

Научная статья

УДК 544.7

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>

CC BY 4.0

Регулирование агрегативной устойчивости бинарных полимерминеральных дисперсий

Валентина Анатольевна Полуэктова , Николай Афанасьевич Шаповалов ,
Наталья Игоревна Черкашина* , Елизавета Петровна Кожанова , Сергей Александрович Старченко 

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: natalipv13@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. В бинарных дисперсных системах различной природы (минеральных и полимерных) с различающимися на порядок по размеру частицами наблюдается гетерокоагуляция. Регулирование агрегативной устойчивости является ключевым моментом управления свойствами функциональных дисперсных материалов на основе подобных смешанных дисперсий. Данное исследование направлено на изучение водных моно- и бинарных дисперсий поливинилацетата, портланд-цемента, мела методом статического рассеивания лазерного излучения и оптической микроскопии. **Материалы и методы исследования.** Для изучения механизма действия модификатора FF на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров в качестве дисперсных фаз использовали мел (CaCO_3) – дисперсный технический МТД-2 (ООО «Технострой», Копанищенское месторождение), портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ЗАО «Белгородский цемент») и поливинилацетат (ООО «Кубань-Полимер»). Было изучено распределение частиц и агрегативная устойчивость дисперсий на приборе Analysette 22 NanoTecplus; размеры частиц методом оптической микроскопии с использованием микроскопа «Axio.Scope.A.1» и адсорбция олигомеров на частицах дисперсий с использованием УФ-спектрометра (SPECORD UV). **Результаты и обсуждение.** Установлено, что флороглюцинфурфурольный модификатор способствует стабилизации бинарных полимерминеральных дисперсий. Получены интегральные и дифференциальные кривые распределения полимерных частиц в широком диапазоне 0,01–2100 мкм. Показана закономерность уменьшения модалого диаметра адсорбционно модифицированных частиц с переходом от узкого к более широкому распределению с отсутствием крупных коагулюмов. **Заключение.** Предложена гипотеза, что в агрегативную устойчивость бинарных полимерминеральных дисперсий вносит значимый вклад адсорбционно-сольватный фактор агрегативной устойчивости. Роль этого фактора различна для мономинеральных и бинарных полимерминеральных дисперсий, зависит от гидрофильности поверхности и возрастает при переходе от минеральной поверхности к полимерной по мере увеличения константы Гамакера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бинарные дисперсии, агрегативная устойчивость, адсорбция, олигомеры, наномодифицирование, дифференциальное распределение, модалый радиус частиц.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2021-0015 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Черкашина Н.И., Кожанова Е.П., Старченко С.А. Регулирование агрегативной устойчивости бинарных полимерминеральных дисперсий // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т.15, № 3. С. 258–266. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>. – EDN: ENKULB.

ВВЕДЕНИЕ

Смешанные дисперсии в настоящее время широко используются в мировой научной практике [1, 2]. В бинарных дисперсных системах с частицами разной природы, отличающимися на порядок по размеру, например, полимерными и цементными частицами, наблюдается гетерокоагуляция [3–5]. В результате этого процесса происходит формиро-

вание слоя более мелких частиц полимерного типа на поверхности более крупных частиц минеральной дисперсии [6, 7].

Регулирование размера частиц дисперсной фазы и агрегативной устойчивости, определяемой балансом сил отталкивания и притяжения между частицами гибридной дисперсной фазы, является ключевым моментом в управлении свойствами функциональных дисперсных материалов на основе смешанных

© Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Черкашина Н.И., Кожанова Е.П., Старченко С.А. 2023

дисперсий [8–11]. Одним из наиболее эффективных способов регулирования агрегативной устойчивости дисперсий является применение химических добавок-модификаторов, обладающих поверхностной активностью на наноуровне — на границе раздела фаз [12, 13]. Однако в бинарных дисперсных системах возможны проявления явлений синергизма и антагонизма ввиду присутствия в системе нескольких модифицирующих добавок. Вопросы, связанные с исследованием этих эффектов, имеют большое практическое значение для решения реотехнологических задач в инновационной строительной отрасли — аддитивных технологиях [14].

Комплекс модификаторов, обладающих водоредуцирующими свойствами в дисперсной системе и позволяющих регулировать реологию смеси, может привести к появлению ряда эффектов, обуславливающих следующее: аддитивность действия — компоненты действуют как индивидуальные вещества, но результат их действия суммируется; эффект антагонизма — в комплексе один компонент снижает эффективность действия другого компонента, что приводит к увеличению их оптимальных дозировок при совместном присутствии; эффект синергизма — компоненты в комплексе способны усилить действие друг друга благодаря проявлению активизирующего действия, что обуславливает снижение оптимальных дозировок по сравнению с аддитивно найденной величиной [15, 16].

