

УДК 541.64:547.39

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ АКРИЛАМИДА В ПОЛУРАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРАХ ЧЕРВЕОБРАЗНЫХ МИЦЕЛЛ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА

© 2023 г. А. С. Оспенников^а, А. В. Шibaев^{а,*}, А. И. Куклин^{б,с}, О. Е. Филиппова^а

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Физический факультет
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2, Россия

^бОбъединенный институт ядерных исследований
141980 Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 13, Россия

^сМосковский физико-технический институт
141701 Долгопрудный, Московская область, Институтский пер., 9, Россия

*e-mail: shibaev@polly.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 13.05.2023 г.

После доработки 19.09.2023 г.

Принята к публикации 29.09.2023 г.

Исследованы структура и реологические свойства водных растворов анионного поверхностно-активного вещества олеата калия и водорастворимого мономера акриламида до и после проведения радикальной полимеризации. В отсутствие мономера и в присутствии низкомолекулярной соли олеат калия образует сетку из длинных переплетающихся цилиндрических (червеобразных) мицелл. Добавление мономера не приводит к изменению их цилиндрической формы и радиуса, однако способствует трансформации разветвленных мицелл в линейные. После проведения полимеризации структура агрегатов ПАВ значительно изменяется — согласно данным нейтронного рассеяния она становится биконтинуальной, а ее локальная геометрия — ламелярной. Сосуществование такой структуры с макромолекулами полиакриламида в полуразбавленном растворе приводит к значительному синергетическому увеличению вязкости и модуля упругости.

DOI: 10.31857/S2308112023600060, EDN: DBWNGH

ВВЕДЕНИЕ

Свободнорадикальная полимеризация в водной среде является одним из наиболее простых и распространенных методов получения водорастворимых полимеров [1, 2]. Так, при помощи радикальной полимеризации получают незаряженные (например, полиакриламид [3]), анионные (например, полиакриловую, полиметакриловую и другие кислоты [4]) и катионные (например, поли(диаллилдиметиламмоний хлорид) [5]) полимеры. Для этого во многих случаях используют водорастворимые виниловые мономеры, содержащие двойную связь.

Часто полимеризацию проводят в водных растворах, содержащих ПАВ. За счет своего амфифильного строения молекулы ПАВ способны самоорганизовываться, образуя агрегаты различной формы — сферические и цилиндрические мицеллы, ламели, везикулы, биконтинуальные структуры и т.д. [6]. На поверхности агрегатов, которая контактирует с водой, находятся водорастворимые полярные группы молекул ПАВ, а их гидрофобные хвосты образуют ядро агрегата.

Сферические мицеллы ПАВ часто используют для мицеллярной сополимеризации водорастворимого гидрофильного и водонерастворимого гидрофобного мономеров [7]. Гидрофобный мономер сольбилизируется в ядрах мицелл, в то время как гидрофильный мономер находится в водной среде. Растущая полимерная цепь присоединяет к себе мономеры, находящиеся в воде, и когда она достигает мицеллы, к ней присоединяются все молекулы гидрофобного мономера, находящиеся внутри нее. Таким способом удается получать водорастворимые гидрофобно модифицированные полимеры с различной степенью блокности [8].

При проведении полимеризации в присутствии молекул ПАВ важно взаимное влияние компонентов системы друг на друга. Так, известно, что взаимодействие акриламида со сферическими мицеллами ПАВ влияет на протекание процесса полимеризации. Например, в работе [9] показано, что при концентрациях ниже критической концентрации мицеллообразования молекулы ПАВ не взаимодействуют с мономером, в то время как

при концентрациях катионных ПАВ выше критической концентрации мицеллообразования происходит падение скорости полимеризации и молекулярной массы получаемого полимера. Обнаружено, что как неионогенные, так и ионогенные ПАВ могут замедлять полимеризацию [10, 11]. Эти эффекты зависят от положения мономера во время полимеризации, который может находиться в водном растворе (если он является гидрофильным и водорастворимым), на поверхности мицелл (если мономер содержит слабо гидрофобный фрагмент) или в их гидрофобных ядрах (если мономер является гидрофобным).

