

УДК 544.77.023.523

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ КОАГУЛЯНТОВ НА КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСИЙ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ

А. В. ЗЫГМАНТ¹⁾, Т. А. САВИЦКАЯ¹⁾, Н. Г. ЦЫГАНКОВА¹⁾, Д. Д. ГРИНШПАН¹⁾

¹⁾Учреждение БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»,
ул. Ленинградская, 14, 220006, г. Минск, Республика Беларусь

С помощью метода лазерной дифракции проведено исследование влияния состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики дисперсий гуминовых соединений (средний диаметр частиц, распределение частиц по размерам, плотность коагуляционных агрегатов, скорость седиментации). Показано, что форма и структура коагуляционных агрегатов могут быть охарактеризованы путем сопоставления экспериментально определенных величин их фрактальной размерности с данными компьютерного моделирования. Установлено, что при использовании сульфата алюминия размер коагуляционных агрегатов увеличивается, а их плотность уменьшается при переходе от дисперсий чистого гидроксида алюминия к дисперсиям его агрегатов с гуминовыми соединениями. В случае применения в качестве коагулянта пентагидроксохлорида алюминия наблюдается обратная зависимость.

Ключевые слова: дисперсии; коагулянты; сульфат алюминия; хлорид пентагидроксодиалюминия; скорость седиментации; гуминовые соединения.

INFLUENCE OF ALUMINIUM COAGULANTS COMPOSITION ON COLLOIDAL CHARACTERISTICS OF HUMIC SUBSTANCES DISPERSIONS

A. V. ZYHMANT^a, T. A. SAVITSKAYA^a, N. G. TSYHANKOVA^a, D. D. HRYNSHPAN^a

^aResearch Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University,
Leningradskaya street, 14, 220006, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: alesiazyhmant@gmail.com

The effect of aluminium coagulants composition on colloidal characteristics of humic substances dispersions (diameter, particle size distribution, density and sedimentation rate of aggregates) was investigated by using of laser diffraction method. Aggregates shape and structure were characterized by the experimentally determined fractal dimension

Образец цитирования:

Зыгмант А. В., Савицкая Т. А., Цыганкова Н. Г., Гриншпан Д. Д. Влияние состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики дисперсий гуминовых веществ // Журн. Белорус. гос. ун-та. Химия. 2017. № 1. С. 65–73.

For citation:

Zyhmant A. V., Savitskaya T. A., Tsyhankova N. G., Hrynsphan D. D. Influence of aluminium coagulants composition on colloidal characteristics of humic substances dispersions. *J. Belarus. State Univ. Chem.* 2017. No. 1. P. 65–73 (in Russ.).

Авторы:

Алеся Владимировна Зыгмант – младший научный сотрудник.

Татьяна Александровна Савицкая – кандидат химических наук, доцент; профессор кафедры физической химии, ведущий научный сотрудник.

Надежда Георгиевна Цыганкова – кандидат химических наук; ведущий научный сотрудник.

Дмитрий Давидович Гриншпан – доктор химических наук, профессор; заведующий лабораторией растворов целлюлозы и продуктов их переработки.

Authors:

Alesia Zyhmant, junior researcher.

alesiazyhmant@gmail.com

Tatsiana Savitskaya, PhD (chemistry), docent; professor at the department of physical chemistry, leading researcher.

savitskayaTA@bsu.by

Nadzeia Tsyhankova, PhD (chemistry); leading researcher.

ng-tyg@mail.ru

Dzmitry Hrynsphan, doctor of science (chemistry), full professor; head of the laboratory of cellulose solutions and products of their treatment.

grinshpan@bsu.by

values in the comparison with computer simulation data. The mixed aggregates size in the humic substances dispersions was founded to increase in the case of aluminium sulphate as a coagulant according to the aluminium hydroxide dispersion when alone. Otherwise, the density of mixed aggregates is lower than for the aggregates in aluminium hydroxide dispersion. In the case of pentahydroxodialuminium chloride, the reverse relationships were observed.

Key words: dispersions; coagulants; aluminium sulphate; pentahydroxodialuminium chloride; sedimentation rate; kaolin; humic substances.

