

УДК 541(64+49):546.223-2'13

САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ ЧАСТИЦЫ ПОЛИМЕР-КОЛЛОИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ N,N'-ДИАЛЛИЛ-N,N'-ДИМЕТИЛАММОНИЙ ХЛОРИДА С ДИОКСИДОМ СЕРЫ РАЗЛИЧНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ

© 2023 г. М. С. Бабаев^{а,*}, С. В. Колесов^а

^аИнститут органической химии Уфимского научного центра Российской академии наук
450054 Уфа, пр. Октября, 71, Россия

*e-mail: b.marat.c@mail.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 16.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Исследовано образование полимер-коллоидных комплексов при взаимодействии сополимеров N,N'-диаллил-N,N'-диметиламмоний хлорида и диоксида серы различной молекулярной массы и додецилсульфата натрия. Комплексы охарактеризованы методами турбидиметрического титрования и лазерной дифракции/рассеяния света. Средний размер частиц полимер-коллоидных комплексов в зависимости от состава реакционной смеси и молекулярной массы полиэлектролита изменяются в интервале 150–200 нм. Определены критические концентрации агрегации додецилсульфата натрия в присутствии сополимеров различной молекулярной массы. Показано, что молекулярная масса поликатиона оказывает значительное влияние на границы области появления фазы полимер-коллоидных комплексов и размер их частиц. Оценена способность частиц комплексов солюбилизовать молекулы плохо растворимых в воде веществ.

DOI: 10.31857/S2308113923700298, EDN: PHTSIN

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие противоположно заряженных полиэлектролитов и ионогенных ПАВ при определенных соотношениях компонентов приводит к образованию стабильных коллоидных дисперсий в водной среде. В таких дисперсиях большая часть противоионов ПАВ электростатически присоединяется к полиэлектролитам, формируя комплексы, которые принято называть полимер-коллоидными (ПКК) [1]. Заметный вклад в развитие теории образования и организации ПКК внесли В.А. Кабанов и А.Б. Зезин [2, 3]. Механизмы образования ПКК и влияние кинетических факторов на процессы взаимодействия в системах ПАВ–полиэлектролит описаны в работах [4–7]. Интерес к ПКК обусловлен широкими возможностями их практического применения, например в качестве флокулянтов [8]. ПКК оказались также весьма эффективными средствами для извлечения из водных сред растворенных или диспергированных в них органических веществ различной природы [8, 9]. Сегодня ПКК привлекают внимание исследователей в основном как носители лекарственных средств [10–13]. Помимо электростатических взаимодействий, комплексы могут быть стабилизированы гидрофоб-

ными взаимодействиями [1, 14, 15]. Взаимодействие полиэлектролитов с противоионами ПАВ может приводить к образованию нерастворимых продуктов [6, 16].

Стабильность дисперсий комплексов в водной среде зависит не только от соотношения компонентов, но и от лиофилизирующей способности полиэлектролитов [17]. Несмотря на обширные исследования ПКК, физико-химическое поведение этих коллоидных систем остается не до конца ясным, отчасти потому, что процессы самосборки при взаимодействии полиэлектролитов и поверхностно-активных веществ приводят к формированию неравновесных комплексов [18]. Неравновесный характер процесса комплексообразования растворов полиэлектролит–ПАВ оказывает чрезвычайно сильное влияние на межфазные свойства таких систем, как недавно было установлено R.A. Campbell и I. Varga [19, 20]. Динамика таких полимерных систем чувствительна к молекулярной массе [21]. Большинство исследований в литературе сосредоточено на полиэлектролитах с высокой молекулярной массой из-за их полезного реологического и (де)стабилизирующего характера [22]. Однако в целом влияние данного фактора неоднозначно и трудно

Таблица 1. Условия сополимеризации и характеристики сополимеров ДАДМАХ с диоксидом серы

Сополимер	Среда	Инициатор	Содержание инициатора, мас. %	T , К	$[\eta]$, дл/г	$M_z \times 10^{-3}$
I	Вода	Персульфат калия	0.2	293	0.09	3
II	Вода	УФ-облучение	–	293	0.24	15
III	ДМСО	ДАК	0.5	293	0.31	35
IV	ДМСО	ДАК	0.5	333	0.51	65

предсказуемо [23–25]. Настоящая работа посвящена изучению влияния молекулярной массы сополимера N,N' -диаллил- N,N' -диметиламмоний хлорида (ДАДМАХ) с диоксидом серы на процесс формирования ПКК с додецилсульфатом натрия (ДДС) и размер частиц комплекса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сополимеры N,N' -диаллил- N,N' -диметиламмоний хлорида с двуокисью серы различной молекулярной массы синтезировали из соответствующих мономеров радикальной полимеризацией при эквимольном составе реакционной смеси и суммарной концентрации мономеров 46 мас. % по известной методике [26]. Условия полимеризации, характеристическая вязкость и молекулярные массы всех сополимеров приведены в табл. 1. Полимеризацию прерывали охлаждением и последующим осаждением полимеров в ацетон. Очистку проводили трехкратным переосаждением из водного раствора в ацетон, далее сушили в вакууме при 50°C до постоянной массы. Чистоту сополимеров контролировали методом ЯМР-спектроскопии и по данным элементного анализа [11, 26]. Полученные сополимеры являются регулярно чередующимися и имеют соотношение звеньев ДАДМАХ : диоксид серы = 1 : 1 [26].

