

О МЕХАНИЗМЕ ФЛОКУЛЯЦИИ ГИДРОЗОЛЯ КРЕМНЕЗЕМА ПОЛИАКРИЛАМИДОМ

© 2022 г. Н. А. Шабанова¹, И. А. Белова¹, *

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Миусская пл., 9, Москва, 125047 Россия

*e-mail: irinabelova@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.10.2021 г.
После доработки 22.02.2022 г.
Принята к публикации 05.04.2022 г.

Механизм флокуляции гидрозоля кремнезема (Людокс ТМ-40) полиакриламидом (марки Магнафлок) исследовали методами вискозиметрии, турбидиметрии, динамического рассеяния света (ДРС). Показано существование двух стадий флокуляции: формирование первичных флокул по механизму гетероадагуляции наночастиц кремнезема на поверхности микроглобул полимера и укрупнение полимерных ассоциатов с образованием седиментационно-неустойчивых композитных частиц. Переход от первой стадии процесса ко второй характеризуется величиной критической концентрации флокуляции (ККФ). Интенсивность флокуляции растет при увеличении молекулярной массы полиакриламида и степени гидролиза амидных групп (анионного характера полимера).

Ключевые слова: гидрозоль кремнезема, полиакриламид, агрегативная устойчивость, флокуляция, коагуляция, динамическое рассеяние света, вискозиметрия, турбидиметрия

DOI: 10.31857/S0132665122040114

ВВЕДЕНИЕ

Дисперсные системы, состоящие из наночастиц неорганической и органической природы, представляют интерес для синтеза материалов с улучшенными механическими, электрическими, оптическими, термическими и другими свойствами [1–6]. Например, композиции водорастворимых полимеров и коллоидного кремнезема играют большую роль в технологиях мезопористых сорбентов, жидких кристаллов, катализаторов, флокулянтов, загущающих агентов при переработке нефти, латексных красок, косметических средств, лекарственных препаратов и т.д.

Дисперсная система, содержащая наночастицы различной природы, может сохранять агрегативную устойчивость или в ней возможны процессы селективной коагуляции, гетерокоагуляции, гелеобразования. Агрегация частиц на ранних стадиях смешения компонентов системы часто является лимитирующим фактором формирования свойств конечных материалов (пленок, порошков, суспензий, керамики и т.д.).

Несмотря на большое количество публикаций [7–12] многие аспекты агрегативной устойчивости смешанных композиций ионо-стабилизированных (лиофобных) зольей и растворов полимеров (“мягких” коллоидов) остаются дискуссионными, особенно в условиях одинакового (отрицательного) заряда поверхности частиц и макромолекул.

Основная проблема заключается в том, что теории адсорбции и флокуляции для водорастворимых полимеров разработаны в основном для твердых макроповерхностей, но часто автоматически переносятся на нанодисперсии частиц, которые находятся в состоянии теплового броуновского движения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Проведены исследования закономерностей влияния водорастворимых сополимеров акрилового ряда марки Магнафлок-М (Allied Colloids Limited, England) на агрегативную устойчивость гидрозоля кремнезема (Людокс ТМ-40). Характеристика исходного золя: концентрация SiO_2 519.6 г/л, размер частиц (по данным адсорбционного титрования по Сирсу [12]) 11.0 нм, рН 9.5. Поверхность частиц кремнезема заряжена отрицательно (при $\text{pH} > \text{pH}_{\text{изт}} \sim 2.2$). Золь стабилизирован минимальным количеством гидроксида натрия.

Термин полиакриламид часто используют как коллективное название “чистого” полиакриламида и анионных сополимеров акриламида с акрилатом. Молекулярная структура полиакриламида отражена в формуле $[-\text{CH}_2-\text{CHCONH}_2-\dots-\text{CH}-\text{CH}_2\text{COONa}]_n$.

По данным потенциометрического титрования полиакриламида величина $\text{pK} = 4.5$, то есть при $\text{pH} > 4.0$ макромолекулы заряжены отрицательно, а при $\text{pH} < 4.0$ – положительно. Концентрация ионогенных групп определяет статистическую конформацию макромолекул в водных растворах и степень сшивки макромолекулярных клубков. При увеличении рН и степени гидролиза анионный характер полимеров проявляется в большей степени, происходит разворачивание макромолекулярных клубков. Добавление хлорида натрия снижает электровязкостный эффект и, соответственно, вызывает их сжатие и уменьшение вязкости растворов.

