроводность и водородный показатель среды. Для оценки гранулометрического состава в программном обеспечении реализована модель зависимости между дополнительным затуханием и размером частиц, известная как ЕСАН [10]. Температура и равномерность распределения диспергированной фазы в объеме смеси поддерживаются с помощью нагревателя, встроенного термостата и лопастной мешалки. Рефлектор с помощью высокоточного механизма перемещается параллельно оси преобразователя, расположенного горизонтально, что уменьшает адгезию диспергированных частиц на поверхностях преобразователя и рефлектора и вызываемое ею искажение акустического поля. В настоящей работе использован пьезоэлектрический преобразователь с резонансной частотой 10 МГц, настроенный на работу в диапазоне 10–23 МГц.

Асфальтены были получены из нефти Ашальчинского месторождения осаждением в *n*-гептане в течение 24 ч и экстракцией в аппарате Сокслета. Перед измерениями навеска асфальтенов вводилась в объем толуола, после чего образец тщательно перемешивался и отстаивался в темном месте при комнатной температуре в течение 18–24 ч. Для толуола и для каждого образца были проведены серии экспериментов из пяти измерений при

температуре $25.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении. Измерения проводились в термостатируемой измерительной ячейке объемом 120 см^3 , выполненной из тетрафторэтилена, при постоянном перемешивании для равномерного распределения частиц и поддержания температуры в объеме образца. Масса навески асфальтенов и растворителя измерялась с точностью до 0.0001 г , относительная погрешность определения концентрации смеси составляла 0.1% . Относительная погрешность измерения коэффициента затухания была обусловлена погрешностью измерительных блоков комплекса и не превышала 5.0% для верхнего предела диапазона частот и расстояний между преобразователем и рефлектором.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

На рис. 1 приведены результаты измерений частотной зависимости дополнительного затухания $\Delta\alpha = \Delta\alpha/v^2$ для образцов с различной концентрацией асфальтенов. Из рисунка видно, что в рабочем диапазоне частот обнаруживаются один или несколько релаксационных процессов. То, что выражены они в области низких частот и при относительно высоких значениях концентрации, позволяет предположить, что при частотах меньших 10 МГц , так же как и в образцах сырой нефти [12], должны наблюдаться более четкие релаксационные участки. Вид полученной зависимости из-за узости рабочего диапазона не дает однозначного ответа на вопрос о доминирующих видах потерь. Релаксационный характер частотной кривой при относительно низких концентрациях обычно связывается с релаксацией сдвиговой и объемной вязкости и в меньшей степени теплообмена [4, 5]. Однако, исходя из современных представлений о строении и свойствах асфальтеновых комплексов, достаточно обоснованной является также гипотеза о влиянии на дополнительное затухание процессов, связанных с относительным движением агрегатов внутри комплексов. Результаты недавних исследований смесей асфальтенов в ароматических углеводородах указывают на существование в них нескольких видов иерархических структурных единиц с размерами и формой, определяющимися главным образом концентрацией и типом асфальтенов [13–15]. На рис. 2 показан снимок структурных единиц при массовом содержании асфальтенов 4.7% , полученный с помощью сканирующей электронной микроскопии. Как можно видеть, образуемые агрегаты представляют собой плотноупакованные блоки неправильной формы размерами от нескольких десятков до сотен нанометров. Тот факт, что блоки способны формировать кластеры, состоящие из нескольких единиц различного размера и массы, предполагает возможность воз-

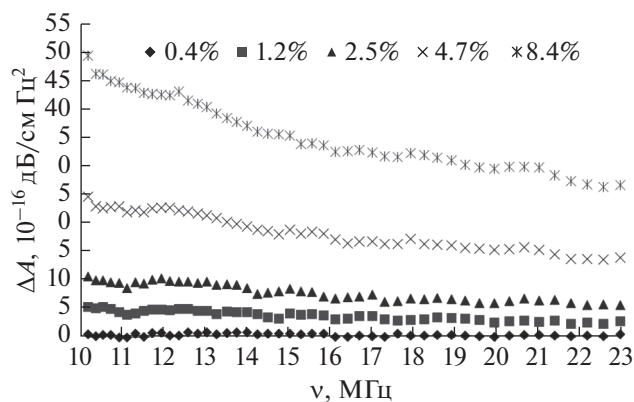


Рис. 1. Зависимость дополнительного затухания $\Delta\alpha$ от частоты ультразвука для образцов с 0,4, 1,2, 2,5, 4,7 и 8,4% массовой концентрации.