Характеристическую вязкость растворов полиэлектролитов $[\eta]$ (дл/г) определяли методом капиллярной вискозиметрии (вискозиметр Уббе-лоде, 0.1 Н водный раствор NaCl, $25 \pm 0.01^\circ\text{C}$). Молекулярную массу полимеров находили методом седиментационного равновесия и рассчитывали по уравнению

$$M_z = \frac{RT}{(1 - \mu\rho_0)\omega^2} \text{tg}\alpha$$

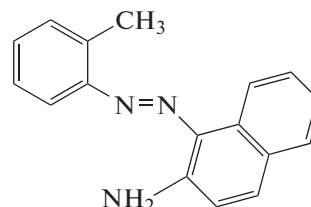
Здесь R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; ω – угловая скорость вращения ротора ультрацентрифуги ($\omega = 2\pi n$, где n – число оборотов ротора в минуту); α – угол наклона зависимости Z/X от концентрации раствора c , (X – расстояние от оси вращения ротора до точки кривой на снимке, $Z = dc/dX$ – высота градиентной кривой (градиент концентрации) в дан-

ной точке); $(1 - \nu\rho_0)$ – архимедов множитель (ν – удельный парциальный объем полимера, ρ_0 – плотность растворителя).

Дисперсии частиц ПКК получали путем смешения водных растворов ДАДМАХ–диоксид серы и ДДС при определенном мольном соотношении компонентов $z = [\text{ДДС}] : [\text{ДАДМАХ}]$. Турбидиметрическое титрование проводили способом, описанным в работе [27]. Исходные концентрации ДАДМАХ–диоксид серы (по мономерным звеньям ДАДМАХ) и ДДС составляли 2 и 1.5 ммоль/л соответственно, концентрация ПКК в растворе 0.05–0.2 мас. %.

Размер частиц ПКК определяли на дифракционном анализаторе размеров частиц “SALD-7101 Shimadzu”, принцип работы которого основан на статическом рассеянии лазерного света с длиной волны $\lambda = 375$ нм. Размер частиц вычисляли автоматически с помощью программного комплекса прибора “WingSald II”. Результат вычисления размеров представлен в виде зависимости диаметра частиц d (нм) от их числовой доли q (%). Прибор калибровали с использованием специального калибровочного образца МВР 1-10 таким образом, чтобы определяемые значения размеров частиц МВР 1-10 расходились не более чем на 3% с паспортными данными.

Критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ) и критическую концентрацию агрегации (ККА) ДДС оценивали методом солюбилизации маслорастворимого красителя Oil Yellow OB [28]



Критическая концентрация мицеллообразования ДДС в воде составила 8 ммоль/л, что соответствует справочным данным [29].

Солюбилизующую способность частиц ПКК определяли следующим образом. К 10 мл раствора ПКК при $z = 0.3$ добавляли 10 мг красителя.

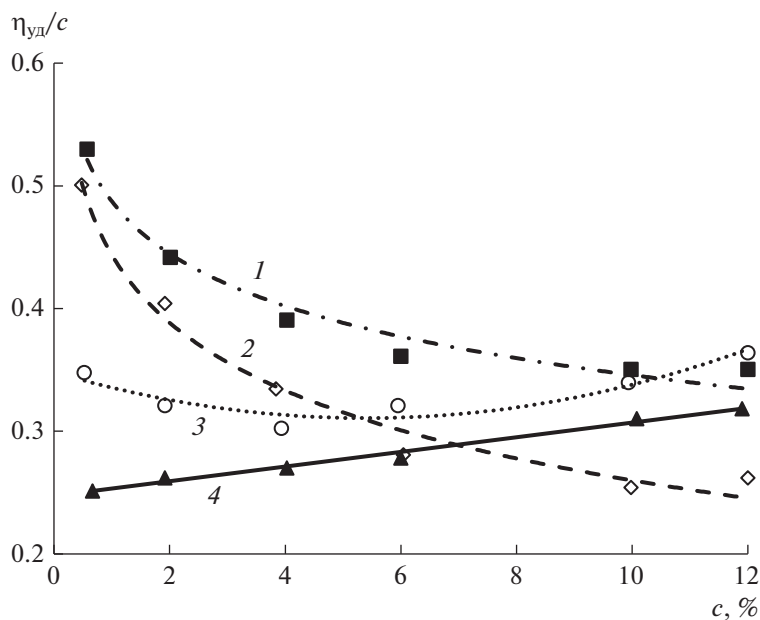


Рис. 1. Зависимость приведенной вязкости от концентрации сополимера II в воде (1) и в водных растворах NaCl с концентрацией 0.001 (2), 0.05 (3) и 0.1 моль/л (4) при 298 К.