Для получения растворов полиакриламида навеску полимера (4.0 г) помещали в колбу объемом 1 л, добавляли дистиллированную воду (500 мл), выдерживали при комнатной температуре в течение двух-трех суток. Далее перемешивали на магнитной мешалке при температуре 30°C до полного растворения полимера, доводили объем воды в колбе до метки. Аликвоты раствора полимера вводили в исходный золь в количестве, необходимом для установления концентрации 1.0 и 2.0 г/л. Полученные системы исследовали методами динамического рассеяния света (ДРС), вискозиметрии и турбидиметрии.

Исследования проводили в щелочной области значений рН. Определение рН растворов полимеров и золь проводили на рН-метре рН-121 с использованием стеклянного и хлорсеребряного электродов по стандартной методике [13, 14].

Вискозиметрические исследования. Вязкость разбавленных растворов полимеров, а также их смесей с золью, определяли на капиллярном вискозиметре ВПЖ-2 с диаметром капилляра 0.73 мм (время истечения воды при 30°C 27 с). Относительная погрешность менее 2.5%.

Параметры микроклубков оценивали из данных вискозиметрии по теории Флори [15]. Измерения вязкости выполнены при добавлении в растворы полимеров 0.5 М хлорида натрия.

Результаты вискозиметрических измерений обрабатывали по уравнению Хаггинса [16]:

$$\eta_{\text{уд}}/c = [\eta] + [\eta]^2 K_1' c,$$

где $\eta_{\text{отн}} = \eta_{\text{смесь}}/\eta_{\text{полимер}}$, $\eta_{\text{уд}} = \eta_{\text{отн}} - 1$, c – концентрация полимера в растворе, г/дл, $[\eta]$ – характеристическая вязкость, дл/г, K_1' – вискозиметрическая константа Хаггинса.

Рассчитывали размеры микроклубков d , радиус инерции $\langle S^2 \rangle^{1/2}$, среднеквадратичное расстояние между концами полимерной цепи в растворе $\langle r^2 \rangle^{1/2}$:

Таблица 1. Параметры микроклубков полимеров

Полимер Магнафлок	Мол. масса $M_{\eta}^{\alpha} \times 10^{-6}$ г/моль	Степень гидрол. СГ, %	Характер. вязкость, [η], дл/г	Размер макроклубка d , нм	Радиус инерции $\langle S^2 \rangle^{1/2}$	Среднеквад. рас- стояние $\langle R^2 \rangle^{1/2}$, нм
М-139	0.6	13	8.5	190	95	233
М-3127	3.2	32	10.1	215	108	263
М-351	0.8	0.8	3.3	94	47	115
М-1011	4.5	52	13.2	284	132	323

$$\left[\frac{d^2}{4} \right]^{3/2} = \frac{[\eta]M}{\Phi},$$

$$[\eta] = \Phi \langle S^2 \rangle^{3/2} / M,$$

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{6} \langle S^2 \rangle^{1/2}.$$

Универсальная вискозиметрическая константа Флори $\Phi = 2.8 \times 10^{21}$ моль⁻¹. Молекулярную массу рассчитывали по уравнению Марка–Хаувинка–Куна:

$$[\eta] = K_1' M_{\eta}^{\alpha},$$

где, константы K_1' и α принимали 1.05×10^{-3} и 0.54 соответственно [17]. Кислотные числа и степень гидролиза амидных групп определяли титрованием растворов 0.1 N раствором КОН от pH 2.5 до 9.0. Рассчитанные параметры полимеров представлены в табл. 1. Как можно видеть из табл. 1, размеры микроклубков и среднеквадратичные расстояния между концами полимерной цепи увеличиваются с ростом степени гидролиза амидных групп.

Динамическое рассеяние света. Метод динамического рассеяния света (ДРС) основан на измерении интенсивности рассеяния света локальными флуктуациями показателя преломления среды в ходе хаотического (броуновского) движения частиц. Исследования проводили на приборе лазерного динамического светорассеяния Zetatrac (Microtrac Co.) с длиной волны падающего излучения 780 нм, углом рассеяния 180° и температуре 25°C. Время измерения 90 с. Каждое измерение проводили в трех последовательных повторах, после чего находили среднее значение и определяли стандартное отклонение. Форму частиц золя и микроклубков принимали сферическую. Показатель преломления жидкой фазы соответствовал преломлению дистиллированной воды 1.333, для частиц полимера М-351 – 1.49, для SiO₂ – 1.46. Концентрация полимера в образцах составляла 1.0 и 2.0 г/л, концентрация кремнезема 65.0 г/л. Проведены опыты с добавлением хлорида натрия. Параллельно измеряли дзета-потенциал частиц. Полученные данные обрабатывали с использованием программного обеспечения Microtrac FLEX 10.5.4. Средний размер частиц определяли по данным среднечислового и объемного распределения.

