

УДК 541.183.12

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-5-300-43-52

*С. С. Дрябина, Т. П. Богданова, Ю. В. Шулевич, И. А. Новаков***ИЗУЧЕНИЕ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ КАОЛИНОВОЙ ДИСПЕРСИИ
ФЛОКУЛЯНТАМИ НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА*****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: s_dryabina@vstu.ru

Методом турбидиметрии исследована флокулирующая способность композиций на основе хитозана и синтетического катионного полиэлектролита, а также водорастворимого привитого сополимера хитозана с триметил[метакрилоилоксиэтил]аммоний метилсульфатом. Выявлен высокий эффект осветления водной каолиновой суспензии в присутствии сополимера хитозана, по сравнению с немодифицированным образцом, с одновременным увеличением концентрационной зоны дестабилизации. Установлена зависимость скорости осаждения дисперсии каолина от состава и порядка введения компонентов для композиций на основе хитозана; показано синергетическое действие изученных композиций, что позволяет рекомендовать их в процессах дестабилизации дисперсных систем.

Ключевые слова: хитозан, сополимер хитозана, композиции, флокуляция, эффект осветления, синергетический эффект, скорость осаждения суспензии каолина

Введение

Вопросы стабилизации и дестабилизации дисперсных систем являются неотъемлемой частью большинства технологических процессов. Флокуляция – один из способов целенаправленного регулирования устойчивости различных по природе дисперсий введением специальных реагентов (флокулянтов) [1–6]. Особое место в ряду реагентов, применяемых для регулирования устойчивости дисперсных систем и процессов обезвоживания осадков, занимают полиэлектролиты. Предпочтительнее выбирать катионные полиэлектролиты достаточно высокой молекулярной массы и заряда полиионов, противоположного по знаку заряду поверхности частиц дисперсной фазы. Эти параметры макромолекул способствуют эффективному флокулообразованию, что отражается в минимальной остаточной мутности дисперсных систем при низких концентрациях реагентов, а также широком интервале зоны дестабилизации [7–9].

Наряду с большим ассортиментом катионных полиэлектролитов синтетической природы большой интерес для использования в качестве флокулянта в настоящее время вызывает хитозан – полимер, получаемый из природного возобновляемого сырья. Перспективность этого полисахарида связана с его уникальными свойствами – биоразлагаемостью, высокой емкостью поглощения металлов, а продукты его разложения не токсичны и не канцерогенны. Благодаря такому комплексу свойств возможно

эффективное использование хитозана в процессах регулирования устойчивости различных систем – от модельных дисперсий каолина, бентонита и других глин до очистки сточных вод микробиологических производств [10–13]. Однако из-за меж- и внутримолекулярных водородных связей хитозан растворим только в разбавленных растворах кислот, благодаря протонированию аминогруппы $-NH_2$, что существенно ограничивает возможности его использования. Поэтому чаще используют модифицированные формы хитозана с увеличенной растворимостью в водных средах.

В сложных многокомпонентных дисперсиях, в которых возможно присутствие большого числа различных примесей, используются композиции одноименно заряженных катионных полиэлектролитов. Определенным образом подобранные компоненты таких композиций позволяют достичь синергетического эффекта флокулянтов. Введение хитозана во флокулирующие композиции и уменьшение тем самым доли синтетической составляющей важно как для практических задач с целью снижения техногенного воздействия на окружающую среду, так и для фундаментальных исследований в области анализа механизмов флокуляции многокомпонентными флокулирующими смесями.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование флокулирующей способности хитозана как в составе бинарных композиций катионных полиэлектролитов, так

© Дрябина С. С., Богданова Т. П., Шулевич Ю. В., Новаков И. А., 2025.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZUS-2023-0003 на основании соглашения № 075-03-2023-055 от 13. 01.2023)

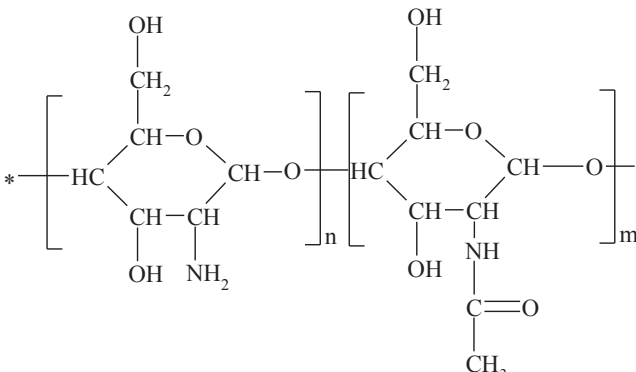
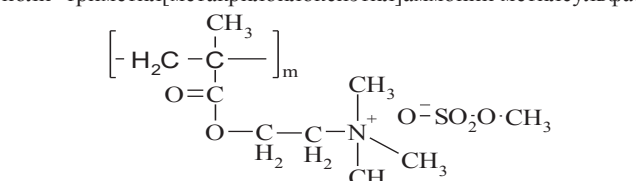
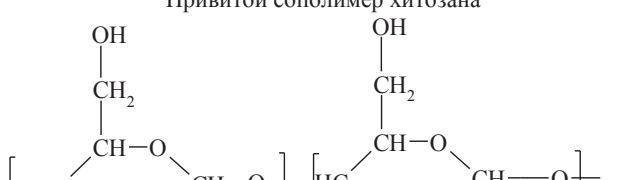
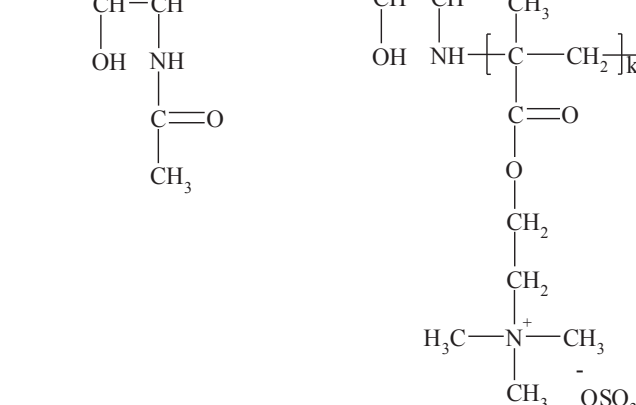
и в качестве привитого сополимера с гидрофильным сомономером триметил[метакрилоилоксиэтил]аммоний метилсульфатом.