Введение

Для природных поверхностных вод характерно высокое содержание гуминовых веществ, которые представляют собой высокомолекулярные полифункциональные соединения. Они могут находиться в воде как в растворенном виде, так и в виде дисперсных частиц [1; 2]. Высокое содержание в воде гуминовых соединений (ГС) приводит к ухудшению органолептических свойств воды – вкуса, запаха, мутности и цветности, активному росту микроорганизмов ввиду наличия необходимых для их питания органических субстратов, увеличению расхода дезинфицирующих реагентов, что, в свою очередь, может обусловить повышение содержания опасных побочных продуктов дезинфекции воды, например трихлорметана [3]. Кроме того, одной из функций ГС в биосфере является транспортная, поэтому они могут связывать токсичные вещества антропогенного происхождения (пестициды, тяжелые металлы, радионуклиды) и способствовать их перемещению [1; 4; 5], поэтому эффективность удаления ГС в процессе коагуляции в значительной степени определяет качество очищенной воды [6].

Наиболее широко применяемые неорганические коагулянты – соединения алюминия [7]. Однако, несмотря на большой объем информации, единого подхода, позволяющего объяснить различную эффективность их действия при удалении различных загрязнителей, в настоящее время не существует [8–12]. В связи с этим необходимо продолжение исследований, направленных на установление взаимосвязи между химическим составом коагулянтов и свойствами дисперсий, образующихся в результате коагуляции [13; 14].

Цель настоящей работы – изучение влияния состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики модельных дисперсий гуминовых веществ.

Материалы и методики исследования

Для создания исходной дисперсии ГС 20 см³ оксидата торфа (ЗАО «Юнатэкс», Беларусь) помещали в мерную колбу объемом 1 дм³ и доводили до метки дистиллированной водой. Чтобы приготовить модельную дисперсию ГС, 10 или 15 см³ исходной дисперсии разбавляли до 1 дм³ раствором КНСО₃ (9 ммоль/дм³) и NaCl (9 ммоль/дм³). Показатель pH полученных дисперсий был равен 8,2 ± 0,2, мутность – 8 ± 1 и 12 ± 1 мг/дм³, цветность – 230 ± 20 и 310 ± 40 град, поглощение в УФ-области (UV_{254}) составляло 0,24 ± 0,02 и 0,33 ± 0,02 соответственно. Измерение pH проводили с помощью pH-метра ThermoOrion 310 (США). Мутность определяли с помощью фотоэлектроколориметра КФК-3-01 (Россия) путем сравнения оптической плотности дисперсии со стандартной суспензией формазина согласно ГОСТ 3351–74. Цветность также устанавливали на фотоэлектроколориметре КФК-3-01 по хромово-кобальтовой шкале в соответствии с ГОСТ 3351–74. Поглощение в УФ-области определяли с помощью спектрометра Metertech SP-8001 (Тайвань) при длине волны $\lambda = 254$ нм.

Характеристики модельных дисперсий представлены в табл. 1. Средний диаметр частиц $\langle d \rangle$, удельная внешняя поверхность $S_{\text{внешн. уд}}$ и объемная концентрация C_U , а также распределение частиц по размерам установлены с помощью лазерного анализатора дисперсности MasterSizer 3000 (Malvern Ltd., Великобритания).

Таблица 1

Характеристики модельных дисперсий ГС

Table 1

Characteristics of HS model dispersions

Мутность, мг/дм ³	$\langle d \rangle$, мкм	$S_{\text{внешн. уд}}$, м ² /кг	$C_U \cdot 10^4$, об. %	ρ , кг/м ³	$u \cdot 10^3$, м/с
8	60 ± 10	360 ± 40	3,3 ± 0,5	1150 ± 20	0,3 ± 0,1
12	70 ± 10	350 ± 30	5,5 ± 0,6	1130 ± 10	0,4 ± 0,1

Расчет средней плотности частиц $\rho_{\text{ч}}$, образовавшихся в результате гидролиза коагулянта, проводили по формуле

$$\rho_{\text{ч}} = \rho_{\text{в}} + \frac{m_{\text{ТВ}}}{0,01 \rho_{\text{ТВ}} C_U V_{\text{сист}}} (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{в}}), \quad (1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, в условиях проведения эксперимента ($t = 20$ °С) $\rho_{\text{в}} = 998,23$ кг/м³; $m_{\text{ТВ}}$ – масса гидроксида, образовавшегося при полном гидролизе коагулянта, которую рассчитывали исходя из навески коагулянта; $\rho_{\text{ТВ}}$ – плотность гидроксида алюминия, составляющая 2424 кг/м³ [15]; $V_{\text{сист}}$ – объем исследуемой системы, равный 1 дм³.