Турбидиметрические исследования. Процесс флокуляции контролировали турбидиметрическим методом. Для приготовления смешанных систем к аликвоте золя добавляли необходимое количество раствора полимера при перемешивании на магнитной мешалке. Оптическую плотность (D) композиций золя и растворов полиакриламида определяли на спектрофотометре марки ФЭК-56М, при длине волны 540 нм. Измере-

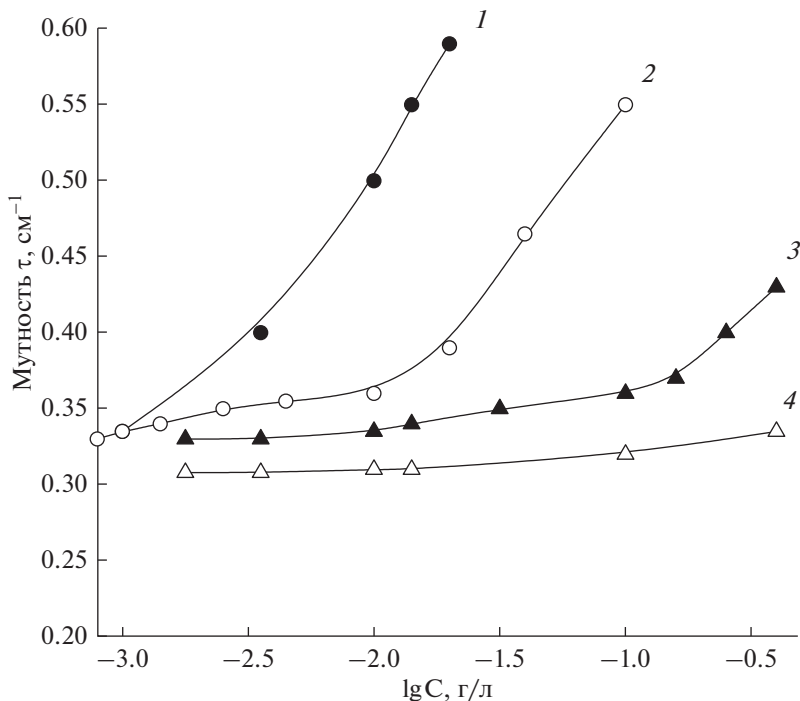


Рис. 1. Влияние концентрации полимеров на мутность золей, pH 9.5: 1 – М-1011, 2 – М-3127, 3 – М-139, 4 – М-351.

ния проводили через 5 мин после смешения компонентов раствора. Мутность системы (τ) рассчитывали по формуле $\tau = \frac{2.3D}{l}$, где l толщина кюветы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зависимости от условий, введение водорастворимых полиэлектролитов может вызвать селективную коагуляцию частиц кремнезема или образование смешанных частиц (флокуляцию). Процессы агрегации обычно сопровождаются изменением свойств дисперсной системы (рост мутности и вязкости, осаждение частиц или образование геля).

На рис. 1 представлены кривые изменения мутности золей кремнезема в зависимости от концентрации полиакриламида различных марок. В случае полимера Магнафлок М-351 (практически гомополимера, низкая степень гидролиза 0.8%), мутность золя незначительно растет вплоть до высоких концентраций полимера (кривая 4). Для гидролизованых полимеров характерен двухступенчатый вид концентрационных зависимостей. Постепенный рост мутности переходит в резкое (скачкообразное) помутнение системы после достижения определенной концентрации (критической концентрации флокуляции ККФ).

Учитывая, что вязкостные свойства смешанных систем в значительной степени определяются полимером, рассчитаны величины относительной вязкости ($\eta_{\text{отн}}$) как отношение вязкости смешанной системы ($\eta_{\text{сист}}$) к вязкости раствора полимера ($\eta_{\text{полимер}}$). Показанные на рис. 2 зависимости $\eta_{\text{отн}}$ от относительной концентрации полимера R (отно-