Исследовано и влияние полимеризации на структуру сферических мицелл ПАВ. Например, показано, что мономер акриламид взаимодействует со сферическими мицеллами анионного ПАВ додецилсульфата натрия, что приводит к уменьшению их агрегационного числа и увеличению критической концентрации мицеллообразования [12]. Это объясняется наличием в молекуле акриламида слабо гидрофобного винилового фрагмента, ответственного за проникновение мономера в мицеллы. Вместе с тем получающийся после проведения полимеризации полиакриламид не взаимодействует с мицеллами [12] вследствие исчезновения двойной связи $C=C$ в его составе.

Влияние ПАВ на полимеризацию виниловых мономеров изучали в основном в случае, когда молекулы ПАВ образуют сферические мицеллы, находящиеся в режиме разбавленного раствора.

В то же время область, относящаяся к полимеризации в полуразбавленных растворах ПАВ, является практически не затронутой. Полуразбавленные растворы ПАВ могут содержать целый ряд различных структур, например цилиндрические или червеобразные мицеллы [13, 14], ламели, биконтинуальные структуры [15] и т.д. Исследование структурных переходов между ними, вызванных полимеризацией, представляет значительный интерес. Это связано с тем, что достаточно большие агрегаты ПАВ, например, червеобразные мицеллы, могут солибировать гораздо большие количества гидрофобных мономеров, чем сферические мицеллы [16], что важно для получения гидрофобно модифицированных полимеров с высокой степенью блочности [17]. Такие гидрофобно модифицированные полимеры могут использоваться для получения гидрогелей с высокой механической прочностью, обусловленной сильным гидрофобным взаимодействием между протяженными гидрофобными блоками и образованием сшивок в виде гидрофобных доменов с включенными в них гидрофобными группами различных макромолекул [18].

В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния полимеризации акри-

ламида на структуру и свойства мицеллярных агрегатов анионного ПАВ олеата калия в полуразбавленных растворах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для приготовления образцов использовали анионное ПАВ олеат калия (фирма TCI, степень чистоты 98%), соль хлорид калия (фирма "Acros", степень чистоты 99%), гидроксид калия (фирма "Acros", степень чистоты 98%), мономер акриламид (фирма "Sigma-Aldrich", степень чистоты 99%), инициатор персульфат аммония (фирма "Sigma-Aldrich", степень чистоты 99.8%), катализатор N,N,N',N' -тетраметилэтилендиамин (ТМЭДА, "Sigma-Aldrich", степень чистоты 99%). Все вещества использовали без предварительной очистки. Для приготовления растворов брали деионизированную дистиллированную воду, полученную на установке "Milli-Q" фирмы "Millipore Waters" (США). При проведении экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов использовали дейтерированную воду D_2O (фирма "Астрахим", изотопная чистота 99.99%).

Образцы в присутствии мономера готовили следующим образом. Олеат калия, хлорид калия и акриламид растворяли в воде при перемешивании в течение 1 суток. Затем рН растворов доводили до значения 10.7 добавлением 1 М водного раствора КОН и оставляли еще на 1 сутки до достижения равновесного состояния.

Образцы в присутствии полимера получали, проводя свободнорадикальную полимеризацию в смесях олеата калия, KCl и акриламида при комнатной температуре. Для этого к ним в качестве инициатора добавляли персульфат аммония и перемешивали на магнитной мешалке в течение 1 ч. Затем раствор продували азотом в течение 2 мин, добавляли катализатор ТМЭДА, интенсивно перемешивали в течение 10 с и оставляли образцы на 1 сутки.

Эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов проводили на спектрометре ЮМО реактора ИБР-2 в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) при 20°C. Детали экспериментов описаны в работе [19]. В качестве фонового раствора брали раствор хлорида калия в D_2O . Измерения проводили в специально сконструированных разборных кварцевых кюветках с зазором 2 мм, предназначенных для исследования растворов с высокой вязкостью и гелей. Кривые рассеяния аппроксимировали форм-фактором цилиндра с помощью программы SasView (<http://www.sasview.org/>).