Для расчета плотности агрегатов, образующихся в присутствии коагулянта и частиц модельной дисперсной системы, использовали формулу

$$\rho_{\text{ч}} = \rho_{\text{в}} + \frac{1}{0,01 C_U V_{\text{сист}}} \left(m_{\text{ТВ1}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ТВ1}}} \right) + m_{\text{ТВ2}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ТВ2}}} \right) \right), \quad (2)$$

где $m_{\text{ТВ1}}$ – масса гидроксида алюминия, образовавшегося при полном гидролизе коагулянта; $m_{\text{ТВ2}}$ – масса ГС, рассчитанная на основании концентрации исходных дисперсий; $\rho_{\text{ТВ1}}$ – плотность гидроксида алюминия (2424 кг/м³ [15]); $\rho_{\text{ТВ2}}$ – плотность ГС (1500 кг/м³ [16]).

Выражения (1) и (2) получены на основании формул, приведенных в [17, с. 186].

Скорость седиментации u рассчитывали по формуле [18]

$$u = \frac{2g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})(\langle d \rangle / 2)^2}{9\eta}, \quad (3)$$

где $g = 9,80665$ м/с² – ускорение свободного падения; $\langle d \rangle$ – средний диаметр частиц, определенный методом лазерной дифракции; $\eta = 1,0050 \cdot 10^{-3}$ кг/(м · с) – вязкость воды.

Для коагуляции модельных дисперсий использовали два коагулянта: сульфат алюминия (СА) (производитель – компания *Sigma-Aldrich*, Германия) и пентагидроксохлорид алюминия марки «Бриллиант-50» (Б-50) (производитель – ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов», Россия) (табл. 2), которые добавляли к модельным дисперсиям непосредственно в виде порошков, а не растворов.

Таблица 2

Характеристики исследуемых коагулянтов

Table 2

Characteristics of tested coagulants

Коагулянт	Содержание основного вещества (в расчете на Al ₂ O ₃), %	Химическая формула	Основность, %
СА	17 ± 2	Al ₂ (SO ₄) ₃ · nH ₂ O, n = 14–18	–
Б-50	48 ± 4	Al ₂ (OH) ₅ Cl	83

Для исследования коллоидно-химических свойств агрегатов продуктов гидролиза коагулянтов и частиц модельных дисперсий навеску коагулянта, содержащего 71 мг основного вещества в пересчете на Al₂O₃, добавляли к 1 дм³ модельной суспензии, приготовленной, как описано выше, и затем перемешивали со скоростью 150 об/мин в течение 1,5 мин. Распределение частиц по размерам, внешнюю удельную поверхность и объемную концентрацию образовавшихся агрегатов определяли также с помощью лазерного анализатора дисперсности MasterSizer 3000 в течение 30 мин [19]. После этого дисперсию отстаивали в течение 30 мин, отбирали образец надосадочной жидкости и определяли мутность, цветность и интенсивность поглощения в УФ-области на длине волны $\lambda = 254$ нм, косвенно характеризующую содержание растворенного органического углерода в воде.

Значения фрактальной размерности агрегатов рассчитывали исходя из данных, полученных с помощью MasterSizer 3000, по углу наклона графика зависимости логарифма интенсивности рассеяния от логарифма момента рассеяния q в соответствии с [20] и рекомендациями производителя прибора:

$$q = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2},$$

где n – показатель преломления дисперсионной среды; λ – длина волны излучения лазера, нм; θ – угол рассеяния, рад.

Результаты исследования и их обсуждение

Характеристики агрегатов, сформировавшихся при взаимодействии частиц гидроксида алюминия, являющихся продуктами гидролиза СА, с частицами дисперсий ГС через 30 мин после смешения, представлены в табл. 3. Как видно из данных табл. 3, такое взаимодействие приводит к увеличению размеров частиц дисперсии, что можно объяснить адсорбцией на поверхности частиц гидроксида алюминия меньших по размерам частиц ГС (см. табл. 1). При этом плотность агрегатов, рассчитанная исходя из данных объемной концентрации, закономерно уменьшается при переходе от дисперсий чистого гидроксида алюминия к его агрегатам с ГС.

Таблица 3

Характеристики дисперсий ГС в присутствии СА

Table 3

Characteristics of humic substances dispersions in the presence of AS

Состав дисперсной фазы	$\langle d \rangle$, мкм	$S_{\text{внешн. уд}}$, м ² /кг	C_U , об. %	ρ , кг/м ³	$u \cdot 10^3$, м/с
СА	350 ± 30	35 ± 4	$0,17 \pm 0,01$	1036 ± 2	$2,5 \pm 0,5$
СА + ГС (8 мг/дм ³)	620 ± 40	18 ± 2	$0,7 \pm 0,1$	1008 ± 1	$2,1 \pm 0,3$
СА + ГС (12 мг/дм ³)	800 ± 70	16 ± 2	$0,9 \pm 0,1$	1006 ± 1	$2,8 \pm 0,3$

Несмотря на увеличение размеров смешанных агрегатов для обеих модельных дисперсий (см. табл. 3), скорость их седиментации в случае дисперсии ГС с мутностью 8 мг/дм³ уменьшается по сравнению с дисперсией, полученной из чистого СА, и увеличивается при дисперсии ГС с мутностью 12 мг/дм³.