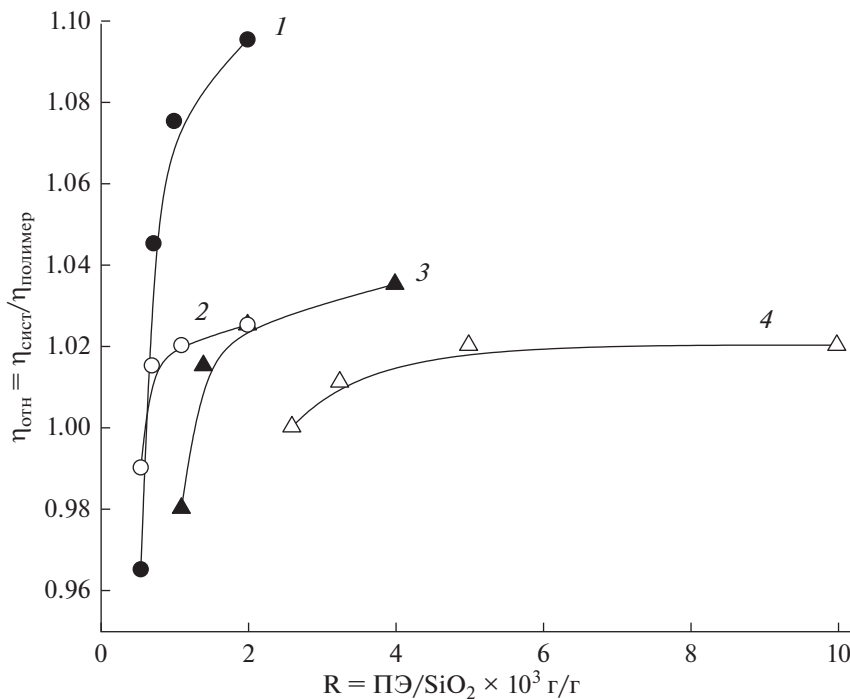


Рис. 2. Влияние соотношения R ($\text{ПЭ}/\text{SiO}_2 \times 10^3 \text{ г/г}$) на относительную вязкость для полимеров: 1 – М-1011, 2 – М-3127, 3 – М-139, 4 – М-351.

шение массы полимера к массе золя (г/г)) имеют двухступенчатый характер. Относительная вязкость растет тем больше, чем выше степень гидролиза и молекулярная масса полимеров. В случае практически не гидролизованного (М-351) и мало гидролизованного (М-139) полимеров во всем исследованном диапазоне концентраций вязкость изменяется незначительно. Иными словами, в этих условиях процесс ограничивается начальной стадией, интенсивная флокуляция не происходит даже в области высоких концентраций компонентов системы. В то же время, высокомолекулярные сильно гидролизованные (анионные) полимеры М-3127 и М-1011 заметно увеличивают вязкость золя уже при небольших концентрациях. Обобщая данные вискозиметрии и турбидиметрии, можно заключить, что концентрация перехода ко второй стадии флокуляции (достижения ККФ) увеличивается в ряду полимеров: $\text{М-351} < \text{М-139} < \text{М-3127} < \text{М-1011}$. Важно отметить, что введение хлорида натрия способствует переходу ко второй стадии флокуляции, величина (ККФ) уменьшается.

Для изучения начальных стадий процесса флокуляции проведены исследования смесей гидрозоля кремнезема и полиакриламида М-351 методом ДРС.

Характерные кривые распределения размеров частиц показаны на рис. 3, 4. Результаты определения гидродинамических радиусов частиц представлены в табл. 2. Для полимера М-351 наблюдается мономодальное среднечисловое распределение молекулярных клубков по размерам в довольно узком диапазоне от 15 до 40 нм со средним значением гидродинамического диаметра 20 нм. Аналогичная мономодальная картина наблюдается и для среднеобъемного значения, которое несколько превышает сред-