Экспериментальная часть

Объекты исследования. В качестве объектов исследования использовали образцы хитозана (Cs2 и Cs5, «G.T.C. Bio Corporation», Китай) с различной степенью деацетилирования

(СД) и полиэлектролиты синтетической природы, синтезированные авторами (F и Cs2-F) и промышленный образец (Росфлок-99М), предоставленный НПП «КФ» г. Волжский (таблица). Хитозан является сильнокатионным жесткоцепным полимером, а молекулярная масса (ММ) на порядок ниже, чем у изученных синтетических катионных полимеров.

Катионные полиэлектролиты, исследуемые в качестве флокулянтов

Образец флокулянта	Обозначение	Характеристика
Хитозан 	Cs2	Растворим в кислой среде СД=72,4 % ММ=10 ⁵ .
	Cs5	Растворим в кислой среде СД=83,1 % ММ=10 ⁵
поли- триметил[метакрилоилоксиэтил]аммоний метилсульфат 	F	Растворим в воде ММ = 10 ⁶
Привитой сополимер хитозана 	Сополимер Cs2-F	Растворим в воде
Катионизированный полиакриламид*	Росфлок-99М	Растворим в воде

*— авторы выражают благодарность руководителю отдела исследований и разработок НПП «КФ» Орлянскому В.М. за предоставленный образец флокулянта.

Хитозан был предварительно тщательно очищен (от непрореагировавшего хитина и примесей различной природы). Для этого хитозан растворяли в 1 %-ной уксусной кислоте, фильтровали, диализовали через полупроницаемые мембраны MWCO 10000–15000 против уксусной кислоты (1 %), затем высаживали в раствор щелочи (0,3 н) и отмывали дистиллированной водой до нейтральной реакции, лиофильно сушили. Высушенные образцы хитозана хранили в эксикаторе над P_2O_5 .

Для синтеза сополимера готовили раствор Cs 2, используя в качестве растворителя 0,01 моль/л водный раствор уксусной кислоты. Концентрация хитозана составляла 0,1 масс. % (0,0058 осново-моль/л). После растворения хитозана к раствору добавляли гидрофильный сомономер – триметил[метакрилоилоксиэтил]аммоний метилсульфат в десятикратном избытке по отношению к мольному содержанию деацетилированных звеньев хитозана. После растворения сомономера реакционную смесь продували в течение 15–20 мин аргоном для удаления кислорода, после чего в реакционную смесь добавляли инициатор – персульфат аммония в концентрации $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Выбор этой концентрации инициатора был обусловлен тем, что более высокие концентрации персульфата аммония вызывают деструкцию цепей хитозана [14]. Сополимеризацию проводили в течение четырех часов при 60 °С. После завершения реакции полученный сополимер выделяли путем высаливания, для чего к реакционной среде добавляли хлорид натрия, концентрация которого составляла 2 моль/л. Далее осажденную взвесь сополимера отделяли декантацией, растворяли в воде, диализовали и высушивали лиофильно.

Надосадочную жидкость проверяли на наличие непрореагировавшего мономера методом УФ-спектроскопии и на наличие гомополимера по качественной реакции с противоположно заряженным поверхностно-активным веществом (ПАВ). УФ-спектр мономера характеризуется наличием полосы поглощения в области длин волн 200–210 нм, обусловленной наличием двойной связи в структуре мономера и ее сопряжением с карбонильной группой. Соответственно, отсутствие сигнала в этой области длин волн в надосадочной жидкости свидетельствует об отсутствии в ней мономера. Использование качественной реакции с ПАВ связано с тем, что полиэлектролиты образуют комплексы с ПАВ, которые при определенном соотношении компонентов становятся нерастворимыми в воде,

что проявляется в появлении опалесценции раствора [15]. Соответственно, отсутствие опалесценции при добавлении ПАВ свидетельствует об отсутствии в растворе гомополимера. Высаливание гомополимера совместно с хитозаном исключено, так как в работе [16] показано, что гомополимер не высаливается из раствора вплоть до концентрации хлорида натрия 6 моль/л. Кроме этого, необходимо отметить, что в условиях синтеза концентрация мономера составляет всего лишь 0,058 моль/л. Формирование гомополимера при такой концентрации мономера представляется маловероятным.

Полученный сополимер анализировали методом ИК-Фурье-спектроскопии. В ИК-спектре сополимера хитозана появляется пик в области 1520 см^{-1} , что соответствует колебаниям NH-групп. Такой сигнал отсутствует в спектре исходного хитозана, что подтверждает присоединение мономера по аминок группам хитозана. Кроме этого, отсутствие изменений сигналов поглощения в области $900\text{--}1100 \text{ см}^{-1}$, которые относятся к гликозидной связи между эфирными связями и пиранозными кольцами, подтверждают отсутствие деструкции цепей полисахарида.