Целью данного исследования являлось изучение агрегативной устойчивости бинарных полимерминеральных дисперсий и научно-теоретическое обоснование возможности регулирования агрегативной устойчивости за счет наномодифицирующего действия модификатора оксифенолфурфурольного ряда с точки зрения поверхностных явлений и коллоидно-химических закономерностей на границе раздела фаз с учетом специфики гибридных поверхностей.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В работе для модифицирования частиц на наноуровне исследуемых моно- и бинарных дисперсий применяли модификатор на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров (далее модификатор FF). Данный модификатор был синтезирован авторами методом поликонденсации в виде водного раствора бурого-желтого цвета с концентрацией 20% по сухому веществу; $M = 1200 \pm 30$; $\rho = 1210$ кг/м³. В качестве дисперсных фаз были использованы следующие материалы:

- мел дисперсный технический МТД-2, ООО Технострой, Копанищенское месторождение; удельная поверхность $S_{уд} = 8336$ см²/г. Состав химический, вес. %: CaO — 55,42, CO₂ — 43,61, Fe₂O₃ —

0,08, SO₃ — следы, H₂O — 0,39, нерастворимый остаток — 0,2;

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 31108), ООО Белгородский цемент. Состав, мас. %: химический, CaO — 66,3, SiO₂ — 22,5, Al₂O₃ — 5,0, Fe₂O₃ — 4,4, MgO — 0,7, SO₃ — 0,2; минералогический C₃S — 64,0, C₂S — 16,0, C₄AF — 13,0, C₃A — 4,0, CaO_{св} — 0,37.
- поливинилацетат (C₄H₆O₂)_n, ООО Кубань-Полимер, марка Д51С (ГОСТ 18992–80).

Агрегативную устойчивость исследуемых бинарных дисперсий оценивали методом статического рассеяния лазерного излучения по наименьшему радиусу (модальному диаметру) частиц. Используемый прибор Analysette 22 NanoTecplus работает в диапазоне от 10 нм до 2000 мкм. Для измерения используются два полупроводниковых лазера: зеленый с длиной волны 532 нм и 7 МВт используется для мелких и сверхмалых частиц, инфракрасный с длиной волны 850 нм, 9 МВт — для измерений размеров более крупных частиц. Исследование частиц наноразмерного диапазона требует регистрации излучения, рассеянного в противоположном направлении. Для этого применяется третий лазер, который позволяет проводить измерения по обратному светорассеянию. В этом случае лазерный луч направлен на образец, который расположен перед детектором.

Методом оптической микроскопии (микроскоп Axio.Scope.A.1) определяли размеры частиц в водных моно- и бинарных дисперсиях. Анализ проводили после установления адсорбционного равновесия и при соблюдении отношения количества дисперсной фазы к дисперсионной среде. В параллельных испытаниях получали не менее 5 снимков каждого состава исследуемых систем с изменением увеличения съемки и локальной сменой области исследования. Интерпретацию результатов микроскопии проводили по изображениям одинакового увеличения и с учетом суммарной площади захваченных объективом частиц.

Адсорбцию модификаторов на частицах моно- и бинарных дисперсий изучали спектрофотометрированием дисперсионной среды на SPECORD UV при волновом числе 50×10^{-3} см⁻¹ по уменьшению концентрации адсорбата в системе после установления адсорбционного равновесия. Для этого готовили серию раствора модификатора методом разбавления, навески адсорбента (минерального, полимерного компонента или их смеси) были одинаковыми. После 30-минутного перемешивания исследуемые системы центрифугировали при 3000 об/мин, концентрацию неадсорбированного модификатора определяли по калибровочному графику, рассчитывали количество адсорбата и строили изотермы адсорбции для моно- и бинарных систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При введении полимерного компонента в меловую дисперсию частицы мела начинают коагулировать. Микрофотографии моно- и бинарной дисперсий представлены на рис. 1а и 1б. Средний диаметр частиц полимермеловой дисперсии увеличивается по сравнению с контрольной меловой дисперсией.

Для мономинеральной дисперсии мела характерно наличие крупных коагулюмов с размерами в диапазоне $10\div 40$ мкм, процентное содержание которых составило 44%, при этом модальный диаметр частиц этой фракции приблизительно 17 мкм (рис. 1а). Введение полимерного компонента и анализ коагуляционной структуры бинарной дисперсии (рис. 1б) показал, что наблюдается увеличение количества крупных коагулюмов с размерами $10\div 40$ мкм до 53% и формируются ансамбли частиц более крупных размеров $40\div 50$ мкм — 11%. При этом модальный диаметр крупных коагулюмов увеличивается до 19,5 мкм.

При адсорбционном наномодифицировании флороглюцин-фурфурольными олигомерами частиц бинарной полимермеловой дисперсии (рис. 1б, 1в) наблюдается пептизация крупных гетерокоагулюмов фракции $20\div 50$ мкм. Так, на микрофотографии (рис. 1в) самые крупные ансамбли частиц представ-

лены фракцией $10\div 20$ мкм. При этом их содержание в результате наномодифицирования увеличилось с 27 (рис. 1б) до 79%, а модальный диаметр крупных коагулюмов уменьшился с 19,5 до 14 мкм.

Аналогичные результаты были получены и при сравнительном анализе цементных и полимерцементных дисперсий (рис. 2).

При введении второго компонента — полимерного — в цементную монодисперсию также наблюдается увеличение процентного содержания коагулюмов наибольшего размера и формирование коагуляционной структуры новой размерной фракции $60\div 85$ мкм (рис. 2б). Модальный диаметр частиц бинарной полимерцементной дисперсии увеличивается до 27 мкм по сравнению с 20 мкм, характерными для монодисперсии цементной системы (рис. 2а).