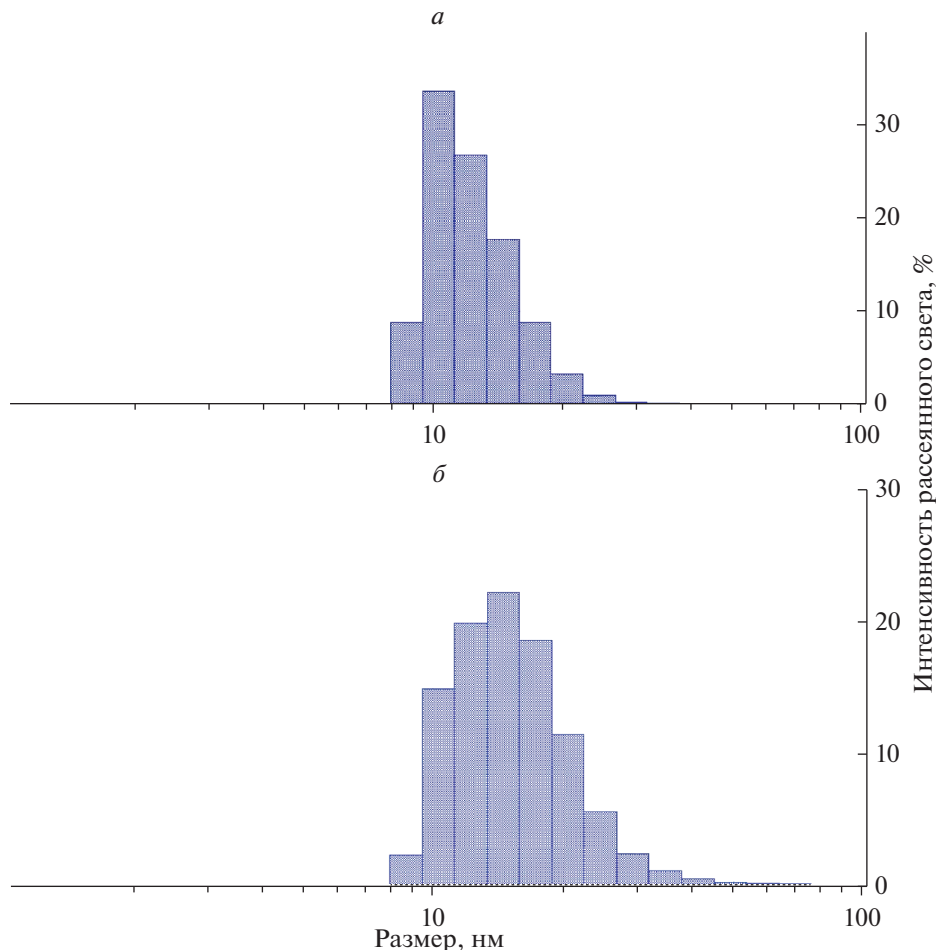


Рис. 3. Среднечисловое (а) и среднеобъемное (б) распределение размеров частиц в смеси Людокса ТМ-40 (65.0 г/л) и полиакриламида М-351 (1.0 г/л) при рН 9.5.

нечисловое, поскольку интенсивность рэлеевского рассеяния частиц с большим объемом превышает степень рассеяния для частиц с меньшим средним объемом.

Таким образом, максимум пика светорассеяния и среднее значение смещаются в сторону больших значений. Дзета-потенциал отрицателен и равен -49 мВ, что обусловлено существованием продуктов гидролиза амидных групп (карбоксилата натрия). Средние размеры растут с ростом концентрации полимера.

Гидрозолю кремнезема также имеет мономодальное распределение, как в среднечисловом, так и в среднеобъемном выражении. Разброс значений существенно уже, чем для М-351, среднечисловое значение гидродинамического диаметра составляет 9 нм, а среднеобъемное — 11 нм. Дзета-потенциал отрицателен и равен -40 мВ, что хорошо согласуется с данными по макроэлектрофорезу [1].

Смешение гидрозоля кремния с полимером при рН 9.5 не приводит к появлению бимодального распределения (см. рис. 3). Однако, следует отметить тенденцию к уменьшению среднеобъемных и среднечисловых размеров в смешанных системах