Концентрация ПКК в растворе составляла 0.1 мас. %. Растворами сравнения служили дистиллированная вода и водный раствор ДАДМАХ—диоксид серы I ([ДАДМАХ] = 2 ммоль/л, что соответствует концентрации ДАДМАХ в растворах ПКК), в которые также добавляли навеску красителя. Полученные растворы красителя выдерживали при перемешивании в течение 7 суток для достижения равновесного значения оптической плотности. Далее растворы центрифугировали при скорости вращения ротора 6000 оборотов/мин в течение 30 мин для удаления избытка красителя и измеряли оптическую плотность. В случае образцов ПКК с красителем растворы предварительно разбавляли в 5 раз. Оценку повышения растворимости красителя в присутствии ПКК проводили по формуле, адаптированной в соответствии с законом Бугера—Ламберта—Бера

$$S = \frac{A_{PSC/dye} \cdot k - A_{PSC}}{A_{dye}},$$

где S — безразмерная величина, характеризующая кратность увеличения растворимости красителя; $A_{PSC/dye}$, A_{PSC} и A_{dye} — оптическая плотность растворов смеси красителя и ионных комплексов, ионных комплексов и красителя в дистиллированной воде соответственно; k — коэффициент разбавления раствора. Во всех случаях оптическую плотность определяли при длине волны $\lambda_{max} = 432$ нм, соответствующей максимуму поглощения красителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные сополимеры ДАДМАХ—диоксид серы различной молекулярной массы представляют собой гигроскопичные соединения желтоватого цвета, растворимые в воде и не растворимые в органических растворителях. Ранее было показано, что состав сополимеров не зависит от соотношения мономеров в исходной смеси, температуры протекания реакции, среды (вода, ДМСО), характера иницирования (вещественное или УФ). Во всех случаях образуются чередующиеся сополимеры с соотношением звеньев ДАДМАХ : диоксид серы = 1 : 1 [26]. При определении приведенной вязкости обнаруживается полиэлектролитный эффект (рис. 1). Предварительно исследовали влияние добавок NaCl на линейаризацию концентрационной зависимости приведенной вязкости. Полиэлектролитный эффект подавляется при концентрации соли выше 0.05 Н; в 0.1 Н растворе полиэлектролитный эффект гарантировано подавлен (рис. 1).

Характеристическая вязкость $[\eta]$ и соответственно молекулярная масса полимера существенно зависят от среды и способа иницирования полимеризации (табл. 1). Значения $[\eta]$ для сополимеров, полученных в водной среде, ниже — 0.09 (персульфат калия, 293 К) и 0.24 дл/г (УФ-облучение, 293 К), чем для сополимеров, синтезированных в среде ДМСО — 0.31 (ДАК, 293 К) и 0.51 дл/г (ДАК, 333 К). Исследования показали, что ММ сополимера зависит также от способа иницирования. Для образцов I, II, III и IV она составляет 3×10^3 , 15×10^3 , 35×10^3 и 65×10^3 при

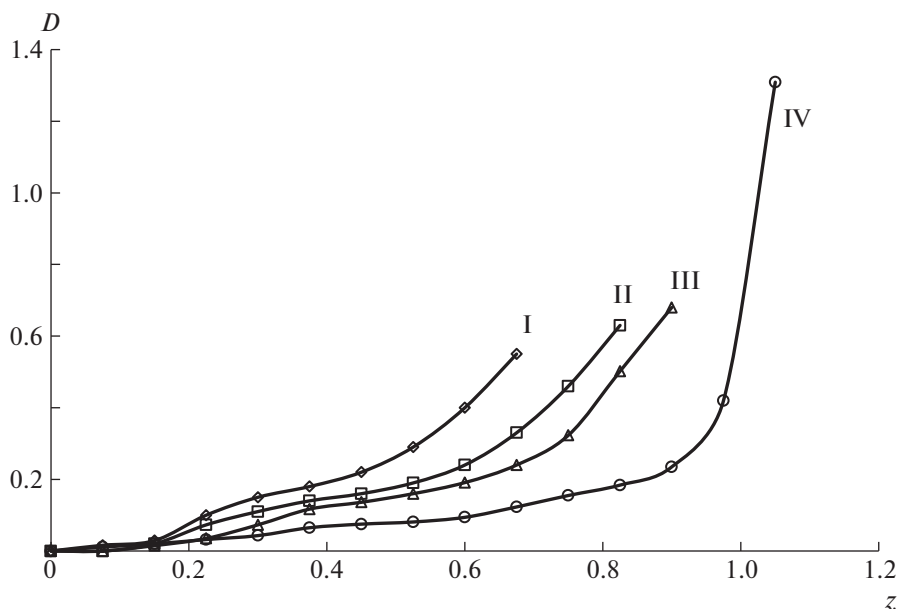
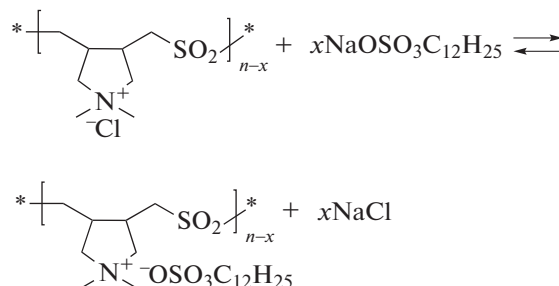


Рис. 2. Кривые турбидиметрического титрования растворов ДАДМАХ–диоксид серы раствором ДДС. Молекулярная масса ДАДМАХ–диоксид серы $M \times 10^{-3} = 3$ (I), 15 (II), 35 (III) и 65 (IV).