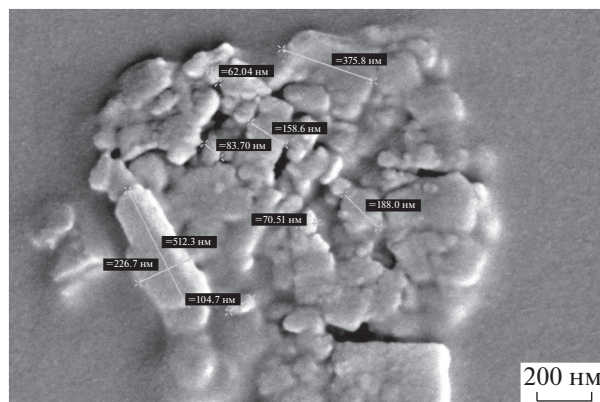


Рис. 2. Снимок надмолекулярных комплексов асфальтенов при концентрации 4.7 мас. \% .

никновения под действием ультразвука градиентов скорости и, соответственно, сдвиговых напряжений внутри кластеров, т.е. дополнительной диссипации. Тогда перераспределение акустической энергии в группах связанных частиц и между отдельными блоками может вызывать явление структурной релаксации, и структурные потери при соответствующих значениях частоты ультразвука будут играть значительную роль [11, 16]. К сожалению, ограниченность диапазона доступных частот не позволила определить времена и причину релаксационных процессов, и это предполагает проведение дополнительных измерений в области низких частот.

На рис. 3 показаны концентрационные зависимости дополнительного затухания $\Delta\alpha$ для частот $10, 12, 15, 20$ и 23 МГц . Из рисунка видно, что зависимость $\Delta\alpha(n_m)$ имеет близкий к линейному, с некоторыми особенностями, характер, и на ней можно условно выделить четыре области.

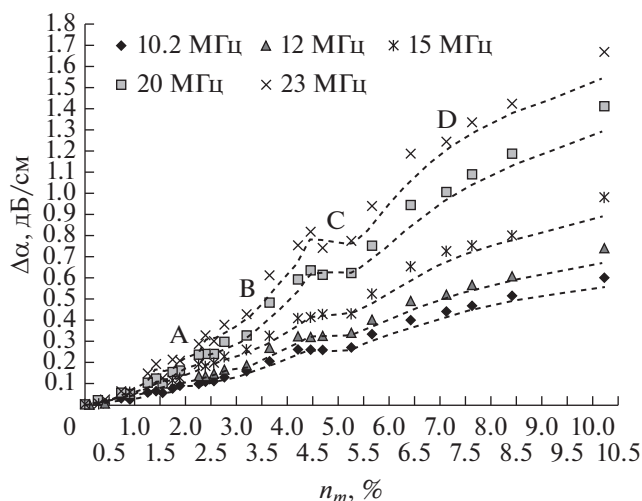


Рис. 3. Концентрационная зависимость дополнительного затухания $\Delta\alpha$ при частотах 10.2, 12, 15, 20 и 23 МГц.

1. Область А, $\sim 0\text{--}3\%$, где результаты экспериментов удовлетворительно согласуются с теоретическими представлениями о линейной зависимости между $\Delta\alpha$ и концентрацией частиц в смеси (1)–(5), которую можно представить в виде $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial n_m} = C$. Считается, что частицы асфальтенов в толуоле в этом диапазоне концентраций способны взаимодействовать и образовывать плотноупакованные структурные единицы или наноагрегаты размером до 300 нм [1, 2, 17]. Полученные результаты указывают, что такое, довольно существенное увеличение размера агрегатов на концентрационной кривой не отражается. Этот факт свидетельствует о том, что из-за относительно высокой погрешности измерения величины дополнительного затухания определить критическую концентрацию наноагрегирования (ККНА) [18] по изменению концентрационного коэффициента нельзя.