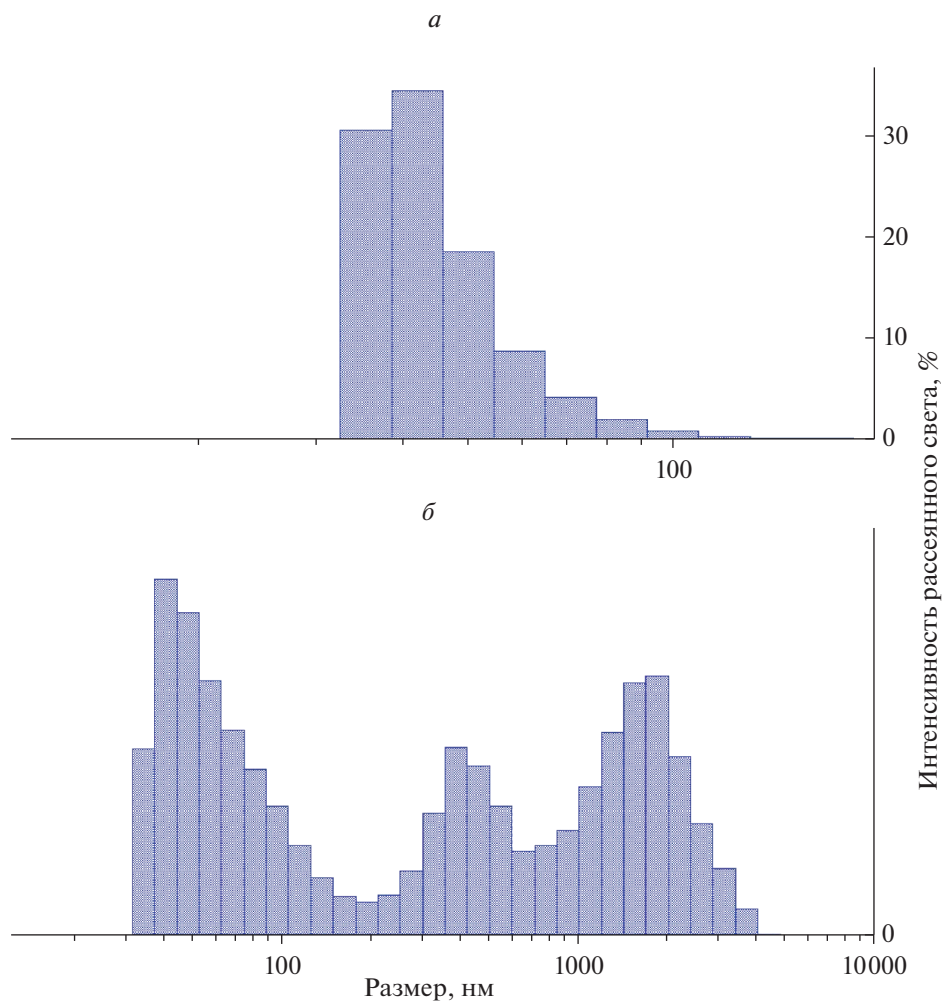


Рис. 4. Среднечисловое (а) и среднеобъемное (б) распределение размеров частиц в смеси Людокса ТМ-40 (65.0 г/л) и полиакриламида М-351 (3.0 г/л) при 0.3 моль/л NaCl, pH 9.5.

(табл. 2). Так, среднечисловые значения уменьшаются до 12 нм, что соответствует промежуточному положению между размерами “чистого” кремнезема и полимера. Дзета-потенциал при этом несколько уменьшается до -30 мВ.

Исследованные композиции относятся к ионостабилизированным дисперсиям, в которых электростатическое отталкивание отрицательно заряженных микроклубков полиакриламида и частиц кремнезема обеспечивает агрегативную устойчивость дисперсной системы. Однако, щелочной гидрозоль кремнезема увеличивает ионную силу раствора, что уменьшает роль электростатических сил отталкивания; создаются условия для проявления сил межмолекулярного притяжения частиц кремнезема и микроклубков полиакриламида и образования первичных флокул.

Вклад электростатических сил в еще большей степени проявляется в условиях введения хлорида натрия. В присутствии 0.1 моль/л NaCl мономодальное распределение

Таблица 2. Средние размеры нанокompозитов в системе гидрозоль SiO₂ (65.0 г/л)—полиакриламид М-351

	Средние размеры частиц, нм	
	MV, среднеобъемное распределение	MN, среднечисловое распределение
М-351 (1.0 г/л)	25.1 ± 0.3	20.3 ± 0.4
М-351 (2.0 г/л)	—	32.73 ± 2.25
М-351 (1.0г/л) + NaCl (0.1 М)	24.6 ± 0.7	19 ± 1.0
Людокс ТМ-40 (65.0 г/л)	11.1 ± 0.1	8.90 ± 0.05
ЛюдоксТМ-40 (65.0 г/л) + NaCl (0.1 М)	24.1 ± 0.7	19.2 ± 0.1
Людокс ТМ-40 (65.0 г/л) + М-351 (1.0 г/л)	15.4 ± 0.2	12.10 ± 0.05
Людокс ТМ-40 (65г/л) + М-351 (1.0 г/л) + NaCl (0.3 М)	52, 390, 1540	45 ± 5.0

сохраняется как для среднечисловых, так и для среднеобъемных значений гидродинамического диаметра. Примечательно, что увеличение концентрации NaCl приводит к росту средних размеров частиц бинарных смесей, тогда как в случае самого раствора полимера радиусы частиц не изменяются.

Следует отметить, что в случае бинарных смесей, содержащих 0.3 моль/л NaCl, модальное распределение сохраняется только для среднечисловых значений. Этот факт скорее всего связан с тем, что релеевское светорассеяние частиц кремнезема в структуре микроглобул полимера практически идентично светорассеянию в водной среде.