Реологические исследования выполняли на ротационном реометре "Physica MCR301" ("Anton Paar", Австрия) с использованием измерительной ячейки конус—плоскость с радиусом 50 мм и углом

раствора конуса 1° при 20°C [20]. Измерения проводили при двух режимах воздействия на образец – ротационном и осцилляционном. В ротационном режиме к образцу прикладывали сдвиговую деформацию при постоянной скорости сдвига. В этих экспериментах определяли зависимость вязкости от скорости сдвига и максимальную ньютоновскую вязкость η_0 (вязкость при нулевой скорости сдвига). В осцилляционном режиме к образцу прикладывали переменную гармоническую сдвиговую деформацию и определяли упругую G' и вязкую G'' составляющие комплексного модуля упругости. Значения амплитуды деформации подбирали так, чтобы обеспечить проведение всех экспериментов в линейной вязкоупругой области, где модули накопленных G' и потерь G'' не зависят от амплитуды приложенного напряжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе изучено влияние мономера акриламида на водные растворы анионного ПАВ олеата калия в присутствии низкомолекулярной соли хлорида калия. Концентрацию ПАВ брали равной 14 мас. %, а концентрацию КСl 9 мас. %. Согласно данным малоуглового рассеяния нейтронов, при этих условиях в отсутствие акриламида в растворе образуются цилиндрические мицеллы (рис. 1): кривая рассеяния хорошо аппроксимируется моделью цилиндра с взаимодействиями исключенного объема. Радиус цилиндра равен 18.6 \AA , что близко к длине полностью вытянутого алкильного хвоста молекулы олеата калия (19 \AA) и совпадает с литературными данными для червеобразных молекул олеата калия [21, 22]. Концентрация ПАВ (14 мас. %) достаточно высокая и соответствует полуразбавленному режиму, в котором червеобразные мицеллы переплетаются и образуют сетку топологических зацеплений [23]. Мицеллы являются сильно разветвленными вследствие высокой концентрации низкомолекулярной соли КСl, которая экранирует электростатическое отталкивание между заряженными полярными головками молекул олеата калия, в результате чего расстояние между головками уменьшается, и оказывается выгодным образование разветвлений [24]. Наличие сильных взаимодействий исключенного объема – это следствие высокой концентрации ПАВ и высокой плотности мицеллярной сетки.

Частотные зависимости модуля накопленных G' и модуля потерь G'' для раствора в отсутствие акриламида имеют вид, типичный для сильно разветвленной мицеллярной сетки (рис. 2). Раствор характеризуется вязкоупругим поведением: при высоких частотах $G' > G''$, а в широком диапазоне низких частот $G' < G''$, при этом точка пересечения между кривыми $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ лежит в обла-

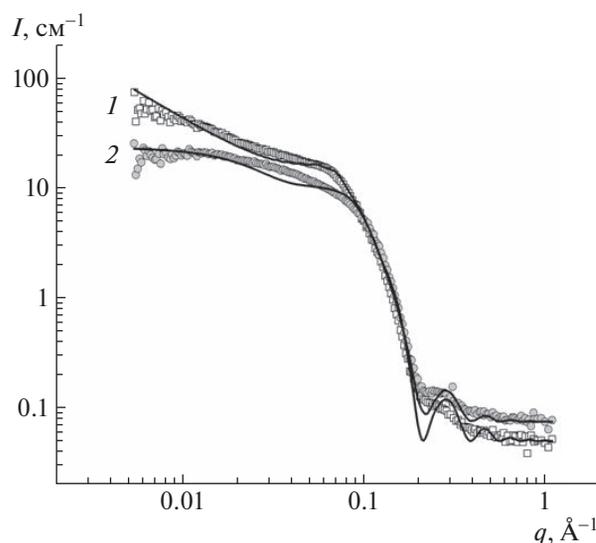


Рис. 1. Кривые малоуглового рассеяния нейтронов для растворов, содержащих 14 мас. % олеата калия и 9 мас. % хлорида калия в отсутствие (1) и в присутствии 8 мас. % акриламида (2). Растворитель D_2O , температура 20°C . Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных кривых моделью цилиндра со взаимодействием исключенного объема. Цветные рисунки можно посмотреть в электронной версии.