Для экспериментальных исследований флокуляции растворы полиэлектролитов готовили за сутки до полного растворения образцов Cs5 и Cs2 в ацетатном буфере (рН=4,3; уксусная кислота 0,33М+ ацетат натрия 0,2М), F, Cs2-F и Росфлок-99М – в воде. Массовая концентрация растворов полиэлектролитов составляла 0,05 %.

Ацетат натрия в составе буфера использовали 3-водный; (фирма производитель ЗАО «Вектон», Санкт-Петербург), молекулярная масса $M = 82,03 \text{ г/моль}$. Уксусную кислоту использовали марки ХЧ ледяная (фирма производитель ЗАО «Вектон», Санкт-Петербург), 99,8 %-ный водный раствор, плотностью $\rho = 1,0492 \text{ г/см}^3$; $M = 60,052 \text{ г/моль}$.

В качестве модельной дисперсной системы выбрана суспензия каолина со средним радиусом частиц 18 мкм и концентрацией дисперсной фазы 0,8 масс %.

При исследовании флокулирующих свойств композиций использованы различные режимы ввода компонентов: первый – вводится сначала хитозан, дисперсия перемешивается, затем добавляется синтетический полиэлектролит и снова система перемешивается; второй – вводится синтетический полиэлектролит, перемешивается, затем добавляется хитозан; третий – реагенты добавляются в суспензию каолина одновременно и затем осуществляется перемешивание;

четвертый – реагенты предварительно смешиваются в заданном соотношении и затем добавляются в суспензию каолина.

Флокулирующую активность индивидуальных полиэлектролитов и композиций изучали методом турбидиметрии. Эффект осветления определяли по измерению оптической плотности через 30 мин после отстаивания полимер-содержащей суспензии:

$$\text{Эфф (\%)} = (D_{\text{исх}} - D_{\text{фл}}) / D_{\text{исх}},$$

где $D_{\text{исх}}$ – оптическая плотность надосадочной жидкости для исходной суспензии каолина (через 30 мин отстаивания), $D_{\text{фл}}$ – оптическая плотность надосадочной жидкости суспензии каолина в присутствии флокулянта (или композиции флокулянтов, через 30 мин отстаивания после их добавления в суспензию и равномерного перемешивания).

По изменению оптической плотности во времени изучали кинетику флокуляции турбидиметрическим методом. Оптическую плотность D измеряли на спектрофотометре В 1200 («Есcоview», Россия). Скорость флокуляции определяли по кинетическим кривым изменения оптической плотности по наклону начального прямолинейного участка кривых и вычисляли по формуле [8; 17]:

$$V_s = \left(-\frac{dD}{d\tau} \right)_{\tau \rightarrow 0}.$$

Обсуждение результатов

Флокуляция индивидуальными катионными ПЭ широко и подробно изучена, выявлены определенные зависимости флокулирующего действия от природы ПЭ, эффективного заряда полимерной молекулы, ММ, влияния солевого содержания и рН среды [8]. Представленная работа является продолжением систематических исследований, проводимых авторами и посвященных направленному регулированию устойчивости дисперсных систем с применением катионных полиэлектролитов как индивидуально, так и в композициях. Все большее внимание при дестабилизации дисперсий обращает на себя катионный полиэлектролит – хитозан [9–11; 18; 19]. Однако наряду с несомненными уникальными свойствами хитозан имеет основной

недостаток, заключающийся в нерастворимости в водных средах, что резко ограничивает его применение при дестабилизации водных дисперсий. Лишь образцы незначительной молекулярной массы (до 20–40 тысяч) являются водорастворимыми, но при этом флокулирующие показатели оказываются низкие. Поэтому осуществляют модификацию хитозана различными способами. Зачастую при химической модификации хитозана проявляется разрушение цепей с уменьшением исходной молекулярной массы. Авторами в мягких условиях был синтезирован водорастворимый сополимер хитозана с триметил[метакрилоилоксиэтил]аммоний метилсульфатом, который обладает синергизмом свойств обоих полимеров. Как показано на рис. 1, эффект осветления каолиновой суспензии в присутствии сополимера сопоставим (кривая 3) со значениями эффекта осветления в присутствии синтетического полимера F (кривая 5) и, что особенно важно, концентрационный интервал, при котором достигается эффективное осветление, достаточно протяженный. Надо отметить, что для немодифицированных образцов хитозана эффект осветления тоже достаточно высок до концентраций 1,0–2,5 мг/л (кривые 1 и 2), но дальнейшее увеличение концентрации вызывает резкое уменьшение эффекта осветления. Причем для образца Cs5 (кривая 1) с большим значением СД концентрационный интервал более протяженный, до концентрации 3 мг/л эффект осветления остается высоким (95 %). При сопоставлении данных с действием промышленного образца Росфлок-99М (кривая 4), можно отметить, что оптимальными для него являются концентрации выше 3 мг/л.

При изучении кинетики осаждения каолиновой дисперсии (рис. 2) наблюдается возрастающий характер зависимости до концентрации 0,5 мг/л с выходом на плато для всех образцов, кроме сополимера хитозана. Для сополимера хитозана наблюдается возрастание скорости на всем изученном концентрационном интервале и при этом значения скорости достигают $140\text{--}160 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, что в 1,5 раза больше, чем в присутствии синтетического флокулянта F и в 7–8 раз больше, чем для промышленного образца на основе акриламида (Росфлок-99М).