Кривые распределения по размерам агрегатов, сформировавшихся в различные моменты времени в результате гидролиза СА в водной среде и в присутствии ГС, представлены на рис. 1, в соответствии с которым скорость роста размеров агрегатов из чистого гидроксида алюминия ниже, чем скорость роста смешанных агрегатов гидроксида алюминия с ГС. При этом конечный размер смешанных агрегатов больше.

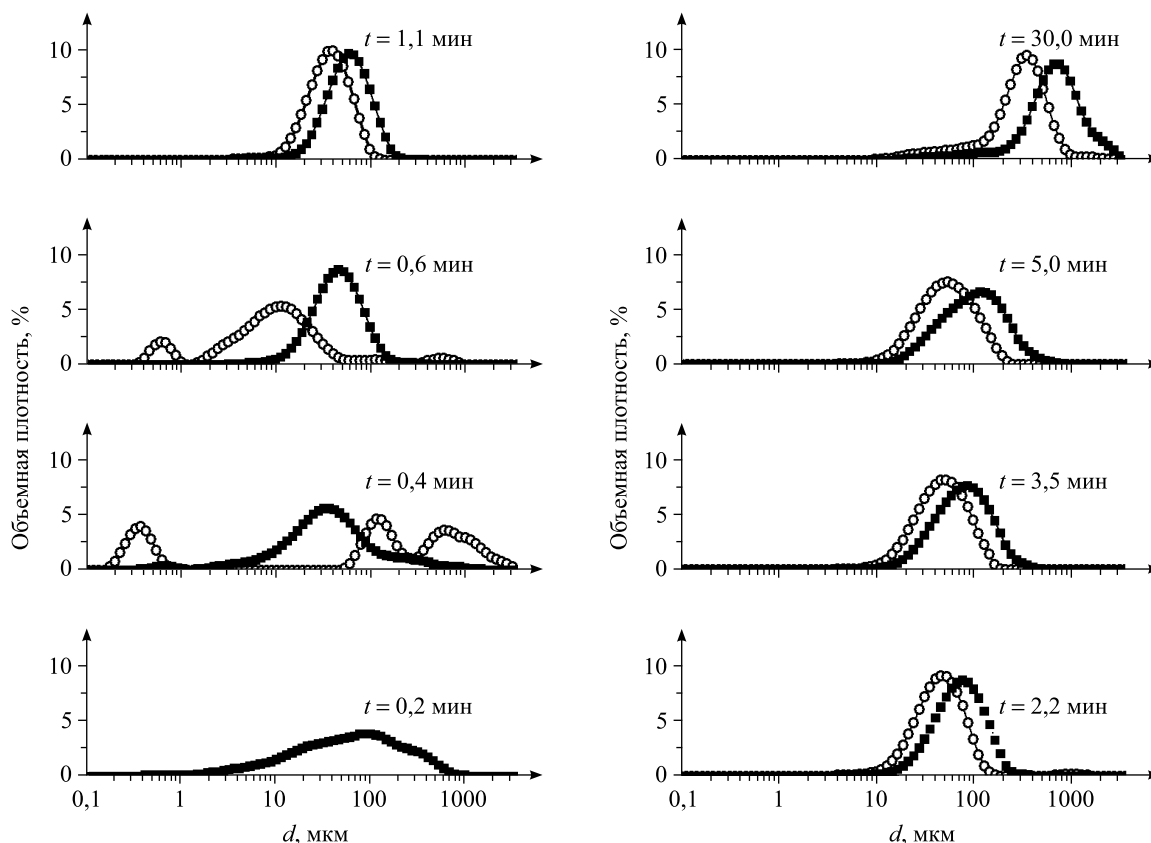


Рис. 1. Распределение по размерам агрегатов, полученных из СА (1), СА, ГС (12 мг/дм³) (2), в различные моменты времени: —○— 1; —■— 2

Fig. 1. Size distributions of aggregates formed from AS (1), AS and HS 12 mg/dm³ (2) at different time points: —○— 1; —■— 2

В случае использования Б-50 для коагуляции модельных дисперсий наблюдается иная картина (табл. 4). Смешанные агрегаты, содержащие гидроксид алюминия, образовавшийся в результате гидролиза Б-50, и ГС, значительно меньше (1200–1300 мкм) агрегатов, содержащих только гидроксид алюминия (1500 мкм). При этом переход от агрегатов гидроксида алюминия, полученных из Б-50, к смешанным агрегатам гидроксида и ГС не сопровождается значительным изменением плотности. Еще одним отличием Б-50 от СА является тот факт, что в случае увеличения концентрации ГС происходит уменьшение размеров агрегатов при практически неизменной плотности, а также падение скорости седиментации.