инициировании полимеризации персульфатом калия, УФ-облучением и ДАК соответственно.

Полимеры ДАДМАХ представляют собой полиэлектролиты катионного типа и способны вступать в реакции ионного обмена с органическими противоионами. Лиофилизующая способность полиэлектролита определяется эффективным зарядом полимерной цепи, а также наличием полярных и неполярных групп в составе макромолекулы, которые могут давать как положительный, так и отрицательный вклад в ее лиофилизующую способность, что выражается в изменении величины $z_{\text{пред}}$ [13]. Для оценки лиофилизующей способности полимеров ДАДМАХ–диоксид серы в зависимости от молекулярной массы проводили турбидиметрическое титрование водных растворов ДАДМАХ–диоксид серы раствором ДДС. Додецилсульфат натрия является анионным ПАВ, который используют для оценки лиофилизующей способности катионных полиэлектролитов [17, 27]. Механизм связывания гомополимера и ДДС был всесторонне изучен методами калориметрии, определения дзета-потенциала и электропроводности, а также квантово-механическими расчетами [30]. Показано, что взаимодействие ПАВ–полиэлектролит определяется как электростатическими, так и гидрофобными взаимодействиями и является кооперативным. Кооперативные взаимодействия приводят к образованию нано- и микрочастиц, которые заряжены положительно или отрицательно в зависимости от мольного соотношения компонентов z . Электростатические взаимодействия

ДАДМАХ–диоксид серы с ДДС можно представить следующей схемой [11]:



На рис. 2 приведены кривые турбидиметрического титрования растворов сополимеров ДАДМАХ–диоксид серы различной молекулярной массы раствором ДДС. Как видно, независимо от молекулярной массы полиэлектролита область составов реакционной смеси, в которой система остается гомогенной, отвечает интервалу $0 < z < 0.15$. Данная область соответствует образованию водорастворимых ПКК. При увеличении мольного соотношения компонентов z выше 0.15 оптическая плотность возрастает и начинают образовываться дисперсии частиц ПКК (рис. 2). В этой области прослеживается влияние молекулярной массы сополимерного полиэлектролита, как и в случае гомополимера [27]. При переходе к ДАДМАХ–диоксид серы с большей молекулярной массой набора оптической плотности раствора становится более плавным, кривые турбидиметрического титрования смещаются в сторону больших значений z (рис. 2). Из данных турбидиметрического титрования следует, что лио-

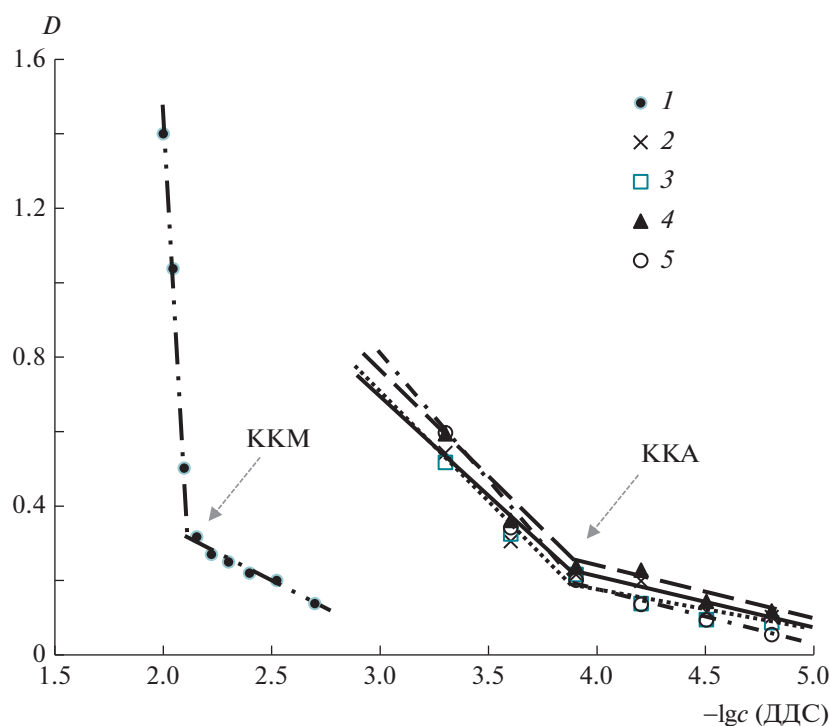


Рис. 3. Изменение оптической плотности при солюбилизации маслорастворимого красителя Oil Yellow OB растворами индивидуального ДДС (1) и ПКК на основе ДАДМАХ–диоксид серы (2–5). Молекулярная масса ДАДМАХ–диоксид серы $M \times 10^{-3} = 3$ (2), 15 (3), 35 (4) и 65 (5). Для всех комплексов $z = 0.1$.