В случае среднеобъемных значений, наблюдаются три фракции со средними значениями 52, 390 и 1540 нм. При этом мелкие частицы численно преобладают, но значительная масса дисперсной фазы уже сосредоточена в крупных частицах (см. табл. 2, рис. 4). Заметное увеличение размеров ассоциированных частиц по сравнению с размерами микроглобул исходного полимера можно рассматривать как следствие агрегации (коагуляции) первичных флокул.

Полученные результаты позволяют рассмотреть общий механизм процесса флокуляции коллоидного кремнезема полиакриламидом.

Гибкоцепные макромолекулы в водной среде находятся в состоянии статистических микроклубков (мягких коллоидов). Наряду с мицеллярными растворами поверхностно-активных веществ, такие системы относят к лиофильным (термодинамически устойчивым) дисперсиям, поверхностная энергия которых компенсируется энергией теплового движения сегментов макромолекул [18]. Увеличение анионного характера полимеров приводит к разворачиванию полимерных микроклубков, росту их межфазной поверхности и гидродинамических размеров. Гидродинамические размеры микроклубков полиакриламида по данным вискозиметрии (табл. 2) могут быть больше 100 нм, что существенно превышает диаметр частиц золя. В системе, содержащей заметно отличающиеся по размеру и форме частицы, возможна адгезия (прилипание) маленьких частиц на поверхности более крупных, в данном случае, микроглобулах полимера — гетероадагуляция. Теоретические основы гетерокоагуляции, заложенные в работах Б.В. Дерягина [19], развиты в работах других авторов [20–25].

Возможность гетероадагуляции в системе гидрозоль кремнезема—полиакриламид подтверждается совокупными исследованиями методами динамического рассеяния света, вискозиметрии и турбидиметрии. В исследуемых системах гетероадагуляция более мелких частиц золя кремнезема на поверхности микроклубков приводит к образованию первичных флокул. Этому процессу способствует увеличению ионной силы раствора при введении электролита. При увеличении концентрации компонентов си-

стемы или электролита первичные флокулы коагулируют с образованием крупных седиментационно неустойчивых агрегатов.

По данным элементного анализа одна макромолекула полимера может связывать от 18 до 150 частиц золя (в зависимости от условий). Возможность коагуляции мягких коллоидов в первой или второй потенциальной яме с позиций теории ДЛФО рассмотрены Винсентом с соавторами [26]. Процесс коагуляции сопровождается заметным увеличением мутности и вязкости системы после достижения величины критической концентрации флокуляции ККФ. Образующиеся крупные флокулы со временем оседают, происходит седиментационное разделение дисперсной системы на две фазы.

Характерно, что седиментационные осадки при разбавлении водой можно редиспергировать, что подтверждает механизм коагуляции первичных флокул во второй потенциальной яме.

Таким образом, механизм флокуляции включает стадии образования первичных флокул (ассоциатов полимерных микроклубков и частиц кремнезема) по механизму гетероадагуляции, последующую коагуляцию первичных флокул и образование вторичных флокул. Эффективность флокуляции определяется в первую очередь степенью анионного характера (степенью гидролиза амидных групп) и молекулярной массой полимера. В случае неионных полимеров и их низкой концентрации флокуляция может ограничиться первой стадией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Флокуляция коллоидного кремнезема полиакриламидом представляет сложный коллоидно-химический процесс, включающий стадии гетероадагуляции (сорбцию) наночастиц кремнезема в поверхностных слоях полимерных микроглобул и образование первичных флокул. Рост ионной силы раствора при увеличении концентрации анионного полимера вызывает коагуляцию первичных флокул, их укрупнение и седиментацию. Интенсивность протекающих процессов увеличивается по мере роста степени гидролиза и молекулярной массы полиакриламида. В случае полиакриламида неионного типа флокуляция может ограничиться образованием первичных флокул.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Золь-гель технологии. Нанодисперсный кремнезем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 328 с.
2. Spalla O. Nanoparticle interactions with polymers and polyelectrolytes // *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2002. V. 7. № 3–4. P. 179–185.
3. Arnaud Zenerino, Sonia Amigoni, Elisabeth Taffin de Givenchy, Denis Josse, Frédéric Guittard. Homogeneous dispersion of SiO₂ nanoparticles in an hydrosoluble polymeric network // *Reactive Functional Polymers.* 2013. V. 73. № 8. P. 1065–1071.
4. Ke Yang-Chuan, Wei Guang-Yao, Wang Yi. Preparation, morphology and properties of nanocomposites of polyacrylamide copolymers with monodisperse silica // *European Polymer J.* 2008. V. 44. № 8. P. 2448–2457.
5. Wisniewska M. The temperature effect on the adsorption mechanism of polyacrylamide on the silica surface and its stability // *Applied Surface Sci.* 2012. V. 258. P. 3094–3101.
6. Napper D.H. *Polymeric Stabilization of Colloidal Dispersions.* Academic Press. New York, 1983. 428 p.
7. Kamibayashi M., Ogura H., Otsubo Ya. Viscosity behavior of silica suspensions flocculated by associating polymers // *J. Colloid Inter. Sci.* 2005. V. 290. P. 592–597.
8. Rivas B.L., Pereira E.D., Moreno I. Water-soluble polymer–metal ion interactions // *Villosladab Prog. Polym. Sci.* 2003. V. 28. P. 173–208.
9. Шабанова Н.А., Силос И.В. Флокуляция щелочных гидрозолей кремнезема гидролизированным полиакриламидом // *Коллоид. журн.* 1991. Т. 53. № 2. С. 305–310.
10. Шабанова Н.А., Юй Цун-Син Т., Мусабеков К.Б. Агрегативная устойчивость смесей золя коллоидного кремнезема и полистирольного латекса // *Коллоид. журн.* 2001. Т. 63. № 5. С. 711–714.