Наномодифицирование частиц бинарной полимерцементной системы флороглюцинфурфурольными олигомерами приводит к пептизации коагулюмов (рис. 2в). На микрофотографии самые крупные коагулюмы частиц с содержанием около 20% представлены размерной фракцией $10\div 20$ мкм с модальным диаметром 13 мкм.

В процессе исследования влияния наномодифицирования на монодисперсии частиц полимерной природы были изучены коагуляционные структуры частиц поливинилацетата. Полимерная дисперсия

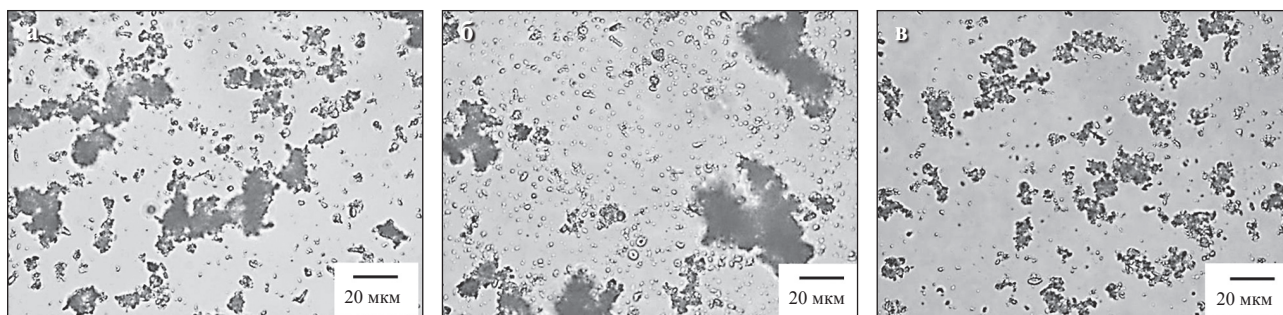


Рис. 1. Микрофотографии моно- и бинарных дисперсий: а — меловой; б — полимермеловой; в — модифицированной полимермеловой

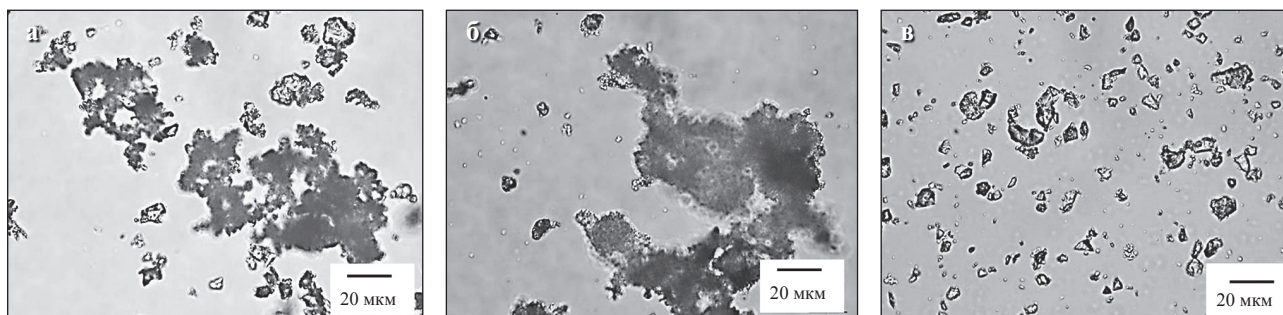


Рис. 2. Микрофотографии моно- и бинарных дисперсий: а — цементной; б — полимерцементной; в — модифицированной полимерцементной

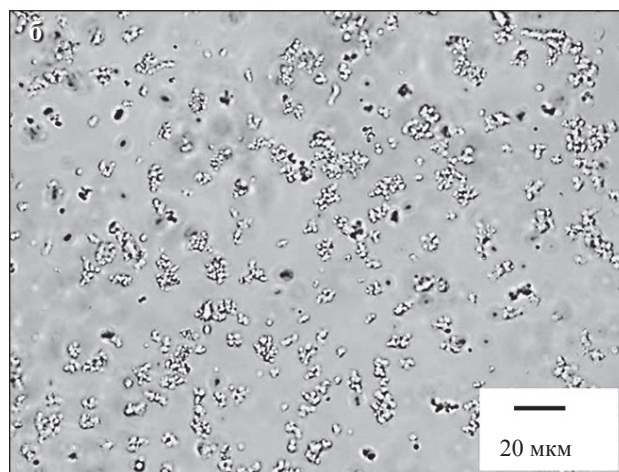
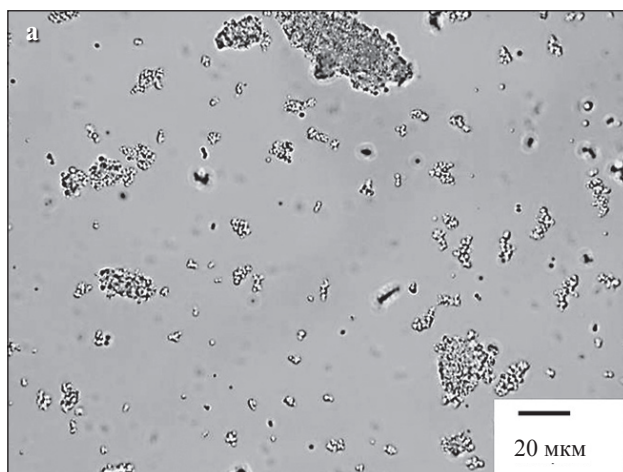


Рис. 3. Микрофотографии полимерной монодисперсии с увеличенным содержанием дисперсионной среды в 25 раз: а — немодифицированная; б — модифицированная флороглюцинфурфурольными олигомерами

для создания одинаковых начальных характеристик системы была разбавлена водой для соответствия количества дисперсионной среды в серии исследований моно- и бинарных дисперсий различной природы. Наномодифицирование частиц осуществляли флороглюцинфурфурольными олигомерами в концентрации 0,2% модификатора по сухому веществу от массы дисперсной фазы (рис. 3).