сти чрезвычайно высоких частот: $\omega_0 = 150 \text{ с}^{-1}$, что соответствует времени релаксации $\tau_0 = 1/\omega_0 = 0.007 \text{ с}$. Столь малое время релаксации является следствием наличия большого количества разветвлений, которые, в соответствии с литературными данными [25], способны к быстрой релаксации за счет скольжения точек ветвления вдоль участков цилиндрической мицеллы. При этом вязкость раствора достаточно велика и составляет 17 Па с (на четыре порядка больше вязкости воды), что обусловлено образованием мицеллярной сетки.

При добавлении акриламида вязкоупругие свойства растворов ПАВ становятся более выраженными (рис. 2). На зависимости $G'(\omega)$ появляется высокочастотное плато, которое расширяется при повышении концентрации мономера. Точка пересечения между кривыми $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ смещается в область меньших частот, что соответствует увеличению времени релаксации. В соответствии с литературными данными, полученными при значительно меньших концентрациях олеата калия [19, 26], подобное реологическое поведение обусловлено взаимодействием молекул акриламида с цилиндрическими мицеллами и их частичным проникновением в область полярных головок в мицелле. Это вызывает изменение упаковки молекул ПАВ, выражающееся в фактическом увеличении расстояния между полярными головками. В результате разветвления становятся

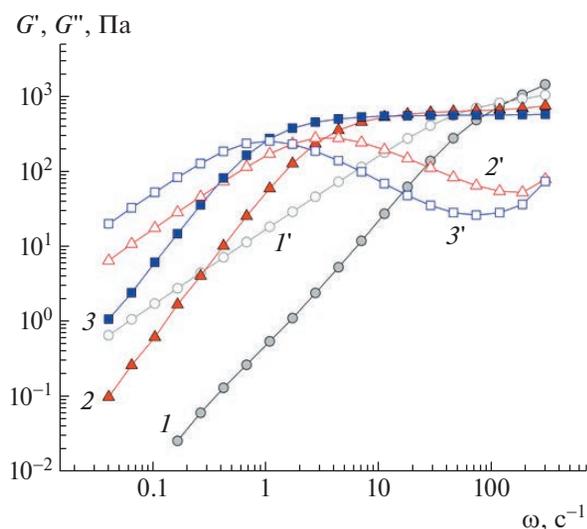


Рис. 2. Зависимости модуля накоплений G' (темные точки) и модуля потерь G'' (светлые) от угловой частоты ω для водных растворов, содержащих 14 мас. % олеата калия, 9 мас. % KCl и различные концентрации акриламида: 0 (1, 1'), 2 (2, 2'), 6 мас. % (3, 3'). Растворитель H_2O , температура $20^\circ C$.

менее энергетически выгодными, и происходит перестроение структуры мицелл с образованием более длинных агрегатов с меньшим количеством разветвлений, что приводит к усилению вязкоупругости, а также к увеличению вязкости (рис. 3). Максимум вязкости наблюдается при содержании акриламида 6 мас. %, что, по всей видимости, соответствует наиболее длинным линейным цилиндрическим мицеллам. При дальнейшем повышении концентрации акриламида вязкость падает (рис. 3), что является следствием уменьшения длины линейных цилиндрических мицелл, вызванного взаимодействием с мономером [26]. Тем не менее, в широком диапазоне концентраций акриламида (0–12 мас. %) вязкость растворов на четыре порядка превышает вязкость воды; это свидетельствует о сохранении сетки из переплетенных червеобразных мицелл. Данный факт подтверждается тем, что растворы сохраняют достаточно высокой модуль упругости G_0 (рис. 3). При добавлении небольших концентраций акриламида значение G_0 немного падает, что, в соответствии с литературными данными, происходит при уменьшении количества разветвлений в мицеллярной сетке [27]. При более высоких концентрациях акриламида G_0 остается практически постоянным, что характерно для линейных мицелл при постоянной концентрации ПАВ [27]. Согласно данным малоуглового рассеяния нейтронов, кривая рассеяния в присутствии акриламида хорошо описывается моделью цилиндра с радиусом 18.6 \AA и взаимодействиями исключенного объема (рис. 1). Таким образом, при добавлении акрила-