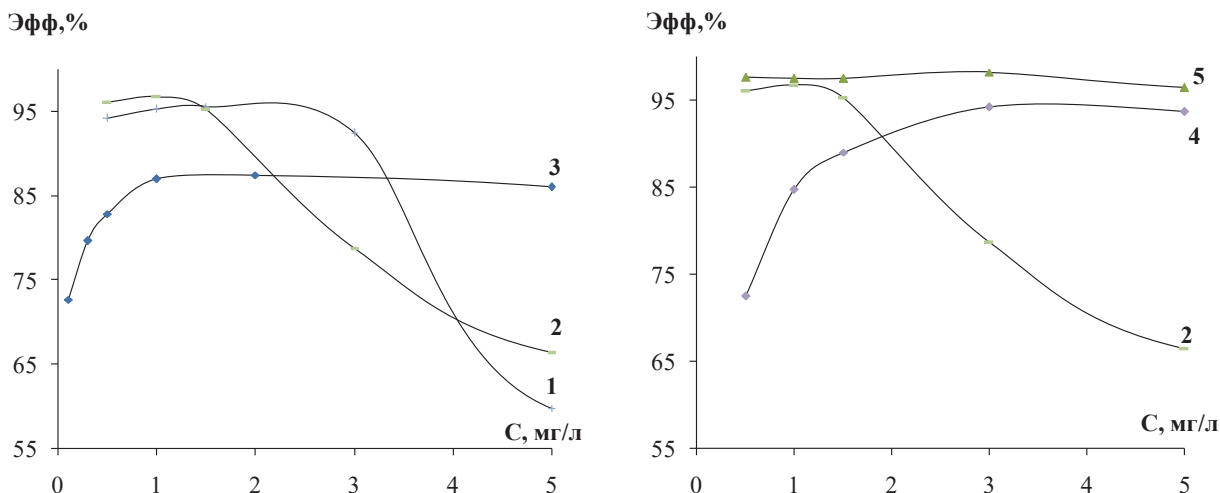


Рис. 1. Эффект осветления водной каолиновой суспензии в присутствии катионных полиэлектролитов:
1 – Cs5, 2 – Cs2, 3 – сополимер Cs2-F, 4 – Росфлок-99М, 5 – F

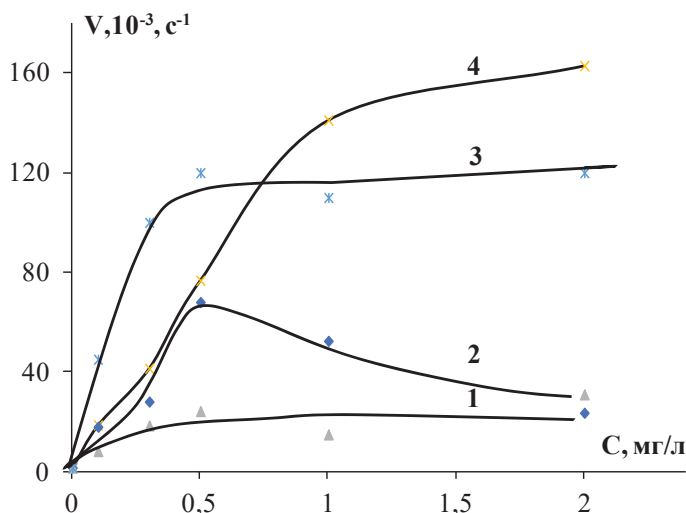


Рис. 2. Зависимость скорости седиментации водной каолиновой суспензии в присутствии катионных полиэлектролитов:
1 – Росфлок-99М, 2 – Cs2, 3 – F, 4 – сополимер Cs2-F

Полученные результаты позволяют говорить о высокой скорости осаждения каолиновой суспензии и оптимальном эффекте осветления в присутствии синтезированного сополиэлектролита на основе хитозана, что позволяет рекомендовать его для применения в процессах дестабилизации водных дисперсных систем.

Наряду с модификацией хитозана путем прививки других катионных сомономеров возможно применение бинарных композиций с включением хитозана.

Ранее авторами разработаны оптимальные бинарные композиции катионных ПЭ, применение которых позволяет повысить флокулирующую способность реагентов за счет синергетического эффекта и факта термодинамической несовместимости полимеров [17; 18; 20].

В последнем случае изучение и установление механизма флокуляции требует анализа в конкретных условиях и осложняется особенностями взаимодействия компонентов в общем растворителе и на поверхности дисперсных частиц при их адсорбции. Термодинамическая совместимость или несовместимость компонентов различным образом отражается на эффективности флокулообразования и на устойчивости дисперсных систем в целом.

При изучении флокулирующего действия композиций полиэлектролитов безусловно важным является выявление условий для эффективного синергетического действия индивидуальных компонентов. При этом подбор по-

рядка дозирования реагентов, концентрационного режима и соотношения компонентов позволяет эффективно управлять такими параметрами в процессе флокуляции, как степень агрегации частиц дисперсной фазы, степень полидисперсности, кинетика и эффективность осветления. Как было показано ранее [17], высокая степень агрегации не всегда означает эффективную очистку, а, напротив, приводит к плохому осветлению. Образование же небольших флокулов, но высокой плотности, приводит к резкому возрастанию скорости седиментации и одновременному вовлечению всех частиц в процесс флокуляции. Изучению флокулирующего действия композиций на основе двух катионных полиэлектролитов с высокой молекулярной массой (2–6 млн) было посвящено фундаментальное систематическое исследование, результатом которого явилось установление механизмов флокуляции и выявление рычагов управления устойчивостью дисперсных систем различной природы с использованием бинарных и тройных смесей. Данная работа развивает это исследование с целью усовершенствования флокулирующих композиций за счет введения хитозана, что позволяет без потери эффективности улучшить экологическую составляющую и расширить области применения таких флокулянтов, например, для очистки липидобелковых стоков [19].