филизирующая способность полиэлектролита увеличивается с ростом его ММ. Влияние ММ можно объяснить основываясь на результатах работы [31]. В случае ДАДМАХ–диоксид серы большей молекулярной массы длина лиофилизирующих участков, по-видимому, достаточна для удержания в растворе частицы комплекса при большем содержании ПАВ в системе. В случае комплекса, сформированного из полиэлектролита меньшей ММ, лиофилизирующая способность полиэлектролита меньше, и дисперсии ПКК образуются при меньшем значении мольного соотношения компонентов.

Кооперативное связывание ДДС с полиионами происходит выше критической концентрации агрегации, которая ниже критической концентрации мицеллообразования чистого раствора поверхностно-активного вещества [32]. Несмотря на то, что при мольном соотношении компонентов $z < 0.15$ дисперсии ПКК не образуются, в растворе присутствуют водорастворимые комплексы, о чем свидетельствуют результаты определения ККА (рис. 3). Значения ККА находятся в интервале $(1.2–1.4) \times 10^{-4}$ моль/л, молекулярная масса не оказывает принципиального влияния на ККА. Следует отметить, что ККА для ДДС в присутствии ДАДМАХ–диоксид серы сопоставима с ККА в ПКК на основе гомополимера ДАДМАХ и сополимеров ДАДМАХ с малеиновой кислотой и

N-винилпирролидоном [11]. Близкие значения ККА для ДДС в присутствии сополимеров ДАДМАХ указывают на больший вклад электростатических взаимодействий звена ДАДМАХ с ионами ДДС в кооперативные взаимодействия ПАВ–полиэлектролит в области составов реакционной смеси, где система представляет собой гомогенный раствор.

В интервале соотношений компонентов ПАВ–полиэлектролит $z > 0.15$ образуются дисперсии частиц ПКК. Размер частиц определяли методом лазерного рассеяния света, который широко применяется для анализа размеров полимерных систем [33, 34]. Метод основан на анализе дифрактограммы, получаемой при воздействии на частицы монохроматического излучения, в рамках оптической модели сферических частиц. Благодаря богатству строения и свойств полиэлектролитов и ПАВ их комбинации приводят к огромному разнообразию потенциальных структур частиц ПКК [5, 3, 36]. Ранее с использованием специально полученных металлических поверхностей различной морфологии и подобранных условий высушивания водных растворов комплексов нам удалось определить морфологию частиц ПКК на основе сополимера ДАДМАХ с малеиновой кислотой и ДДС при помощи сканирующей электронной микроскопии. Микрочастицы комплексов, средний размер которых со-

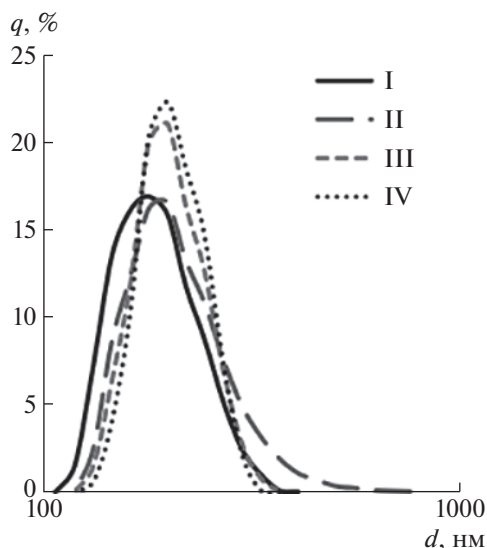


Рис. 4. Размер частиц ПКК на основе сополимеров ДАДМАХ–диоксид серы в водных растворах. Молекулярная масса сополимера $M \times 10^{-3} = 3$ (I), 15 (II), 35 (III) и 65 (IV). Мольное соотношение компонентов $z = 0.38$, время выдержки 7 суток. Для наглядности ось абсцисс представлена в логарифмическом масштабе.

ставляет 170–600 нм, демонстрируют типичную сферическую морфологию [37]. В настоящей работе средний размер частиц ПКК на основе ДАДМАХ–диоксид серы различной молекулярной массы, определенный методом лазерного рассеяния света, находятся в интервале от 150–200 нм (рис. 4).

Известно, что динамика полимер-коллоидных систем синтетических полиэлектролитов чувствительна к молекулярной массе полимера [21]. Для комплексов ДАДМАХ–диоксид серы I–III при мольном соотношении компонентов $z < 0.6$ мы наблюдаем незначительное изменение размеров частиц в течение 7 суток в большую сторону (рис. 5а–в). В случае более высокомолекулярного образца ДАДМАХ–диоксид серы IV средние размеры частиц остаются неизменными. Такое поведение полимер-коллоидных комплексов согласуется с выводами авторов работы [38], которые обнаружили, что скорость достижения равновесия в системах ПКК увеличивается с молекулярной массой полиэлектролита. Для низкомолекулярных образцов при $z > 0.6$ вследствие их меньшей лиофилизующей способности в системе образуется осадок, и из-за осаждения крупных частиц в растворе через 7 суток остаются частицы меньшего размера (рис. 5а, 5б участок $z > 0.6$). Для ПКК на основе высокомолекулярных ДАДМАХ–диоксид серы, напротив, наблюдается укрупнение размеров частиц при $z > 0.6$ (рис. 5в, 5г), однако лиофилизующей способ-