Сравнительный анализ микроскопических исследований позволил наглядно зафиксировать замедление коагуляционных процессов в результате адсорбционного наномодифицирования границы раздела фаз флороглюцинфурфурольными олигомерами. При этом наблюдали снижение модального размер частиц монодисперсии поливинилацетата до 5 мкм. Образование крупных коагулюмов, характерных для немодифицированной модисперсии модального размера частиц 30 мкм (рис. 3а), зафиксировано не было (рис. 3б).

Результаты микроскопии хорошо согласуются с данными, полученными на лазерном анализаторе размеров частиц в широком диапазоне. В монодисперсии поливинилацетата зафиксированы крупные агломераты, а в наномодифицированной флороглюцинфурфурольными олигомерами — полное их отсутствие.

Дифференциальные кривые распределения наномодифицированных частиц монодисперсии поливинилацетата в более широком диапазоне, полученные по результатам исследований на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22, показали, что в начальный момент времени характерно более широкое распределение и незначительное уменьшение модального диаметра частиц по сравнению с немодифицированной монодисперсией. Так, модальный диаметр частиц полимерной монодисперсии со-

ставляет 6,8 мкм, а в модифицированной — 5,9 мкм, то есть модальный размер частиц уменьшился лишь на 13%. Данные исследования подтвердили наличие крупных агрегатов (50–60 мкм) в контрольной монодисперсии полимера, определяемые визуальным методом оптической микроскопии, и их полное отсутствие в наномодифицированной полимерной дисперсии [17] (рис. 4).

Однако стоит отметить, что в исследуемых бинарных дисперсиях присутствует дополнительно еще и полимерный модификатор границы раздела фаз — поливиниловый спирт (ПВС), его вводят еще на стадии получения поливинилацетатной дисперсии, и, как следствие, он присутствует во всех исследуемых бинарных дисперсиях. Ранее авторами [18] был исследован процесс десорбции молекул ПВС в присутствии модификатора FF. Исследования проводили методом добавок по разработанной методике рефрактометрического анализа. Было установлено, что при введении флороглюцинфурфурольных олигомеров происходит увеличение количества десорбированных молекул ПВС по сравнению с величиной десорбции при простом разбавлении полимерной дисперсии. Разность величин десорбции составила 39%. При этом происходит совместная конкурентная адсорбция молекул двух модификаторов.

Дисперсионный анализ на лазерном дифрактометре Microtrac S3500 в малом диапазоне до 6,5 мкм наномодифицированных монодисперсий поливинилацетата показал, что с увеличением концентрации модификатора FF (рис. 5) наблюдается уменьшение модального диаметра частиц при одновременном переходе от узкого к более широкому распределению после определенной концентрации модификатора FF, что позволяет зафиксировать концентрационный предел олигомеров, выше которого наблюдает-

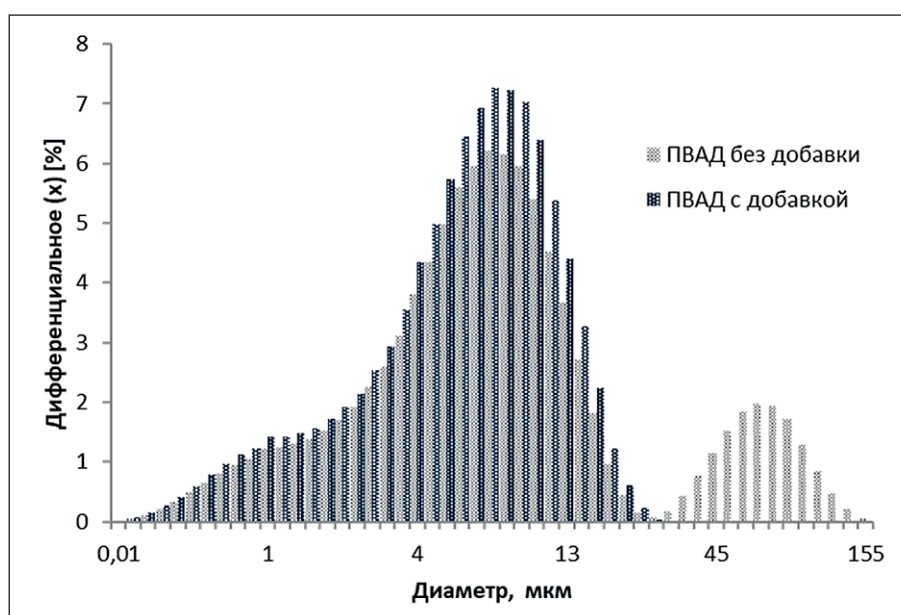


Рис. 4. Дифференциальные кривые распределения контрольной монодисперсии поливинилацетата (ПВАД) без добавки и модифицированных частиц монодисперсии ПВАД