Необходимо отметить, что при использовании в качестве флокулянта бинарной смеси двух полиэлектролитов надо особое внимание обратить на стадию добавления реагентов. Изучение режимов введения определяет дальнейшее синергетическое, аддитивное или иное действие индивидуальных флокулянтов в композиции. Особенно это влияние заметно при использовании разноименно заряженных полиэлектролитов, когда преимущественно реализуется механизм нейтрализации поверхностного заряда коллоидных частиц. В случае же одноименно заряженных флокулянтов режим добавления позволяет регулировать плотность флокул и образующихся осадков, а также управлять кинетикой осаждения. На данном этапе исследования авторами также был оценен вклад режимов введения флокулянтов в эффективность осветления каолиновой суспензии.

На рис. 3 для примера приведены зависимости эффекта осветления для композиции Cs5 и Росфлок-99М при различных режимах ввода компонентов. При всех режимах наблюдается высокий эффект осветления, более 88 %. Независимо от режима ввода, увеличение в составе композиции количества синтетического полиэлектролита (Росфлок-99М) приводит к уменьшению эффекта осветления, что, очевидно, связано с невысокой молекулярной массой этого полиэлектролита.

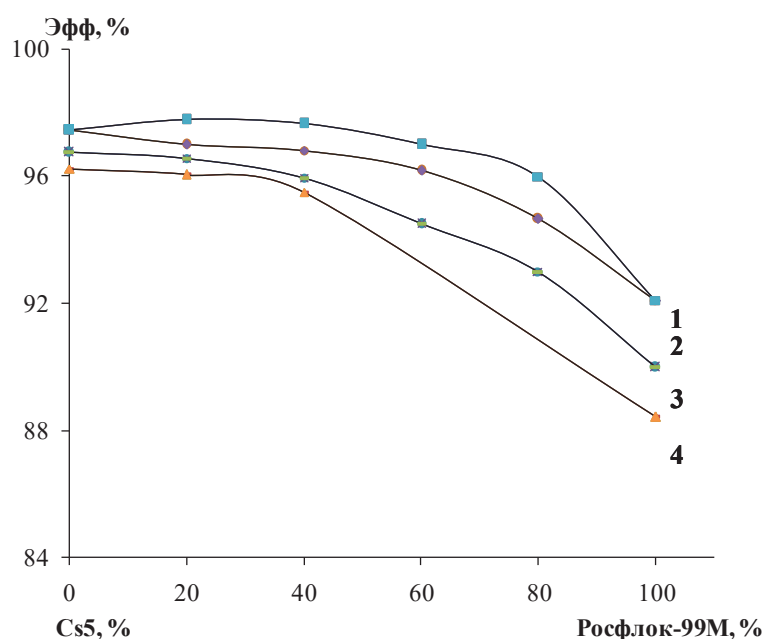


Рис. 3. Зависимость эффекта осветления водной каолиновой суспензии от состава композиции при различном порядке введения реагентов:
1 – Cs5 – Росфлок-99М; 2 – Росфлок-99М/Cs5; 3 – одновременное добавление;
4 – предварительное смешивание

Наибольшее синергетическое действие проявляется при режиме «введение хитозана – перемешивание – введение полиэлектролита синтетической природы – перемешивание» (кривая 1). При этом, по-видимому, механизмы флокуляции реализуются наиболее эффективно – нейтрализация поверхности частиц дисперсной фазы высокозаряженным хитозаном и формирование плотных флокул с вовлечением всех частиц за счет образования между ними полимерных мостиков из полимера синтетической природы.

Для проведения дальнейших исследований по флокуляции в присутствии композиций полиэлектролитов был выбран первый режим дозирования.

Исследование флокулирующей способности композиций катионных полиэлектролитов синтетической природы и хитозана показало, что для всех составов проявляется эффект синергизма (значения эффекта осветления для всех изученных составов композиций оказываются выше, чем для индивидуальных реагентов). На рис. 4 представлены зависимости эффекта осветления каолиновой дисперсии от состава для некоторых бинарных композиций с хитозаном. Как видно, для всех изученных композиций с хитозаном при любом соотношении полиэлектролитов эффект осветления свыше 90 %, и особенно важно отметить протяженную область дестабилизации по составам.

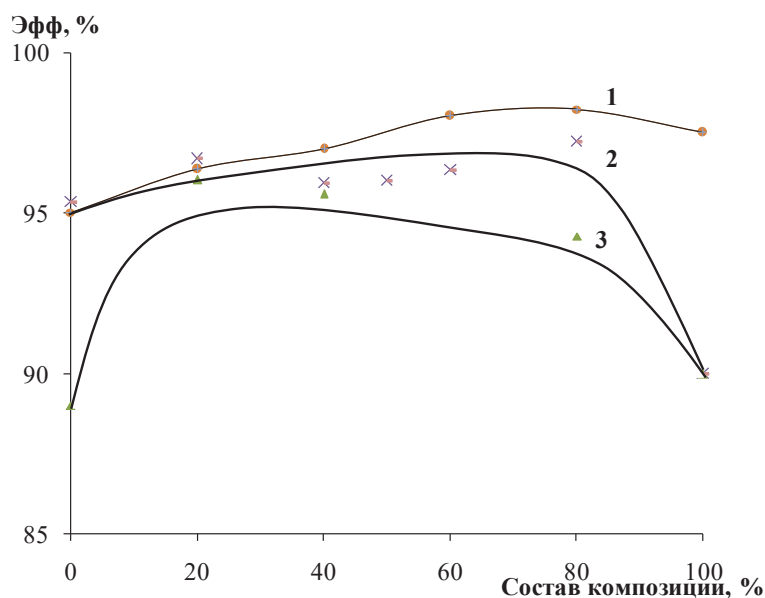


Рис. 4. Зависимость эффекта осветления водной каолиновой суспензии от состава композиций (состав композиции указан по второму компоненту):
1 – F/ Cs2; 2 – F/ Cs5; 3 – Росфлок-99M /Cs5