Таблица 4

Характеристики дисперсий ГС в присутствии Б-50

Table 4

Characteristics of humic substances dispersions in the presence of B-50

Вид агрегата	$\langle d \rangle$, мкм	$S_{\text{внешн. уд}}$, м ² /кг	C_U , об. %	ρ , кг/м ³	$u \cdot 10^3$, м/с
Б-50	1530 ± 70	7 ± 1	2,1 ± 0,1	1001 ± 1	3,9 ± 0,4
Б-50 + ГС (8 мг/дм ³)	1290 ± 70	8 ± 1	1,9 ± 0,2	1002 ± 1	3,3 ± 0,3
Б-50 + ГС (12 мг/дм ³)	1180 ± 60	9 ± 1	1,9 ± 0,2	1002 ± 1	2,8 ± 0,3

Кривые распределения по размерам агрегатов, сформировавшихся из Б-50 в водной среде и в дисперсии ГС, приведены на рис. 2. Агрегаты гидроксида алюминия, полученные из Б-50, характеризуются более высокой скоростью роста размеров в сравнении со смешанными агрегатами. Данный факт свидетельствует о большей склонности к агрегации частиц гидроксида алюминия, полученных из Б-50, по сравнению с частицами, полученными из СА.

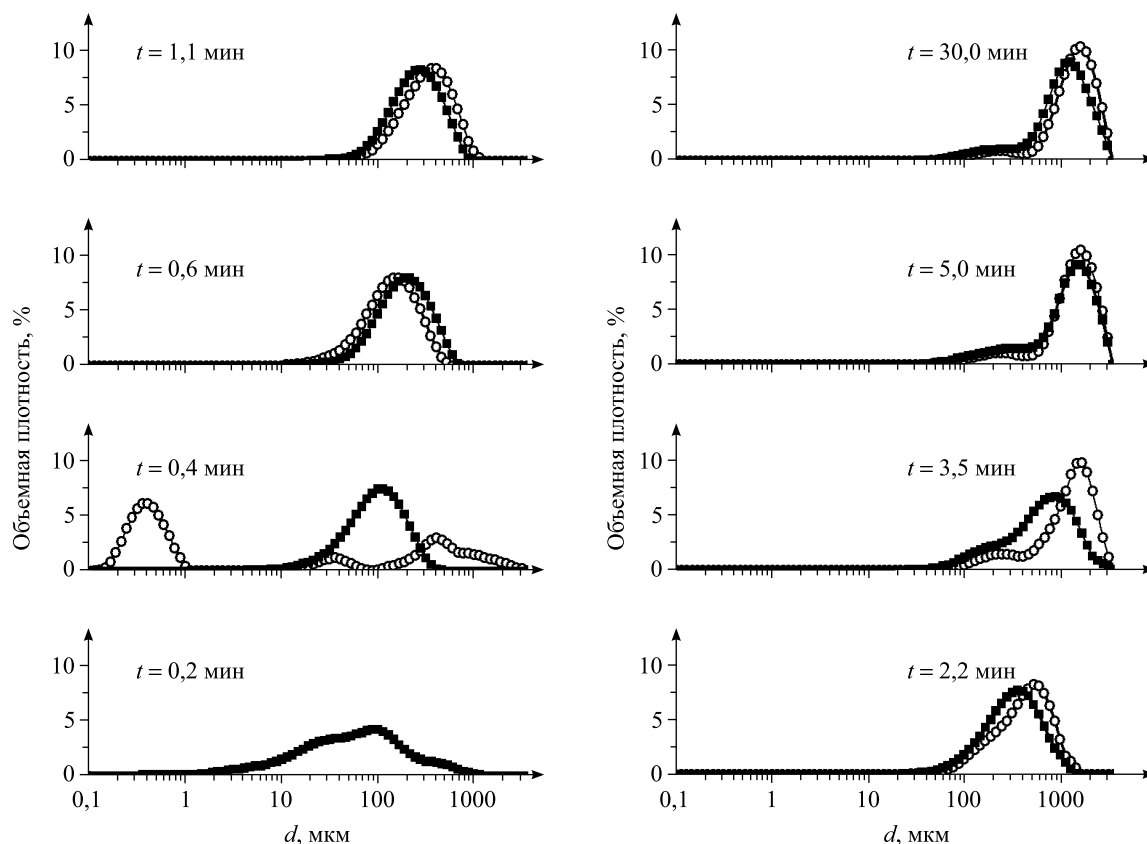


Рис. 2. Распределения по размерам агрегатов, полученных из Б-50 (1), Б-50, ГС (12 мг/дм³) (2), в различные моменты времени: —○— 1; —■— 2