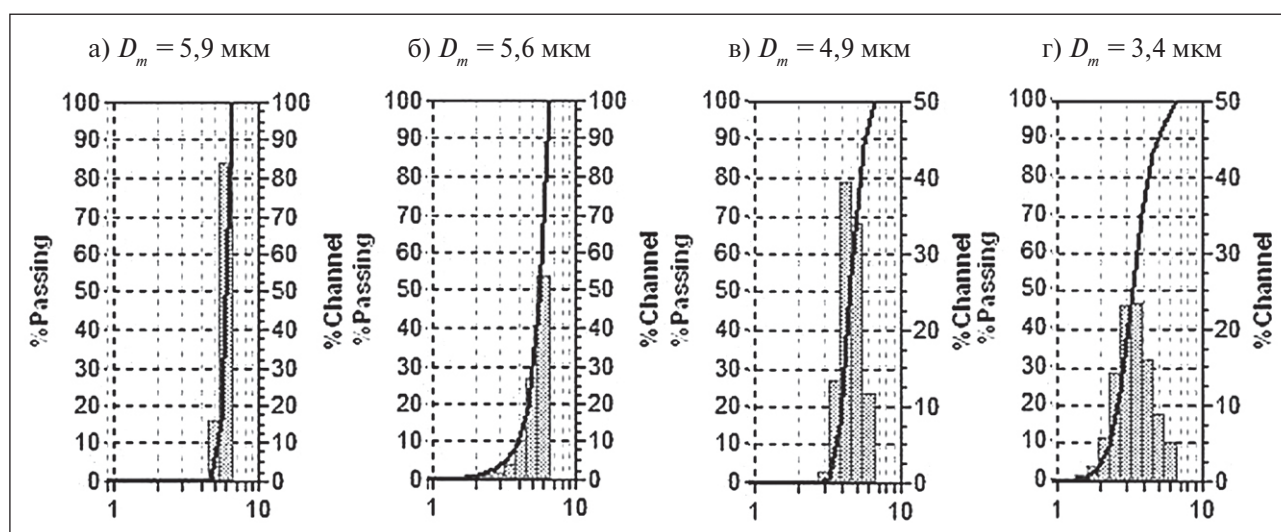


Рис. 5. Дисперсионный анализ модифицированных дисперсий ПВАД:

а) 0% модификатора; б) 0,01%; в) 0,2%; г) 0,3%

ся коагуляция первичных частиц, вероятно, за счет мостикового эффекта взаимодействия (образование ассоциатов) адсорбированных молекул модификаторов.

В предыдущих работах [19–21] авторами было установлено, что оксифенолфурфурольные олигомеры, адсорбируясь на поверхности частиц монодисперсий, образуют наноразмерный мономолекулярный слой. В данной работе получены изотермы адсорбции олигомерных молекул на поверхности частиц бинарных дисперсий (рис. 6).

Анализ изотерм адсорбции наномодификатора FF на поверхности частиц монодисперсий минеральной природы позволил отнести их по характерному выпуклому начальному участку к изотермам ленгмюровского типа. Полученные же изотермы адсорбции на частицах монодисперсий полимерной природы и бинарных полимерминеральных дисперсий обладают ярко выраженной S-образной формой (рис. 6). Многократной сменой растворителя было установлено, что во всех исследуемых моно- и бинарных системах наблюдается физическая адсорбция.

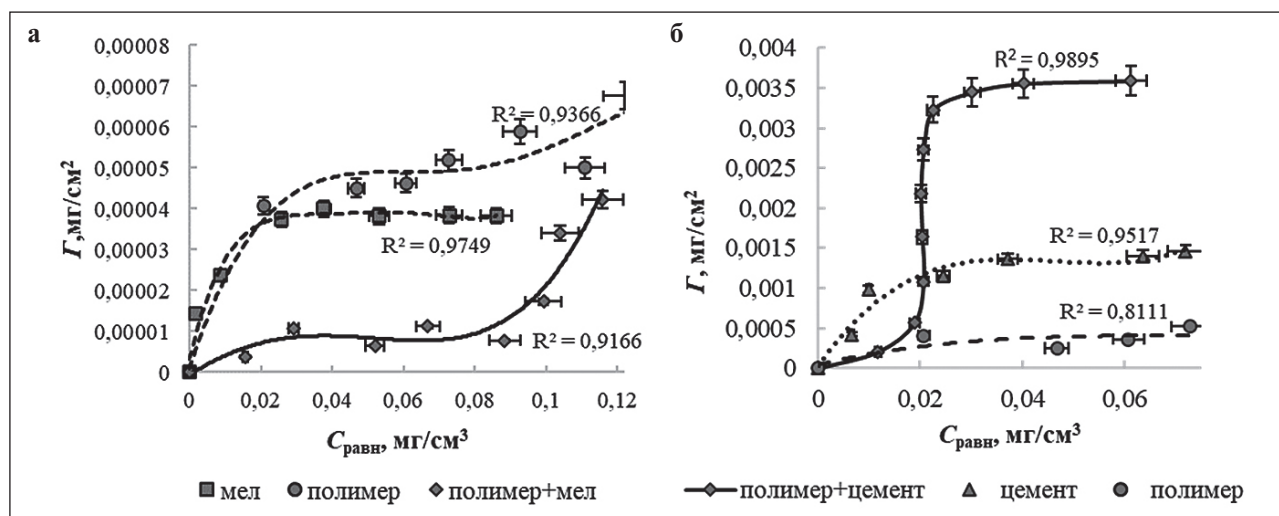


Рис. 6. Изотермы адсорбции молекул модификатора FF на частицах моно- и бинарных систем (полимерминеральное отношение 0,1)