11. Лунина М.А., Иванова М.Г., Хачатурян А.А. Гетероадагуляция частиц высокодисперсных металлов на поверхности полимерных волокон // Коллоид. журн. 1995. Т. 57. № 6. С. 825–828.
12. Sears G.W.Jr. Determination of specific surface area of colloidal silica by titration with sodium hydroxide // Anal. Chem. 1956. V. 28. № 12. P. 1981–1983.
13. Крешков А.П. Основы аналитической химии. М.: Химия, 1977. Т. 3. 488 с.
14. Лосев И.П., Федотова О.Я. Практикум по химии высокомолекулярных соединений. М.: Госхимиздат, 1962. 228 с.
15. Моравец Г. Макромолекулы в растворе. М.: Мир, 1967. 398 с.
16. Huggins M.L. The viscosity of dilute solutions of long-chain molecules. IV. Dependence on concentration // J. Amer. Chem. Soc. 1942. V. 64. № 11. P. 2716–2718.
17. Куренков В.Ф., Байбурдов Т.А., Ступенькова Л.Л. Кинетические закономерности щелочного гидролиза полиакриламида в суспензиях // Физико-химические основы синтеза и переработки полимеров. Горький: ГТУ. 1985. С.79–84.
18. Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Образование новых поверхностей при деформации и разрушении твердых тел в поверхностно-активной среде // Коллоид. журн. 1958. Т. 20 № 5 С. 645–654.
19. Дерягин Б.В. Теория гетероагуляции, взаимодействия и слипания разнородных частиц в растворах электролитов // Коллоид. журн. 1954 Т. 16. № 6. С. 425–438.
20. Matijevich E. Interactions in mixed colloidal systems (heterocoagulation, adhesion, microflotation) // Pure Appl. Chem. A. 1981. V. 53. № 11. P. 2167–2179.
21. Голикова Е.В., Чернобережский Ю.М. Исследование процесса гетероагуляции двухкомпонентных дисперсных систем, содержащих наноразмерные и субмикронные частицы различной степени гидрофильности // Физика и химия стекла. 2005. Т. 31. № 3. С. 375–388.
22. Bleier A., Matijevic E. Heterocoagulation. Part 3 Interaction of polyvinyl chloride latex with HS silica // J. Chem. Soc., Faraday trans. 1978. P. 1346–1359.
23. Wu. J., Bratko D. Prausenitz J.M. Interaction between like-charged colloidal spheres in electrolyte solutions // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1998. V. 95. P. 15169–15172.
24. Муллер В.М., Хачатурян А.А., Лунина М.А. Гетероагуляция дисперсных металлов на поверхности минеральных оксидов // Коллоид. журн. 1986. Т. XLVIII. № 6. С. 1190–1195.
25. Тарасов В.В., Кизим Н.Ф. Гетероагуляция микрочастиц: метод очистки от них водных систем и изучения процессов образования контактов частиц // Журнал Вода: Химия и технология. 2013. № 8 (62). С. 48–61.
26. Ferna'ndez-Nieves A., Ferna'ndez-Barbero A., Vincent B., De las Nieve F.J. Reversible Aggregation of Soft Particles // Langmuir. 2001. V. 17. № 6. P. 1841–1846.