Fig. 2. Size distributions of aggregates formed from B-50 (1), B-50 and HS 12 mg/dm³ (2) at different time points: —○— 1; —■— 2

Для более детальной характеристики структуры агрегатов нами с помощью лазерного анализатора дисперсности MasterSizer 3000 была осуществлена оценка их фрактальной размерности D_f (табл. 5) и одновременно проведено моделирование структуры агрегатов в приближении диффузионно-лимитированной агрегации (Diffusion Limited Aggregation, DLA) [21] с применением программного обеспечения DLA version 1.13.02 и POV-Ray version 3.7. Рассчитанные модели агрегатов с различной величиной фрактальной размерности приведены на рис. 3.

Таблица 5

Величина фрактальной размерности
для различных систем

Table 5

Fractal dimension value for different systems

№ п/п	D_f	Система
1	$1,93 \pm 0,02$	ГС 12 мг/дм ³
2	$1,95 \pm 0,03$	ГС 8 мг/дм ³
3	$2,23 \pm 0,02$	СА
4	$2,31 \pm 0,02$	СА + ГС 12 мг/дм ³
5	$2,32 \pm 0,01$	СА + ГС 8 мг/дм ³
6	$2,47 \pm 0,02$	Б-50 + ГС 12 мг/дм ³
7	$2,49 \pm 0,02$	Б-50 + ГС 8 мг/дм ³
8	$2,59 \pm 0,02$	Б-50

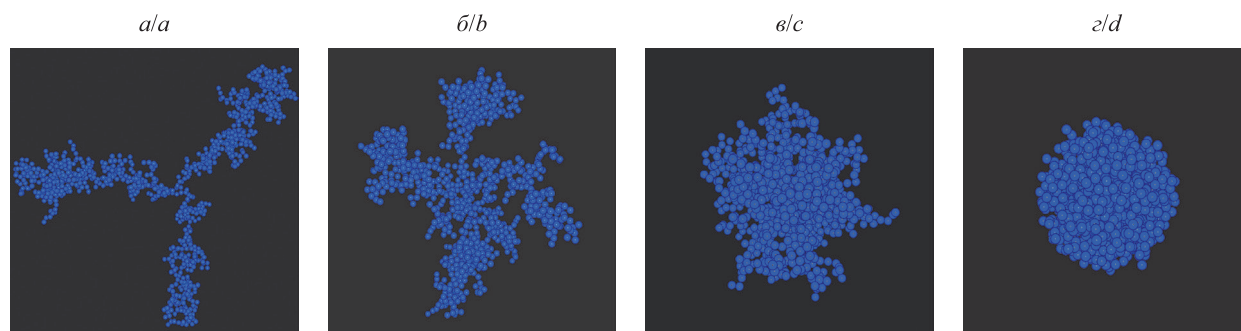


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования агрегатов с различной величиной фрактальной размерности D_f : а – 1,7; б – 2,0; в – 2,3; г – 2,6

Fig. 3. Computer simulations results of aggregates with different fractal dimension value D_f : а – 1.7; б – 2.0; в – 2.3; г – 2.6

Для фрактальных объектов соотношение между массой M и размером R выражается соотношением [20]

$$M = R^{D_f},$$

где $D_f \in (1; 3)$ – фрактальная размерность.

Агрегаты с большой плотностью упаковки должны характеризоваться высокими значениями фрактальной размерности, близкими к 3, а низкие значения D_f (2 и меньше) свидетельствуют об образовании разветвленных структур (см. рис. 3).

Действительно, как видно из рис. 3, с увеличением значения фрактальной размерности плотность упаковки частиц в агрегатах возрастает. Так, частицы ГС с $D_f = 1,9-2,0$ имеют древовидную форму, а частицы дисперсии гидроксида алюминия, образующейся в результате гидролиза коагулянтов, представляют собой более (для Б-50 $D_f \approx 2,6$) или менее (для СА $D_f \approx 2,3$) плотные агрегаты с формой, близкой к сферической.