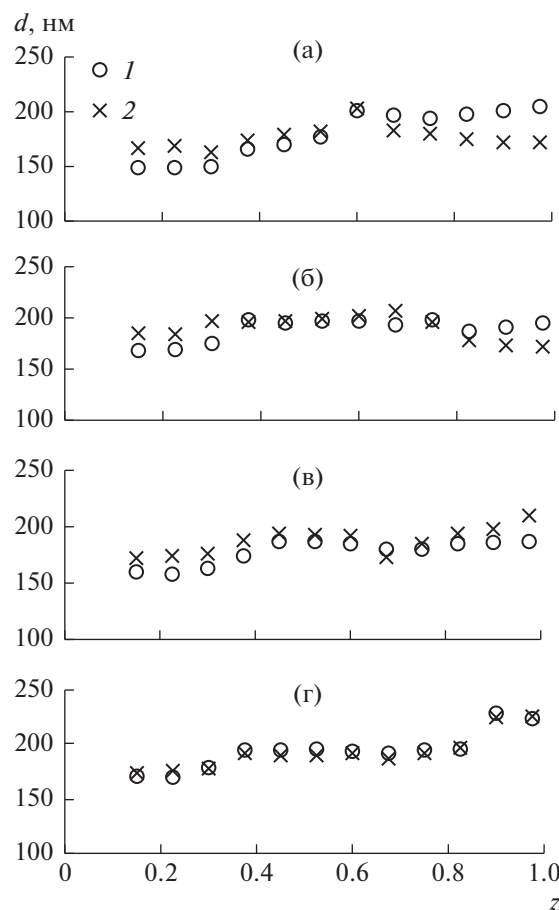


Рис. 5. Средние размеры частиц водных растворов комплексов на основе сополимеров ДАДМАХ–диоксид серы в зависимости от мольного соотношения компонентов комплекса. Молекулярная масса $M \times 10^{-3} = 3$ (I), 15 (II), 35 (III) и 65 (IV). Время выдержки 24 ч (I) и 7 суток (2).

ности сополимеров оказывается достаточно, чтобы удержать частицы комплексов в растворе.

Солюбилизирующая способность частиц ПКК была оценена на примере солюбилизации красителя Oil Yellow OB. Он практически не растворяется в воде, но может растворяться в любых слабо полярных средах, а также солюбилизироваться мицеллами ДДС, вследствие чего используется для исследования мицеллообразования в разных системах [11, 28]. Поскольку частицы ПКК на основе ДАДМАХ–диоксид серы различной молекулярной массы при $z = 0.3$ имеют близкие размеры (165–175 нм), способность к солюбилизации исследована на примере данных систем. На рис. 6 представлены оптические плотности красителя в воде, в водном растворе полимера I и в присутствии ПКК на основе ДАДМАХ–диоксид серы различной молекулярной массы. В присутствии макромолекул ДАДМАХ–диоксид серы оптическая плотность раствора красителя в 3 раза мень-

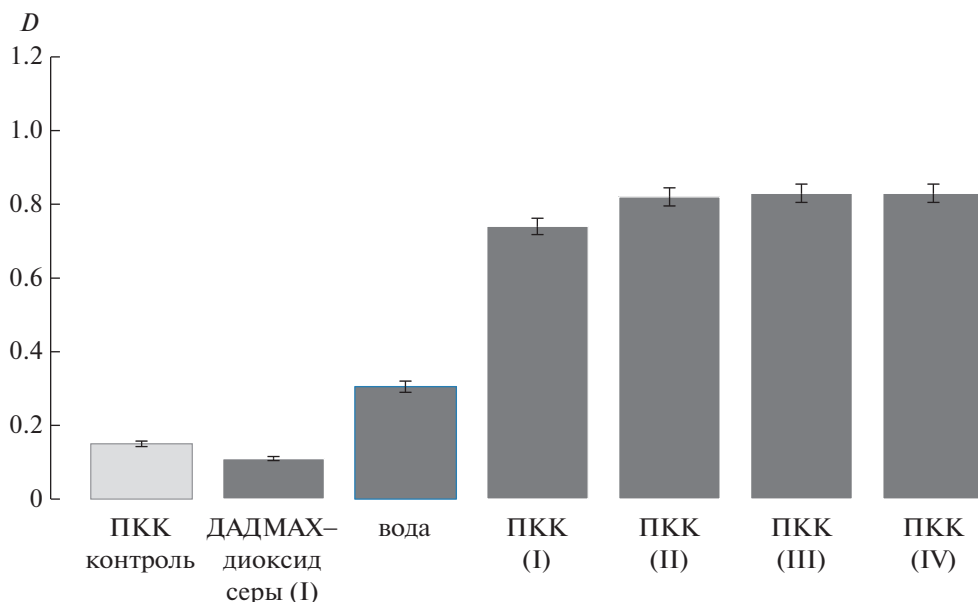


Рис. 6. Оптическая плотность раствора ПКК на основе ДАДМАХ–диоксид серы I без красителя (1) и оптические плотности красителя Oil-yellow OB (2–7) в водном растворе сополимера ДАДМАХ–диоксид серы I (2), в воде (3) и в присутствии ПКК на основе ДАДМАХ–диоксид серы I–IV при пятикратном разбавлении растворов (4–7). Масса ДАДМАХ–диоксид серы $M \times 10^{-3} = 3$ (4), 15 (5), 35 (6) и 65 (7). Для всех полимер-коллоидных комплексов $z = 0.3$. Образцы ПКК I–IV перед УФ-измерениями разбавлены в 5 раз. Номера 1–7 соответствуют столбцам на рисунке слева направо.