Согласно S-образной форме полученных изотерм адсорбции можно сделать следующий вывод. Энергия взаимодействия адсорбат-адсорбат в бинарной системе между молекулами FF и полимерного стабилизатора ПВС, введенного еще на стадии суспензионной полимеризации с одной стороны и с увеличенным его содержанием в цементной монодисперсии за счет поверхностного гидролиза ацетатных групп в щелочной среде цементного геля с другой стороны, больше, чем энергия взаимодействия адсорбат-адсорбент. Это объясняется тем, что на уровне адсорбируются не отдельные молекулы модификаторов, а их ассоциаты. Однако не будем исключать и вероятность того, что при концентрациях FF, меньших, чем требуется для полного заполнения адсорбционного монослоя, происходит гетерокоагуляция бинарных частиц, что также влияет на форму изотермы адсорбции.

Таким образом, в дисперсионной среде бинарной системы находятся два адсорбционно способных вещества: молекулы наномодификатора FF и полимерного стабилизатора ПВС. Флороглюцинфурфурольные олигомеры — это ионогенное ПАВ на границе твердое тело-жидкость с гидрофильными оксигруппами и гидрофобными ароматическими и фурановыми кольцами. Поливиниловый спирт — это неионогенное ПАВ с гидрофильными ОН⁻-группами и гидрофобной углеводородным скелетом. Атракционное взаимодействие в системе адсорбат-адсорбат обуславливает проявление одного из рассмотренных во введении эффектов синергизма или антагонизма в зависимости от вида бинарной системы.

Анализ изотерм адсорбции комплекса адсорбентов на гибридной поверхности в бинарной системе показал, что в случае полимермеловой дисперсии

экспериментальная величина Γ_{max} меньше величины (рис. 6а), рассчитанной по правилу аддитивности, а в бинарной полимерцементной системе, наоборот, экспериментальная Γ_{max} больше аддитивной величины адсорбции (рис. 6б). Это с большой долей вероятности свидетельствует об атракционном взаимодействии в системе адсорбат-адсорбат. По уравнению Фрумкина и анализу типичных изотерм дана оценка степени этого взаимодействия в соответствии с величинами равновесной Γ и максимальной адсорбции Γ_{max} , г/м².

$$\theta = \Gamma/\Gamma_{max}, b \cdot C = (\theta/1-\theta) \cdot e^{-2a\theta},$$

где C — равновесная концентрация адсорбата, г/м³; b — константа адсорбционного равновесия; a — атракционная постоянная.

В случае $a > 0$ изотерма приобретает S-образную форму, характерную для притяжения между адсорбированными частицами. При $a < 0$ форма изотермы имеет логарифмический вид, указывающий на отталкивательное взаимодействие между адсорбированными частицами. При $a = 0$ наблюдается компенсация эффектов притяжения и отталкивания, при этом формально выполняется изотерма адсорбции Ленгмюра.

При адсорбции молекул наномодификатора FF на частицах минеральной природы атракционная константа $a < 1$, что характерно для преобладания отталкивания между адсорбированными частицами. При конкурентной адсорбции FF и ПВС на частицах монодисперсии полимера $a = 0$. При адсорбции на гибридной поверхности бинарных полимермеловых и полимерцементных дисперсий $a > 0$ согласно типичным изотермам (рис. 7), рассчитанным по уравнению, представленному в работе [22].

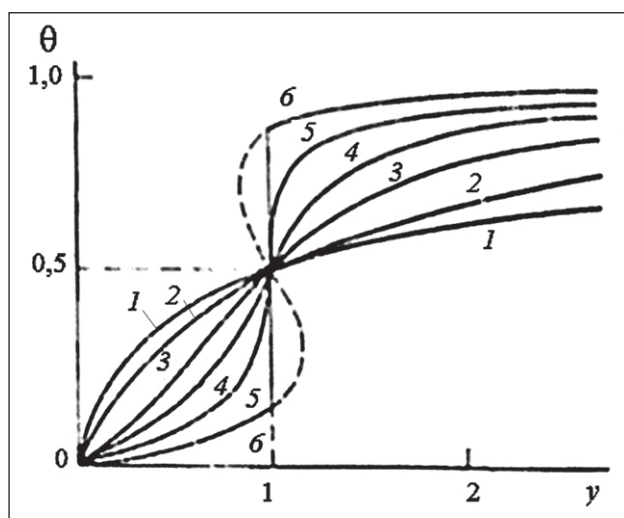


Рис. 7. Изотермы адсорбции, рассчитанные по уравнению Фрумкина при различных значениях аттракционной постоянной: 1 – $a = -1$; 2 – $a = 0$; 3 – $a = 1$; 4 – $a = 1,5$; 5 – $a = 2$; 6 – $a = 2,5$