При коагуляции дисперсии ГС ($D_f = 1,9-2,0$) сульфатом алюминия фрактальная размерность конечных агрегатов несколько увеличивается ($D_f = 2,31$), а в случае Б-50, наоборот, уменьшается с 2,59 для агрегатов из Б-50 до 2,47–2,49 для смешанных агрегатов Б-50 + ГС. Из приведенных данных следует, что если в процессе коагуляции участвуют агрегаты с невысокой плотностью упаковки частиц (например, СА и ГС), в полостях структуры которых могут размещаться другие агрегаты, увеличивая тем самым число контактов между ними, то плотность упаковки частиц в смешанном агрегате выше, чем у исходных агрегатов. Если же в процессе коагуляции участвуют агрегаты с более высокой плотностью упаковки первичных частиц (например, агрегаты из Б-50), то плотность упаковки частиц в смешанном агрегате снижается, на что указывает уменьшение фрактальной размерности.

Таким образом, в случае Б-50 скорость роста агрегатов частиц коагулянта и их размеры выше, чем в случае СА, что в итоге должно приводить к более эффективной коагуляции.

Эффективность коагуляции дисперсий ГС оценивали по мутности, цветности и поглощению в УФ-области. Полученные результаты представлены в табл. 6, согласно данным которой применение СА приводит к большему снижению рН исходной дисперсии в сравнении с использованием Б-50, что является следствием высокого значения основности последнего. При этом коагуляция дисперсий ГС с помощью Б-50 протекает эффективнее, чем СА, на что указывают более низкие значения мутности дисперсий после отстаивания.

Таблица 6

Результаты коагуляции дисперсий ГС различными коагулянтами

Table 6

Results of HS dispersions coagulation

Параметр	Модельная дисперсия ГС	Модельная дисперсия ГС в присутствии СА	Модельная дисперсия ГС в присутствии Б-50
рН	$8,2 \pm 0,2$	$6,5 \pm 0,2$	$7,7 \pm 0,2$
$\langle d \rangle$, мкм	70 ± 10	800 ± 70	1180 ± 60
$u \cdot 10^3$, м/с	$0,4 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,3$
Мутность, мг/дм ³	12 ± 1	$2,8 \pm 0,2$	$<0,1$
Цветность, град	310 ± 40	29 ± 2	5 ± 2
UV_{254}	$0,33 \pm 0,02$	$0,044 \pm 0,009$	$0,014 \pm 0,003$

Из сравнения результатов, полученных при коагуляции дисперсий ГС, с результатами исследования процесса коагуляции дисперсий каолина [22] следует, что, несмотря на различную природу дисперсных частиц, для процесса их коагуляции характерны одинаковые закономерности: для каолина, как и для ГС, в случае СА наблюдалось увеличение размеров частиц при переходе от частиц гидроксида алюминия к его агрегатам с каолином, а в случае Б-50, наоборот, – уменьшение.

Заключение

С помощью метода лазерной дифракции изучено влияние состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики дисперсий гуминовых веществ, моделирующих цветность загрязненных вод, рассчитаны плотности и скорости седиментации коагуляционных агрегатов.

Установлено, что размер коагуляционных агрегатов при использовании СА увеличивается при переходе от дисперсий гидроксида алюминия к дисперсиям его агрегатов с ГС, а при применении Б-50, наоборот, – уменьшается. При этом плотность коагуляционных агрегатов в случае СА уменьшается при переходе от дисперсий гидроксида алюминия к дисперсиям смешанных агрегатов с ГС, а в случае Б-50 – не изменяется. Противоположные зависимости свойств коагуляционных агрегатов от состава исходных коагулянтов позволяют высказать предположение о различных механизмах дестабилизации модельных дисперсий с помощью СА и Б-50. Сопоставление экспериментально определенных величин фрактальной размерности и данных компьютерного моделирования позволило охарактеризовать форму и структуру коагуляционных агрегатов.