При введении во флокулирующую композицию хитозана проявляется механизм дестабилизации, отличный от механизма флокуляции двумя синтетическими полиэлектролитами сопоставимой молекулярной массой и плотностью заряда [8; 17]. В последнем случае в механизме флокуляции преобладающим является термодинамическая несовместимость двух полимеров, что проявляется в образовании макромолекулярных мостиков между несколькими коллоидными частицами с последующим «скручиванием» адсорбированных макромолекул и локализации положительного заряда внутри флокул, что, в свою очередь, приводит к дополнительным структурным изменениям во флокуле, увеличению ее плотности и повышению эффекта

дестабилизации суспензии в целом. Для композиций же с хитозаном, который имеет сложную пространственную структуру, не позволяющую быстро адсорбироваться на частицах за счет образования мостиков, преимущественно реализуется механизм компенсации поверхностного заряда (нейтрализационный механизм флокуляции). В случае использования композиций на основе хитозана считается, что первоначально его макромолекулы с высоким катионным зарядом за счет электростатических взаимодействий нейтрализуют частично отрицательно заряженную поверхность частиц дисперсной фазы. Затем механизм образования мостиков вносит вклад в общий механизм флокуляции за счет синтетического полиэлектролита.

Синергизм действия компонентов композиции подтверждают и результаты кинетических данных по осаждению каолиновой суспензии. На рис. 5 показаны зависимости скорости осаждения каолиновой суспензии от состава изученных флокулирующих композиций с хитозаном F/Cs5 и Росфлок-99М/Cs5. Экстремальный характер кривых указывает на синергетический эффект полиэлектролитов и явное превышение определенных значений скорости, по сравнению со значениями, которые могут быть рас-

считаны по закону аддитивности. При этом максимальные значения скорости сохраняются при значительном варьировании содержания хитозана в смеси от 40 % до 80 %. Необходимо также отметить, что максимальные значения скорости седиментации ($160 \cdot 10^{-3} - 180 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) в присутствии композиции сопоставимы со значением скорости в присутствии сополимера ($160 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), причем для сополимера наблюдается тенденция к увеличению скорости при повышении концентрации.

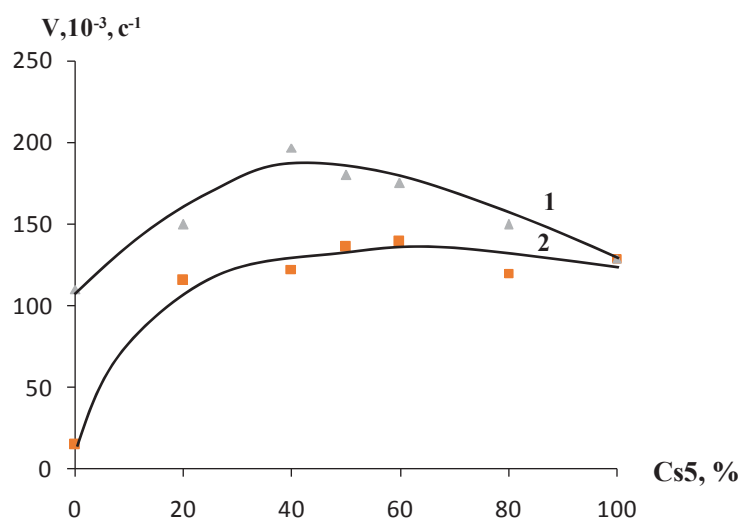


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения каолиновой суспензии от состава композиций катионных полиэлектролитов (состав композиции указан по второму компоненту): 1 – F/Cs5; 2 – Росфлок-99М/Cs5