Значение аттракционной константы a для адсорбатов при адсорбции их в монодисперсных системах практически равно нулю. При изучении процесса адсорбции комплекса адсорбатов в бинарных системах наблюдали рост аттракционного взаимодействия, что, вероятно, связано с пространственными затруднениями при их совместной конкурентной адсорбции. Увеличение величины константы a до 2,5 свидетельствует о росте энергии взаимодействия между адсорбатами и объясняет экспериментальные величины $\Gamma_{\max}$ выше расчетных значений по правилу аддитивности. Взаимодействие в системе адсорбат-адсорбат с учетом наличия разных гидрофильных групп приводит к адсорбции ассоциатов в виде цепочек. В результате этого в бинарной полимерцементной системе проявлялся синергетический эффект, обеспечивающий замедление (в изучаемом временном диапазоне полное отсутствие) коагуляции и гетерокоагуляции частиц бинарных систем комплексным действием модификаторов FF и ПВС (рис. 4), в результате чего система приобретает агрегативную устойчивость.

В бинарной полимермеловой системе определен эффект антагонизма при адсорбции комплекса модификаторов FF и ПВС, что можно объяснить относительно равносильным взаимодействием между адсорбатами и в системе адсорбат-адсорбент. По результатам микроскопии (рис. 1) наглядно видно неполное предотвращение коагуляции частиц при наномодифицировании флороглюцинфурфурольными олигомерами, при этом для монодисперсий данное количество модификатора является оптимальным для пептизации меловых частиц до первичных частиц.

Агрегативная устойчивость бинарных дисперсий обусловлена наличием в составе модификатора FF и ПВС гидрофобных и гидрофильных ионогенных и неионогенных групп, вследствие чего проявляется совместное действие ряда факторов агрегативной устойчивости. Как показали результаты исследования, агрегативная устойчивость моно- и бинарных дисперсий различна и, вероятно, зависит еще от гидрофильности гибридной полимерминеральной поверхности. Действие адсорбционно-сольватного обусловлено гидрофилизацией поверхности, что приводит к снижению константы Гамакера. А по мере увеличения константы Гамакера, что характерно для перехода от минеральной поверхности к полимерной для монодисперсий, будет возрастать вклад адсорбционно-сольватного фактора в агрегативную устойчивость бинарных систем с комплексом модификаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На лазерном дифрактометре в диапазоне от 0,8 до 6500 нм определено, что дисперсия поливинилацетата при увеличении количества дисперсионной среды теряет агрегативную устойчивость. Модальный диаметр частиц увеличивается с 4,5 до 6,0 мкм. Микроскопический анализ наглядно показал формирование крупных ансамблей полимерных частиц до 40 мкм в диаметре. Анализируя полученные результаты, можно не согласиться с утверждением, сделанным в работе [23], о том что поливинилацетатная дисперсия разбавляется водой в любом отношении и хорошо совмещается с цементом без каких-либо признаков коагуляции. Наблюдается гетерокоагуляция бинарных дисперсий.

Доказано, что флороглюцинфурфурольный модификатор способствует стабилизации бинарных полимерминеральных дисперсий. По дифференциальным кривым распределения частиц в широком диапазоне от 10 нм до 2100 мкм установлена закономерность снижения модального диаметра адсорбционно наномодифицированных полимерных частиц в исследуемых концентрационных пределах, полное отсутствие крупных коагулюмов, переход к более широкому распределению. Получены закономерности взаимодействия компонентов комплекса модификаторов и их влияния на свойства бинарных дисперсий.

В полимермеловой системе выявлен эффект антагонизма в присутствии комплекса добавок, обусловленный относительно равным действием сил как в системе адсорбат-адсорбент, так и адсорбат-адсорбат. В полимерцементной системе, напротив, наблюдается эффект синергизма, обуславливающий значительное замедление коагуляционных процессов совместным действием комплекса модификаторов, в результате

чего бинарная система приобретает агрегативную устойчивость.

Предложена гипотеза, что в агрегативную устойчивость бинарных полимерминеральных дисперсий вносит значимый вклад адсорбционно-сольватный