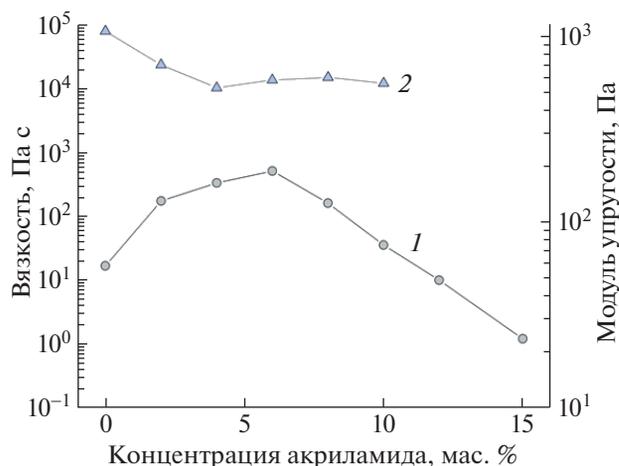


Рис. 3. Зависимости вязкости (1) и модуля упругости (2) от концентрации акриламида в водных растворах, содержащих 14 мас. % олеата калия и 9 мас. % KCl. Растворитель H_2O , температура $20^\circ C$.

мида к разветвленной мицеллярной сетке олеата калия сохраняется локальная цилиндрическая структура мицелл и не меняется их радиус, но мицеллы становятся менее разветвленными и затем трансформируются в линейные.

Для дальнейших исследований выбрана концентрация акриламида 8 мас. %, соответствующая полуразбавленному раствору линейных червеобразных мицелл с высокой вязкостью, и проведена радикальная полимеризация с образованием полиакриламида (ПАА) в присутствии мицеллярной сетки. После полимеризации структура агрегатов ПАВ значительно изменяется, что подтверждается данными малоуглового рассеяния нейтронов. На рис. 4 представлены кривые рассеяния от смесей ПАВ и ПАА после проведения полимеризации, а также от молекул ПАА, полученных в отсутствие ПАВ в аналогичных условиях. Видно, что интенсивность рассеяния от смесей ПАВ и ПАА на один–два порядка выше, чем интенсивность рассеяния от молекул ПАА, практически во всем диапазоне векторов рассеяния. Это свидетельствует о том, что агрегаты ПАВ вносят основной вклад в рассеяние, что обусловлено их большими размерами, чем у молекул ПАА.

Таким образом, кривые рассеяния от смеси ПАВ–ПАА в основном определяются структурой агрегатов ПАВ, которая значительно отличается от исходной структуры мицелл в отсутствие полимера (рис. 4). Как показано выше, до проведения полимеризации ПАВ образует червеобразные мицеллы как в отсутствие, так и в присутствии акриламида (рис. 1). После полимеризации форма кривой существенно меняется: при промежуточных векторах рассеяния появляется выраженный структурный пик, а при малых q наблюдается на-