ше, чем у индивидуального раствора красителя (рис. 6). Вероятно, макромолекулы полиэлектролита повышают ионную силу раствора, что снижает и без того низкую растворимость красителя. Как видно на рис. 6, оптическая плотность красителя в растворах дисперсий частиц ПКК больше, чем в растворе индивидуального красителя. Мы полагаем, что лучшая растворимость красителя в присутствии комплексов обусловлена его сольubilизацией мицеллярной фазой частиц ПКК.

Зная оптическую плотность растворов индивидуального красителя, красителя в присутствии ПКК с учетом пятикратного разбавления растворов, а также оптическую плотность растворов ионных комплексов без красителя (рис. 6), можно оценить кратность повышения растворимости красителя S в присутствии дисперсий частиц ПКК. В присутствии комплексов ДАДМАХ–диоксид серы/ДДС растворимость красителя увеличивается в 11–13 раз. Молекулярная масса полиэлектролита не оказывает принципиального влияния на его растворимость. Ранее нами были исследованы частицы ионных комплексов на основе сополимера ДАДМАХ с N-винилпирролидиноном и не растворимого в воде тритерпена – бетулоновой кислоты [11]. Было показано, что в присутствии дисперсий наночастиц ПКК при сопоставимой концентрации комплекса растворимость красителя Oil-yellow OB повышается более чем в 22 раза. Вероятно, большая гидрофобность

фрагментов молекулы бетулоновой кислоты по сравнению с ДДС способствует лучшему растворению красителя.

Исследование зависимости растворимости красителя от размеров частиц комплексов на основе сополимеров ДАДМАХ–диоксид серы различной молекулярной массы показало, что растворимость красителя не зависит от размеров частиц комплекса при фиксированном содержании ДДС в растворе. Отсутствие влияния размеров частиц комплексов на их сольubilизирующую активность можно объяснить следующим образом. Известно, что при комплексообразовании полиэлектролит–ПАВ одна макромолекула полиэлектролита может взаимодействовать со многими мицеллами или одна мицелла может взаимодействовать с несколькими цепями [29, 39, 40]. Вероятно, в нашем случае, количество ДДС, связанного с макромолекулой ДАДМАХ–диоксид серы, остается фиксированным, изменяется лишь число макромолекул входящих в частицы комплексов при сохранении морфологии мицеллярной фазы. Следовательно, сольubilизирующая способность комплексов не зависит от размеров частиц комплексов.

Таким образом, исследованы полимер-коллоидные комплексы на основе полиэлектролитов ДАДМАХ–диоксид серы различной молекулярной массы и ДДС. Комплексы представляют собой разновидность самоорганизующихся систем,