фактор. Степень действия его различна для моно- и бинарных полимерминеральных дисперсий и зависит от гидрофильности поверхности дисперсной фазы. Роль этого фактора возрастает при увеличении величины константы Гамакера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shenoy S.S., Sadowsky R., Mangum J.L., Hanus L.H., Wagner N.J. Heteroflocculation of binary latex dispersions of similar chemistry but varying size. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2003; 2(268): 380–393. — <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.08.039>
2. Tinkler J.D., Scacchi A., Kothari H.R., Tulliver H., Argaiz M., Archer A.J., Martín-Fabiani I. Evaporation-driven self-assembly of binary and ternary colloidal polymer nanocomposites for abrasion resistant applications. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021; (581): 729–740. — <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.08.001>
3. Blinov A.V., Maglakelidze D.G., Rekhman Z.A., Yasnaya M.A., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Blinova A.A., Kolodkin M.A., Alharbi N.S., Kadaikunnan S., Thiruvengadam M., Shariati M.A., Nagdalian A.A. Investigation of the Effect of Dispersion Medium Parameters on the Aggregative Stability of Selenium Nanoparticles Stabilized with Catamine AB. *Micromachines*. 2023, 14: 433. — <https://doi.org/10.3390/mi14020433>
4. Horszczaruk E., Łukowski P., Seul C. Influence of Dispersing Method on the Quality of Nano-Admixtures Homogenization in Cement Matrix. *Materials*. 2020; 13: 4865. — <https://doi.org/10.3390/ma13214865>
5. Sosa M.E., Villagrán-Zaccardi Y.A., Peralta J.P. and Zega C.J., Efficiency of cement-admixture systems in mortars with binary and ternary Portland cements. *DYNA*. 2018; 85 (204):134–142.
6. Li H., Qiu Y. Dispersion, sedimentation and aggregation of multi-walled carbon nanotubes as affected by single and binary mixed surfactants. *Royal Society Open Science*. 2019; 6: 190241. — <https://doi.org/10.1098/rsos.190241>
7. Lange A., Plank J. Contribution of non-adsorbing polymers to cement dispersion. *Cement and Concrete Research*. 2016; 79: 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.003>
8. Gonzatti G.K., Netz P.A., Fiel L.A., Pohlmann A.R. Colloidal Dispersion Stability: Kinetic Modeling of Agglomeration and Aggregation. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2015; 26(2): 373–380. — <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140290>
9. Домниченко Р.Г., Вострикова Г.Ю., Никулин С.С. Получение совмещенной эпоксианово-акриловой дисперсии // Вестник ВГУИТ. 2021. 83(1). 278–283. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-278-283>
10. Brinke A.J.W., Bailey L., Lekkerkerker H.N.W., Maitland G.C. Rheology modification in mixed shape colloidal dispersions. Part I: pure components. *Soft Matter*. 2007: 1145–1162. — <https://doi.org/10.1039/B704742H>
11. Опанасенко О.Н., Крутько Э.Т., Лукша О.В., Яковец Н.В. Структурообразование в смешанных дисперсиях на основе битумных и эпоксидных эмульсий // Труды БГТУ. 2011 4. 123–125.
12. Jędrzejczak P., Ławniczak Ł., Ślosarczyk A., Kłapiszewski Ł. Physicomechanical and Antimicrobial Characteristics of Cement Composites with Selected Nano-Sized Oxides and Binary Oxide Systems. *Materials*. 2022; 15, 661. <https://doi.org/10.3390/ma15020661>
13. Щербань М.Г., Сосна М.Х., Гоголишвили О.Ш., Аникушин Б.М., Корнилицина Е. В. Динамическая агрегативная устойчивость высококонцентрированной дисперсии // Вестник ПГУ. Химия. 2018. 8(3). 360–368. — <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2018-3-360368>
14. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S., Ng S. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112: 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.014>
15. Klein B., Pawlik M. Rheology modifiers for mineral suspensions. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2005; 22: 83–88. — <https://doi.org/10.1007/BF03403119>
16. Kosukhin M. M., Kosukhin A. M. The Role of Surface Phenomena in Modified Cement Dispersions at Studying Poly-Functional Modifiers' Mechanism of Action. *Solid State Phenomena*. 2020; 299:1038–1043. — <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.299.1038>
17. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Ястребинский Р.Н. Влияние адсорбционного модифицирования на агрегативную устойчивость дисперсного поливинилацетата // Вестник технологического университета. 2020. 11(23). 63–68.

18. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Кожанова Е.П. Изучение конкурентной адсорбции модификаторов на частицах полимерцементной системы для аддитивных технологий // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2019. 3(19). 315–324. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/748>

19. Poluektova V.A. Electrokinetic Properties and Aggregative Stability of Polymer–Mineral Dispersions for 3D Printing in Building. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2019; 9(93): 1783–1788. <https://doi.org/10.1134/S0036024419090164>

20. Полуэктова В.А., Кожанова Е.П., Кудина А.Е. Адсорбция флороглюцинфурфурольных олигомеров на поверхности полимерминеральных дисперсий // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. 10. 116–122. https://doi.org/10.12737/article_59cd0c61195958.39964053

21. Shapovalov N.A., Poluektova V.A. Some aspects of nanomodification of mineral dispersions by oligomers based on trifunctional oxyphenyl // *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. 2016; 6(8): 43–57. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-6-43-57>

22. Электронные процессы в растворах органических соединений: учебное пособие / Под ред. Б.Б. Дамаскина. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1985. 312 с.

23. Попов К.Н. Полимерные и полимерцементные бетоны, растворы и мастики. М.: Высш. школа, 1987. 239 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Полуэктова Валентина Анатольевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, val.po@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8998-0698>

Шаповалов Николай Афанасьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, shap.bstu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4624-3385>

Черкашина Наталья Игоревна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник-руководитель научно-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, natalipv13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

Кожанова Елизавета Петровна – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, elizzinchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0112-0584>

Старченко Сергей Александрович – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, sereja650@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4827-8322>

ВКЛАД АВТОРОВ

Полуэктова В.А. – научное руководство; постановка целей и задач исследования; написание исходного текста; анализ результатов исследования.

Шаповалов Н.А. – концепция исследования; анализ результатов исследования.

Черкашина Н.И. – разработка методологии исследования; доработка текста статьи.

Кожанова Е.П. – проведение экспериментальной части исследования; анализ результатов исследования.

Старченко С.А. – проведение экспериментальной части исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; одобрена после рецензирования 03.05.2023; принята к публикации 10.05.2023.