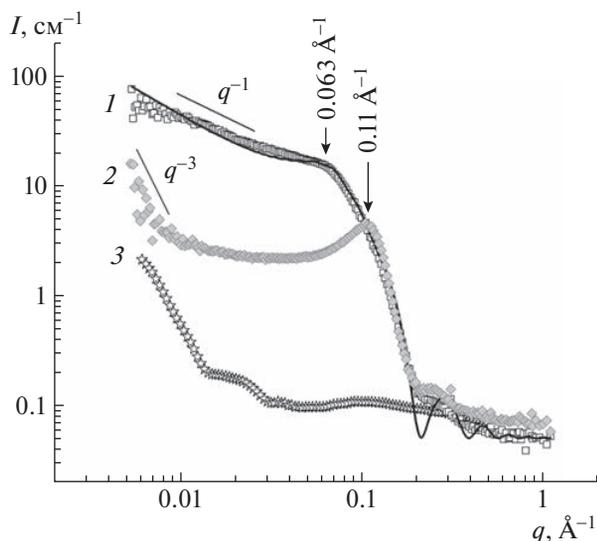


Рис. 4. Кривые малоуглового рассеяния нейтронов для растворов, содержащих 14 мас. % олеата калия и 9 мас. % хлорида калия в отсутствие (1) и в присутствии 8 мас. % ПАА (2), а также 8 мас. % ПАА в отсутствие ПАВ (3). Растворитель D_2O , температура $20^\circ C$.

клон $I \sim q^{-3}$, что характерно для биконтинуальной структуры, имеющей локальную плоскую (ламелярную) геометрию [28]. В такой структуре, в отличие от сетки цилиндрических мицелл, все части системы связаны друг с другом, т.е. молекулы ПАВ образуют единый агрегат. При этом толщина ламелярной структуры составляет 40 \AA , что вдвое больше длины полностью вытянутого хвоста молекулы олеата калия.

В смесях ПАВ–ПАА наблюдается синергетическое увеличение вязкоупругости по сравнению

с компонентами – раствором червеобразных мицелл ПАВ без ПАА, а также раствором молекул ПАА, полученным без ПАВ в аналогичных условиях (рис. 5). При концентрации 8 мас. % раствор ПАА без ПАВ является полуразбавленным, что подтверждается высокой вязкостью при нулевой скорости сдвига (2 Па с) и наличием вязкоупругих свойств. Вязкость смеси ПАВ–ПАА составляет 600 Па с, что практически на два порядка превышает вязкость каждого из компонентов. Вязкоупругие свойства смеси также значительно более выражены, чем у компонентов: на зависимости $G'(\omega)$ появляется выраженное упругое плато, а точка пересечения кривых $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ смещается влево, что соответствует значительному увеличению времени релаксации по сравнению с компонентами.

Подобный синергетический эффект может быть объяснен микрофазным разделением, возникающим в смесях ПАА и ПАВ. Микрофазное разделение характерно для смесей агрегатов ПАВ и гидрофильных водорастворимых полимеров [29, 30] и заключается в образовании двух типов микродоменов, обогащенных либо молекулами ПАВ, либо полимером. Возникновение микрофазного разделения подтверждается данными малоуглового рассеяния нейтронов. Так, до проведения полимеризации на кривой рассеяния виден очень слабо выраженный структурный пик при $q^* = 0.063 \text{ \AA}^{-1}$, возникающий из-за объемных взаимодействий между мицеллами. После полимеризации структурный пик становится явно выраженным и смещается в область больших векторов рассеяния ($q^* = 0.11 \text{ \AA}^{-1}$), что свидетельствует об уменьшении среднего расстояния d между агрегатами ПАВ, которое связано с положением