2. Область В, $\sim 3\text{--}4\%$ линейного роста, где ход концентрационной кривой немного меняется и $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial n_m} > C$. Увеличение концентрационного коэффициента может быть связано с тем, что при концентрациях около 3 мас. % и выше, в смеси возникает значительное взаимодействие между отдельными частицами, что приводит к образованию более крупных комплексов (кластеров) [2] и увеличению в них затухания и релаксации вязкости (рис. 1).

3. Область С, $\sim 4\text{--}5\%$, где $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial n_m} \ll C$, а выше 20 МГц меняет знак на противоположный. Ход кривой $\Delta\alpha(n_m)$ трудно объяснить исходя из суще-

ствующих представлений о строении и свойствах асфальтеновых кластеров. Одним из наиболее правдоподобных объяснений такого поведения кривой $\Delta\alpha(n_m)$ является наличие фазового перехода, на который также указывают результаты других методов исследования концентрационной кривой аналогичных модельных смесей. Так, например, значение концентрации в точке перехода от В к С на кривой $\Delta\alpha(n_m)$ согласуется с концентрацией фазового перехода [19], наблюдаемого в смеси асфальтенов месторождений Бузурган и Майя в толуоле. В выводах работы [19] также показывается, что фиксируемый с помощью метода диффузно-упорядоченной спектроскопии ЯМР ($^1\text{H DOSY NMR}$) фазовый переход сопровождается появлением в смеси двух семейств агрегатов с различными массами — микроагрегатов и наноагрегатов. Другим из объяснений поведения кривой $\Delta\alpha(n_m)$ является гипотеза о том, что при концентрациях порядка 4% часть агрегатов достигает максимально возможного размера, и дальнейший рост концентрации ведет к увеличению плотности упаковки кластеров и формированию иерархических пространственных структур [13–15]. Это обуславливает некоторое снижение акустических потерь в результате уменьшения инерционных характеристик частиц, а также за счет механизма рассеяния, т.е. вследствие того, что некоторая доля относительно небольших агрегатов оказывается в зонах тени крупных кластеров.

4. Область D, $\sim 5\text{--}10\%$, где зависимость $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial n_m} > C$, с некоторым отклонением от линейного хода. При таких концентрациях, исходя из данных, представленных в [2], предполагается существование рыхлой сетчатой структуры микрометровых размеров, в узлах которой находятся отдельные крупные кластеры. При этом часть диссипации определяется структурным поглощением, и частотная зависимость приобретает выраженный релаксационный характер (рис. 1). Рост концентрации смеси, исходя из такой модели, теоретически должен приводить к увеличению плотности образующейся сетки и снижению количества не связанных друг с другом надмолекулярных комплексов. Из-за значительного взаимодействия между отдельными микро- и нанообъектами и нарушения условия аддитивности (3)–(5) вклад отдельных видов потерь в общее затухание оценивать уже нельзя.

Общий вид частотной и концентрационной кривой (рис. 1, рис. 3) свидетельствует, что процессы структурообразования в смесях асфальтенов в толуоле сопровождаются изменением акустических характеристик. При концентрациях до 4%, к рассматриваемой смеси применима теория распространения ультразвука в микронеоднородных средах и тем самым сохраняется возможность