Таким образом, в работе изучена флокулирующая способность хитозана, композиций хитозана с синтетическими катионными полиэлектролитами, в том числе с промышленно выпускаемым, а также водорастворимого привитого сополимера хитозана в условиях модельной каолиновой суспензии. Показано, что использование хитозана индивидуально в качестве флокулянта не является эффективным, так как несмотря на высокий эффект флокуляции концентрационная зона дестабилизации для него оказывается узкой. Модификация хитозана посредством прививки к нему гидрофильного сомономеров позволяет решить эту проблему. Для сополимера хитозана наряду с высоким эффектом осветления водной каолиновой суспензии наблюдается широкая концентрационная зона дестабилизации. В случае композиций на основе хитозана определен наиболее оптимальный порядок ввода компонентов и показано проявление синергетического действия в процессе осветления и кинетики осаждения дисперсии каолина.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ульрих, Е. В. Использование флокулянтов для очистки сточных вод / Е. В. Ульрих, А. С. Баркова // Трансформация экосистем. – 2023. – Т. 6, № 1 (19). – С. 168–187.
2. Баран, А. А. Флокулянты в биотехнологии / А. А. Баран, А. Я. Тесленко. – Л.: Химия, 1990. – 144 с.
3. Гандурина, Л. В. Очистка сточных вод с применением синтетических флокулянтов / Л. В. Гандурина. – М.: ДарВОДГЕО, 2007. – 198 с.
4. Мягченков, В. А. Соплимеры акриламида с функцией флокулянтов: монография / В. А. Мягченков, В. Е. Проскурина. – Казань: Изд-во Казан. гос. тех. ун-та, 2011. – 296 с.
5. Запольский, А. Г. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды. Свойства. Получение. Применение / А. Г. Запольский, А. А. Баран. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
6. Небера, В. П. Флокуляция минеральных суспензий / В. П. Небера. – М.: Недра, 1984. – 288 с.
7. Барань, Ш. Флокуляция суспензий каолина катионными полиэлектролитами / Ш. Барань, Д. Грегори // Коллоидный журнал. – 1996. – Т. 58, № 1. – С. 13–18.
8. Дрябина, С. С. Дестабилизация водных дисперсий катионными полиэлектролитами: монография / С. С. Дрябина, Ж. Н. Мальшева, А. В. Навроцкий, И. А. Новаков; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – 168 с.
9. Qi, X. Synthesis of the hydrophobic cationic Polyacrylamide (PADD) initiated by ultrasonic and its flocculation and treatment of coal mine wastewater / X. Qi, J. Liu, C. Wang, S. Li, X. Li, Y. Liang, K. Sarfaraz // Processes. – 2020. – Vol. 8. – 62 p.

10. Rinaudo, M. Chitin and chitosan: Properties and applications / M. Rinaudo // Progress in Polymer Science. – 2006. – Vol. 31, Is. 7. – P. 603–632.
11. Kim, Se-Kwon. Chitin, chitosan, oligosaccharides and their derivatives: biological activities and applications / Se-Kwon Kim. – Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis, 2010. – 662 p.
12. Извозчикова, В. А. Изучение флокулирующей способности смесей хитозана с анионоактивными акриловыми сополимерами и разработка методов синтеза ионогенных блок-сополимеров хитозана / В. А. Извозчикова, Н. В. Заборщикова, С. А. Рябов, М. В. Сергеева, Ю. Д. Семчиков, Л. А. Смирнова // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского – 2001. – № 1. – С. 19–23.
13. Salehizadeh, H. Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants / H. Salehizadeh, N. Yan, R. Farnood // Biotechnology Advances. – 2018. – Vol. 36. – P. 92–119.
14. Изучение гидродинамических свойств хитозана в бинарных растворах уксусная кислота-вода / Е. Г. Духанина, С. С. Дрябина, Д. С. Быков, Т. П. Богданова, Ю. В. Шулевиц, И. А. Новаков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (283) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов»). – С. 106–112. – DOI: 10.35211/1990-5297-2023-12-283-106-112.
15. Холмберг, К. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг, Б. Йенссон, Б. Кронберг, Б. Линдман. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
16. Котляревская, О. О. Гидродинамическое поведение полиэлектролитов на основе N,N-диметиламиноэтил-метакрилата в смешанных растворителях / О. О. Котляревская, В. А. Навроцкий, М. В. Орлянский, А. В. Навроцкий, И. А. Новаков // Высокомолекулярные соединения, Серия А. – 2005. – Т. 47, № 3. – С. 508–514.
17. Новаков, И. А. Закономерности флокуляции водных каолиновых дисперсий бинарными композициями катионных полиэлектролитов / И. А. Новаков, С. С. Дрябина, Ж. Н. Малышева, А. В. Навроцкий, А. В. Купцов // Коллоидный журнал. – 2009. – Т. 71, № 1. – С. 94–100.
18. The flocculation of kaolin aqueous dispersion by two cationic polyelectrolytes / С. С. Дрябина, К. М. Фотина, А. В. Навроцкий, И. А. Новаков // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2017. – Vol. 515. – P. 12–21.
19. Шулевиц, Ю. В. Использование полимер-коллоидных композиций на основе хитозана для очистки сточных вод от веществ белок-липидной природы / Ю. В. Шулевиц, С. С. Дрябина, Е. Г. Духанина, Д. С. Быков, Ж. Н. Малышева, И. А. Новаков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (295) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов»). – С. 66–72.
20. Исследование флокулирующей активности композиций на основе природных и синтетических катионных полиэлектролитов / К. М. Фотина, С. С. Дрябина, А. В. Навроцкий, И. А. Новаков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (159) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов»). – С. 95–101.
2. Baran, A. A. Flokulyanty v biotekhnologii / A. A. Baran, A. YA. Teslenko. – L.: Himiya, 1990. – 144 s.
3. Gandurina, L. V. Ochistka stochnyh vod s primeneniem sinteticheskikh flokulyantov / L. V. Gandurina. – M.: DarVODGEO, 2007. – 198 s.
4. Myagchenkov, V. A. Sopolimery akrilamida s funkciej flokulyantov: monografiya / V. A. Myagchenkov, V. E. Proskurina. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2011. – 296 s.
5. Zapol'skij, A. G., Baran A.A. Koagulyanty i flokulyanty v processah ochistki vody. Svoystva. Poluchenie. Primenenie. – L.: Himiya, 1987. – 208 s.
6. Nebera, V. P. Flokulyaciya mineral'nyh suspenzij. – M.: Nedra, 1984. – 288 s.
7. Baran', SH. Flokulyaciya suspenzij kaolina kationnymi polielektrolitami / SH. Baran', D. Gregori // Kolloidnyj zhurnal. – 1996. – Т. 58, № 1. – С. 13–18.
8. Dryabina, S. S. Destabilizaciya vodnyh dispersij kationnymi polielektrolitami: monografiya / S. S. Dryabina, ZH. N. Malysheva, A. V. Navrockij I. A. Novakov; VolgGTU / – Volgograd. – 2020. – 168 s.
9. Qi, X. Synthesis of the hydrophobic cationic Polyacrylamide (PADD) initiated by ultrasonic and its flocculation and treatment of coal mine wastewater / X. Qi, J. Liu, C. Wang, S. Li, X. Li, Y. Liang, K. Sarfaraz // Processes. – 2020. – Vol. 8. – 62 p.
10. Rinaudo, M. Chitin and chitosan: Properties and applications / M. Rinaudo // Progress in Polymer Science. – 2006. – Vol. 31, Is. 7. – P. 603–632.
11. Kim, Se-Kwon. Chitin, chitosan, oligosaccharides and their derivatives: biological activities and applications / Se-Kwon Kim. – Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis, 2010. – 662 p.
12. Izvozchikova, V. A. Izuchenie flokuliruyushchej sposobnosti smesey hitozana s anionoaktivnymi akrilovymi sopolimerami i razrabotka metodov sinteza ionogennyh blok-sopolimerov hitozana / V. A. Izvozchikova, N. V. Zaborshchikova, S. A. Ryabov, M. V. Sergeeva, YU. D. Semchikov, L. A. Smirnova // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. – 2001. – № 1. – С. 19–23.
13. Salehizadeh, H. Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants / H. Salehizadeh, N. Yan, R. Farnood // Biotechnology Advances. – 2018. – Vol. 36. – P. 92–119.
14. Study of chitosan hydrodynamic properties in binary acetic-acid – water solution / E.G. Dukhanina, S.S. Dryabina, D.S. Bykov, T.P. Bogdanova, Yu.V. Shulevich, I.A. Novakov // Izvestiya VolgGTU. Ser. Himiya i tekhnologiya elementorganicheskikh monomerov i polimernykh materialov. – Volgograd, 2023. – № 12 (283). – P. 106–112. DOI: 10.35211/1990-5297-2023-12-283-106-112.
15. Holmberg K., Jyonsson B., Kronberg B., Lindman B. Poverhnochno-aktivnye veshchestva i polimery v vodnyh rastvorah. – M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007.
16. Hydrodynamic behavior of N,N-dimethylaminoethyl methacrylate-based polyelectrolytes in mixed solvents / O. O. Kotlyarevskaya, V. A. Navrockij, M. V. Orlyanskij, A. V. Navrockij, I. A. Novakov // Polymer Science. Series A. – 2005. – Vol. 47, № 3. – P. 313–318.
17. Regularities of flocculation of aqueous kaolinite dispersions with binary compositions of cationic polyelectrolytes / I. A. Novakov, S. S. Dryabina, Z. N. Malysheva, A. V. Navrotskii, A. V. Kuptsov // Colloid Journal, 2009. – Т. 71, № 1. – P. 97–103.
18. The flocculation of kaolin aqueous dispersion by two cationic polyelectrolytes / S. S. Dryabina, K. M. Fotina, A. V. Navrockij, I. A. Novakov // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2017. – Vol. 515. – P. 12–21.
19. Shulevich, Yu. V. Usage of polymer-colloid composi-