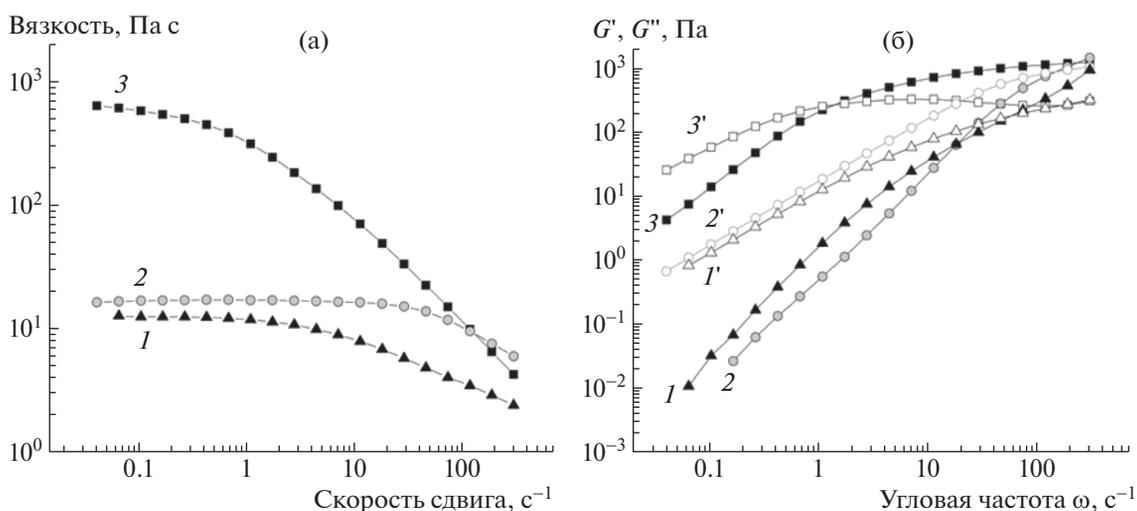


Рис. 5. Зависимости вязкости от скорости сдвига (а), модуля накоплений G' (темные точки) и модуля потерь G'' (светлые) от угловой частоты ω (б) для водных растворов, содержащих 8 мас. % ПАА (1, 1'), 14 мас. % олеата калия и 9 мас. % КСl (2, 2'), а также 14 мас. % олеата калия, 9 мас. % КСl и 8 мас. % ПАА (3, 3'). Растворитель H_2O , температура $20^\circ C$.

структурного пика формулой $d = 2\pi/q^*$ [31]. Так как в процессе полимеризации концентрация ПАВ остается постоянной, смещение структурного пика свидетельствует о локальном концентрировании молекул ПАВ в своих микродоменах.

По всей видимости, микрофазное расслоение, вызванное полимеризацией, является причиной структурного перехода от червеобразных мицелл ПАВ к биконтинуальной структуре. Действительно, биконтинуальные структуры наблюдали в растворах при более высоких концентрациях ПАВ [32]. При выбранной же в работе концентрации ПАВ (14 мас. %) еще образуются цилиндрические мицеллы. Формирование микродоменов приводит к локальному концентрированию молекул ПАВ, что вызывает трансформацию цилиндрических мицелл в биконтинуальную структуру.