в которых гидрофобные участки молекул ПАВ формируют внутримолекулярные мицеллы, способные солюбилизовать не растворимые в воде молекулы органических веществ. Изменение молекулярной массы ДАДМАХ—диоксид серы значительно влияет на лиофилизующую способность полиэлектролита и граничные значения мольного отношения компонентов ПАВ—полиэлектролит, обеспечивающие образование устойчивых дисперсий полимер-коллоидных комплексов. При повышении молекулярной массы полиэлектролита размеры частиц полимер-коллоидных комплексов увеличиваются, однако размеры частиц не влияют на солюбилизирующую способность комплексов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-33-60083). Определение размера частиц выполнено в рамках Государственного задания Уфимского института химии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук № 122031400276-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Miyake M. // Adv. Colloid Interface Sci. 2017. V. 239. P. 146.
- Ибрагимова З.Х., Касаикин В.А., Зезин А.Б., Кабанов В.А. // Высокомолек. соед. А. 1986. Т. 28. № 8. P. 1640.
- Коробко Т.А., Изумрудов В.А., Зезин А.Б. // Высокомолек. соед. А. 1993. Т. 35. № 1. P. 87.
- Khan N., Brettmann B. // Polymers (Basel). 2019. V. 11. P. 51.
- Gradzielski M., Hoffmann I. // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 2018. V. 35. P. 124.
- Lapitsky Y., Parikh M., Kaler E.W. // J. Phys. Chem. B. 2007. V. 111. P. 8379.
- Guzmán E., Fernández-Peña L., Ortega F., Rubio R.G. // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 2020. V. 48. P. 91.
- Dryabina S.S., Fotina K.M., Shulevich Y.V., Navrotskii A.V., Novakov I.A. // J. Polym. Environment. 2019. V. 27. P. 1595.
- Fernández-Peña L., Abelenda-Nuñez I., Hernández-Rivas M., Ortega F., Rubio R.G., Guzmán E. // Adv. Colloid Interface Sci. 2020. № 102203.
- Olivera M.E., Manzo R.H., Alovero F., Jimenez-Kairuz A.F., Ramirez-Rigo M.V. // Nanostruct. Oral Medicine. 2017. P. 365.
- Babaev M., Lobov A., Shishlov N., Zakharova E., Orlov A., Baymiyev A., Kolesov S. // React. Funct. Polymers. 2021. V. 165. № 104968.
- Mirtič J., Paudel A., Laggner P., Hudoklin S., Erdani Kreft M., Kristl J. // Int. J. Pharmaceut. 2020. V. 580. № 119199.
- França M.T., Nicolay Pereira R., Klüppel Riekes M., Munari Oliveira Pinto J., Stulzer H.K. // Eur. J. Pharmaceut. Sci. 2018. V. 111. P. 142.
- Zakharova J.A., Otdelnova M.V., Ivleva E.M., Kasaikin V.A., Zezin A.B., Kabanov V.A. // Polymer. 2007. V. 48. № 1. P. 220.
- Bain C.D., Claesson P.M., Langevin D., Meszaros R., Nylander T., Titmuss S., von Klitzing R., Stubenrauch C. // Adv. Colloid Interface Sci. 2010. V. 155. № 1–2. P. 32.
- Dong B., Cheow W.S., Hadinoto K. // Adv. Powder Technol. 2020. V. 31. P. 3102.
- Shulevich Y.V., Kovaleva O.Y., Navrotskii A.V., Skrebneva V.G., Novakov I.A. Russ. J. Appl. Chem. 2008. V. 81. № 1. P. 108.
- Guzmán E., Fernández-Peña L., Akanno A., Llamas S., Ortega F., Rubio R.G. // Coatings. 2019. V. 9. № 7. P. 438.
- Mészáros R., Thompson L., Bos M., Varga I., Gilányi T. // Langmuir. 2003. V. 19. № 3. P. 609.
- Varga I., Campbell R.A. // Langmuir. 2017. V. 33. P. 5915.
- Bahramian A., Thomas R.K., Penfold J. // J. Phys. Chem. B. 2014. V. 118. № 10. P. 2769.
- Patel L., Mansour O.T., Bryant H., Abdullahi W., Dalglish R.M., Griffiths P.C. // Langmuir. 2020. № 36. P. 8815.
- Шулевич Ю.В., Ковалева О.Ю., Навроцкий А.В., Скребнева В.Г., Новаков И.А. // Журн. прикл. химии. 2008. Т. 81. № 1. С. 112.
- Шилова С.В., Третьякова А.Я., Безруков А.Н., Мягченков В.А., Барабанов В.П. // Журн. прикл. химии. 2007. № 9. С. 1547.
- Bilalov A.V., Babaev A.A., Tretyakova F.Ya., Myagchenkov V.A., Barabanov V.P. // Polymer Science A. 2005. V. 47. № 11. P. 1149.
- Воробьева А.И., Васильева Е.В., Гайсина Х.А., Пузин Ю.И., Леплянин Г.В. // Высокомолек. соед. А. 1996. Т. 38. № 10. С. 1663.
- Babaev M.S., Vorob'eva A.I., Kolesov S.V. // Polymer Science A. 2015. V. 57. № 3. P. 266.
- Shulevich Y.V., Kovaleva O.Y., Navrotskii A.V., Zakharova Y.A., Zezin A.B., Novakov I.A. // Polymer Science A. 2007. V. 49. № 12. P. 1284.
- Bai G., Santos L.M.N.B.F., Nichifor M., Lopes A., Bastos M. // J. Phys. Chem. B. 2004. V. 108. № 1. P. 405.
- Nizri G., Lagerge S., Kamyshny A., Major D.T., Magdassi S. // J. Colloid Interface Sci. 2008. V. 320. P. 74.
- Kasaikin V.A., Efremov V.A., Zakharova J.A., Zezin A.B., Kabanov V.A. // Dokl. Chem. 1997. V. 354. P. 126.
- Lee J., Moroi Y. // Langmuir. 2004. V. 20. № 11. P. 4376.
- Samoilova N.A., Krayukhina M.A., Vyshivannaya O.V., Blagodatskikh I.V. // Polymer Science A. 2022. V. 64. № 4. P. 277.
- Kurmaz S.V., Ivanova I.I., Fadeeva N.V., Perepelitsina E.O., Lapshina M.A., Balakina A.A., Terent'ev A.A. // Polymer Science A. 2022. V. 64. № 5. P. 434.
- Bali K., Varga Z., Kardos A., Mészáros R. // Colloids Surf. A. 2019 V. 574. P. 21.
- Bali K., Varga Z., Kardos A., Varga I., Gilányi T., Domján A., Wacha A., Bóta A., Mihály J., Mészáros R. // Langmuir. 2018. V. 34. P. 14652.
- Babaev M.S., Lobov A.N., Shishlov N.M., Kolesov S.V. // React. Funct. Polymers. 2022. V. 178. P. 105359.
- Buckingham J.H., Lucassen J., Hollway F. // J. Colloid Interface Sci. 1978. № 67. P. 423.
- Khan N., Brettmann B. // Polymers. 2018. V. 11(1). № 51.
- Kogej K., Evmenenko G., Theunissen E., Berghmans H., Reynaers H. // Langmuir. 2001. 17. P. 3175.