оценивать вклад в дополнительное затухание отдельных видов потерь по (1)–(5). Необходимо отметить, что для предварительной оценки концентрационной и частотной зависимостей как источников информации о структурных перестройках в работе были использованы полидисперсные смеси асфальтенов различных типов, без выделения низкомолекулярных и высокомолекулярных фракций А1 и А2 [13–15, 19]. Такая неоднородность диспергированной фазы не позволяет однозначно ответить также на вопрос о доминирующих механизмах релаксации и требует проведения отдельных исследований.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают, что коэффициент дополнительного затухания и концентрационный коэффициент могут служить достаточно информативными величинами для оценки структурных перестроек и фазовых переходов в смесях сильно взаимодействующих частиц высокомолекулярных компонентов нефти, в частности асфальтенов. Представляется интересным продолжение работ в области высоких концентраций, а также определение вклада в дополнительное затухание высокомолекулярных и низкомолекулярных асфальтенов (типов А1 и А2). Для изучения релаксационных эффектов целесообразным является проведение экспериментов в области частот меньше 10 МГц. Для более детального исследования структурообразования в смесях, приближенных по составу к природным нефтяным дисперсным системам, предполагается работа с модельными смесями, где дисперсионной средой служит смесь предельных и ароматических углеводородов. При достижении определенного соотношения количества *n*-алканов и аренов в смеси происходит флокуляция и осаждение отдельных агрегатов асфальтенов, что согласно полученным результатам должно повлечь за собой значительное изменение акустических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганеева Ю.М., Юсупова Т.Н., Романов Г.В. Асфальтеновые наноагрегаты: структура, фазовые превращения, влияние на свойства нефтяных систем // Успехи химии. 2011. Т. 80. № 10. С. 1034–1050.
2. Акбарзаде К., Хаммами А., Алленсон С., Крик Д., Джамалуддин А., Маршалл А., Маллинс О.К., Солбаккен Т. Асфальтены: проблемы и перспективы // Нефтяное обозрение. Лето 2007. С. 28–53.
3. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. Новосибирск.: Наука, 1995. 192 с.
4. Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики. М.: Наука, 1964. 516 с.
5. Рытов С.М., Владимирский В.В., Галанин М.Д. Распространение звука в дисперсных системах // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. № 5. С. 210–215.
6. Исакович М.Н. О распространении звука в эмульсиях // ЖЭТФ. 1948. Т. 18. № 10. С. 905–912.
7. Ратинская И.А. О затухании звука в эмульсиях // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 2. С. 210–215.
8. Temkin C., Dobbins R.A. Attenuation and dispersion of sound by particle-relaxation process // J. Acoust. Soc. Am. 1966. V. 40. № 2. P. 317–325.
9. Morley C.L. Sound attenuation by small particles in a fluid // J. Sound Vibr. 1968. V. 10. № 8. P. 156–170.
10. Epstein P.S., Carhart R.R. The absorption of sound in suspension and emulsion water fog in air // J. Acoust. Soc. Am. 1953. V. 25. № 3. P. 553–565.
11. Кольцова И.С., Михайлов И.Г., Трофимов Г.С. Структурная акустическая релаксация во взвешах взаимодействующих частиц // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 4. С. 582–586.
12. Vucek M., Marczak W. Ultrasonic studies of relaxation phenomena in crude oils and their solutions // J. de Physique. 2005. V. 129. P. 11–14.
13. Петрова Л.М., Аббакумова Н.А., Зайдуллин И.М., Борисов Д.Н. Фракционирование асфальтенов из тяжелой нефти полярным растворителем и их характеристика // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 2. С. 94–101.
14. Acevedo S., Castro A., Vasquez E., Marcano F., Ranaudo M. Investigation of physical chemistry properties of asphaltenes using solubility parameters of asphaltenes and their fractions A1 and A2 // Energy Fuels. 2010. V. 24. P. 5921–5933.
15. Сергун В.П., Коваленко Е.Ю., Сагаченко Т.А., Мин Р.С. Состав низкомолекулярных соединений асфальтенов тяжелой нефти месторождения Усинское // Нефтехимия. 2014. Т. 54. № 2. С. 83–88.
16. Кольцова И.С., Хомутова А.С. Поглощение ультразвуковых волн при динамических процессах в дисперсных системах // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 6. С. 668–674.
17. Долломатов М.Ю., Шуткова С.А., Дезорцев С.В. Структура молекулярных наночастиц нефтяных асфальтенов // Журн. структурной химии. 2012. Т. 53. № 3. С. 569–573.
18. Andreatta G., Bostrom N., Mullins O. High-Q ultrasonic determination of the critical nanoaggregate concentration of asphaltenes and the critical micelle concentration of standard surfactants // Langmuir. 2005. V. 21. P. 2728–2736.
19. Durand E., Clemancey M., Lancelin J.-M., Verstraete J., Espinat D., Quoineaud A.-A. Effect of chemical composition on asphaltene aggregation // Energy Fuels. 2010. V. 24. P. 1051–1062.