Таким образом, после проведения полимеризации формируется биконтинуальная структура, образованная молекулами ПАВ, в которую внедрены макромолекулы ПАА. Насколько нам известно, подобные структуры ранее не были описаны в литературе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом малоуглового рассеяния нейтронов показано, что полимеризация водорастворимого мономера акриламида в полуразбавленных растворах анионного ПАВ олеата калия приводит к изменению структуры агрегатов, образованных молекулами ПАВ, из цилиндрической в биконтинуальную. В смесях ПАВ с биконтинуальной структурой и молекул полиакриламида наблюдается значительное усиление вязкоупругих свойств по сравнению с компонентами, обусловленное микрофазным разделением с образованием доменов, обогащенных либо молекулами ПАВ, либо полимером.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-73-10197).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семчиков Ю.Д. Высокомолекулярные соединения. М.: Академия, 2008.
2. Gur'eva L.L., Tkachuk A.I., Estrin Ya.i., Komarov B.A., Dzhavadyan E.A., Estrina G.A., Bogdanova L.M., Surkov N.F., Rozenberg B.A. // *Polymer Science A*. 2008. V. 50. № 3. P. 283.
3. Kulichikhin S.G., Malkin A.Ya., Polushkina O.M., Kulichikhin V.G. // *Polym. Eng. Sci.* 1997. V. 37. № 8. P. 1331.
4. Fischer E.J., Storti G., Cuccato D. // *Processes*. 2017. V. 5. № 2. P. 23.
5. Jaeger W., Hahn M., Lieske A., Zimmermann A., Brand F. // *Macromol. Symp.* 1996. V. 111. № 1. P. 95.
6. Evans F.D., Wennerström H. *The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology, and Technology Meet*. New York: Wiley-VCH, 1999.
7. Hill A., Candau F., Selb J. // *Macromolecules*. 1993. V. 26. № 17. P. 4521.
8. Candau F., Biggs S., Hill A., Selb J. // *Prog. Org. Coat.* 1994. V. 24. № 1–4. P. 11.
9. Friend J.P., Alexander A.E. // *J. Polym. Sci., Polym. Chem.* 1968. V. 6. P. 1833.
10. Niranjani P.S., Tiwari A.K., Upadhyay S.K. // *J. Appl. Polym. Sci.* 2011. V. 122. P. 981.
11. Barthelet C., Wilson J., Cadix A., Destarac M., Chassenieux C., Harrisson S. // *J. Polym. Sci., Polym. Chem.* 2018. V. 56. № 7. P. 760.
12. Sabbadin J., François J. // *Colloid Polym. Sci.* 1980. V. 258. P. 1250.
13. Dreiss C.A. // *Soft Matter*. 2007. V. 3. № 8. P. 956.
14. Shibaev A.V., Osipov A.A., Philippova O.E. // *Gels*. 2021. V. 7. № 4. P. 258.
15. Israelachvili J.N., Mitchell D.J., Ninham B.W. // *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 2*. 1976. V. 72. P. 1525.
16. Bergström L.M. // *AIP Adv.* 2018. V. 8. № 5. P. 055136.
17. Can V., Kochovski Z., Reiter V., Severin N., Siebenburger M., Kent B., Just J., Rabe J.P., Ballauf M., Okay O. // *Macromolecules*. 2016. V. 49. № 6. P. 2281.
18. Tuncaboylu D.C., Sari M., Oppermann W., Okay O. // *Macromolecules*. 2011. V. 44. № 12. P. 4997.
19. Shibaev A.V., Ospennikov A.S., Kuznetsova E.K., Kuklin A.I., Aliev T.M., Novikov V.V., Philippova O.E. // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. P. 4445.
20. Shibaev A.V., Smirnova M.E., Kessel D.E., Bedin S.A., Razumovskaya I.V., Philippova O.E. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 1271.
21. Roland S., Miquelard-Garnier G., Shibaev A.V., Aleshina A.L., Chennevière A., Matsarskaia O., Sologoub C., Philippova O.E., Iliopoulos I. // *Polymers*. 2021. V. 13. P. 4255.
22. Shibaev A.V., Aleshina A.L., Arkharova N.A., Orekhov A.S., Kuklin A.I., Philippova O.E. // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. № 12. P. 2353.
23. Molchanov V.S., Philippova O.E. // *Colloid J.* 2009. V. 71. № 2. P. 239.
24. Calabrese M.A., Wagner N.J. // *ACS Macro Lett.* 2018. V. 7. № 6. P. 614.
25. Lequeux F. // *Europhys. Lett.* 1992. V. 19. P. 675.
26. Ospennikov A.S., Gavrillov A.A., Artykulnyi O.P., Kuklin A.I., Novikov V.V., Shibaev A.V., Philippova O.E. // *J. Colloid Interface Sci.* 2021. V. 602. P. 590.
27. Oelschlaeger C., Schopferer M., Scheffold F., Willenbacher N. // *Langmuir*. 2009. V. 25. № 2. P. 716.
28. Grillo I. // *Soft Matter Characterization* / Ed. by R. Borsali, R. Pecora. Springer, 2008. P. 723.
29. Li X., Lin Z., Cai J., Scriven L.E., Davis H.T. // *J. Phys. Chem.* 1995. V. 99. P. 10865.
30. Shibaev A.V., Kuklin A.I., Torocheshnikov V.N., Orekhov A.S., Roland S., Miquelard-Garnier G., Matsarskaia O., Iliopoulos I., Philippova O.E. // *J. Colloid Interface Sci.* 2022. V. 611. P. 46.
31. Gamez-Corrales R., Berret J.-F., Walker L.M., Oberdisse J. // *Langmuir*. 1999. V. 15. P. 6755.
32. Salentini S., Sagalowicz L., Glatter O. // *Langmuir*. 2010. V. 26. № 14. P. 11670.