REFERENCES

1. Ul'rih, E. V. Ispol'zovanie flokulyantov dlya ochistki stochnyh vod / E. V. Ul'rih, A. S. Barkova // Transformaciya ekosistem. – 2023. – Т. 6, № 1 (19). – С. 168–187.

tions based on chitosan for waste water treatment from impurities of protein-lipid nature / Yu. V. Shulevich, S. S. Dryabina, E. G. Duhanina, D. S. Bykov, Zh. N. Malysheva, I. A. Novakov // *Izvestiya VolgGTU. Ser. Himiya i tekhnologiya elementoorganicheskikh monomerov i polimernyh materialov.* – Volgograd, 2024. – № 12 (295). – P. 66–72.

20. Study of flocculating activity of compositions based on natural and synthetic cationic polyelectrolytes / K. M. Fotina, S. S. Dryabina, A. V. Navrockij, I. A. Novakov // *Izvestiya VolgGTU. Ser. Himiya i tekhnologiya elementoorganicheskikh monomerov i polimernyh materialov.* – Volgograd, 2015. – № 4 (159). – C. 95–101.

S. S. Dryabina, T. P. Bogdanova, Yu. V. Shulevich, I. A. Novakov

STUDY OF DESTABILIZATION OF KAOLIN DISPERSION BY CHITOSAN-BASED FLOCCULANTS

Volgograd State Technical University

Abstract. The flocculating capacity of compositions based on chitosan and water-soluble grafted copolymer of chitosan with trimethyl[methacryloyloxyethyl]ammonium methyl sulfate was studied by turbidimetry. A high effect of clarification of aqueous kaolin suspension in the presence of chitosan copolymer, compared to an unmodified sample, with a simultaneous increase in the concentration zone of destabilization was revealed. The dependence of the sedimentation rate of kaolin dispersion on the composition and order of introduction of components for chitosan-based compositions has been established; the synergistic effect of the studied compositions has been demonstrated, which allows them to be recommended in the processes of destabilization of dispersed systems.

Keywords: chitosan, chitosan copolymer, compositions, flocculation, lightening effect, synergistic effect, sedimentation rate of kaolin suspension