Библиографические ссылки

1. Rodríguez J., Schlenger P., García-Valverde M. Monitoring changes in the structure and properties of humic substances following ozonation using UV-Vis, FTIR and ^1H NMR techniques // *Sci. Total Environment*. 2016. Vol. 541. P. 623–637.
2. Взаимодействие гуминовых кислот с ионами металлов и структура металлгуминовых комплексов / И. И. Лиштван [и др.] // *Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География*. 2012. № 2. С. 12–16.
3. Exall K. N., Vanloon G. W. Using Coagulants to Remove Organic Matter // *J. AWWA*. 2000. Vol. 92, № 11. P. 93–102.
4. Орлов Д. С. Свойства и функции гуминовых веществ. М., 1993.
5. Аввакумова Н. П. Гуминовые вещества – фактор защиты биосистем от экотоксикатов // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. 2009. Т. 11, № 1 (2). С. 197–201.
6. Івкін П. А. Совершенствование технологии очистки высокоцветных и маломутных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 7. С. 38–47.
7. Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: significance of Al_{13} species and pH control / Ch. Hu [et al.] // *Environ. Sci. Technol.* 2006. Vol. 40. P. 325–331.
8. Van Benschoten J. E., Edzwald J. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts – 2. Coagulation of fulvic acid using alum and polyaluminum chloride // *Water Res.* 1990. Vol. 24. P. 1527–1536.
9. Coagulation of humic acid: The performance of preformed and non-preformed Al species / B. Shi [et al.] // *Colloids Surf. A*. 2007. Vol. 296. P. 141–148.
10. Zeta potentials and sizes of aluminum salt precipitates – Effect of anions and organics and implications for coagulation mechanisms / J. Duan [et al.] // *J. Water Proc. Eng.* 2014. Vol. 4. P. 224–232.
11. Tang H., Xiao F., Wang D. Speciation, stability, and coagulation mechanisms of hydroxyl aluminum clusters formed by PACl and alum: A critical review // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. Vol. 226, part A. P. 78–85.
12. Influential factors of formation kinetics of flocs produced by water treatment coagulants / Ch. Wu [et al.] // *J. Environ. Sci.* 2013. Vol. 25, № 5. P. 1015–1022.
13. Coagulation performance and membrane fouling of different aluminum species during coagulation/ultrafiltration combined process / R. Feng [et al.] // *Chem. Eng. J.* 2015. Vol. 262. P. 1161–1167.
14. Yua W., Gregory J., Camposa L. C. Breakage and re-growth of flocs: Effect of additional doses of coagulant species // *Water Res.* 2011. Vol. 45. P. 6718–6724.
15. Справочник химика : в 6 т. / редкол.: Б. П. Никольский [и др.]. М. ; Л., 1963. Т. 2.
16. Dinar E., Mentel T. F., Rudich Y. The density of humic acids and humic like substances (HULIS) from fresh and aged wood burning and pollution aerosol particles // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. Vol. 6. P. 5213–5224.
17. Бабенков Е. Д. Очистка воды коагулянтами. М., 1977.
18. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М., 1988.
19. Pabst W., Gregorová E. Characterization of particles and particle systems. Prague, 2007.
20. The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species / W. Yan [et al.] // *Sep. Purif. Technol.* 2009. Vol. 66. P. 457–462.
21. Heinson W. R., Sorensen C. M., Chakrabarti A. A three parameter description of the structure of diffusion limited cluster fractal aggregates // *J. Colloid Interface Sci.* 2012. Vol. 375. P. 65–69.
22. Влияние состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики дисперсий каолина / А. В. Зыгмант [и др.] // *Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук*. 2017. № 1. С. 49–56.

References

1. Rodríguez J., Schlenger P., García-Valverde M. Monitoring changes in the structure and properties of humic substances following ozonation using UV-Vis, FTIR and ^1H NMR techniques. *Sci. Total Environment*. 2016. Vol. 541. P. 623–637.
2. Lishtvan I. I., Kaputskiy F. N., Yanuta Yu. G., et al. Humic acids and metallic ion interaction and metal-humic complexes structure. *Vestnik BSU. Ser. 2, Khim. Biol. Geogr.* 2012. No. 2. P. 12–16 (in Russ.).
3. Exall K. N., Vanloon G. W. Using Coagulants to Remove Organic Matter. *J. AWWA*. 2000. Vol. 92, No. 11. P. 93–102.
4. Орлов Д. С. Своиства і функції гуміновыkh вешчеств. Mosc., 1993 (in Russ.).
5. Avvakumova N. P. Humic substances as a factor of biosystems protection from ecotoxicants. *Izv. Samar. nauchn. tsentra Ross. akad. nauk*. 2009. Vol. 11, No. 1 (2). P. 197–201 (in Russ.).
6. Івкін П. А. Development of highly colored and low turbid water treatment technology. *Vodosnabzhenie i san. techn.* 2010. No. 7. P. 38–47 (in Russ.).
7. Hu Ch., Liu H., Qu J., et al. Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: significance of Al_{13} species and pH control. *Environ. Sci. Technol.* 2006. Vol. 40. P. 325–331.
8. Van Benschoten J. E., Edzwald J. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts – 2. Coagulation of fulvic acid using alum and polyaluminum chloride. *Water Res.* 1990. Vol. 24. P. 1527–1536.
9. Shi B., Wei Q., Wang D., et al. Coagulation of humic acid: The performance of preformed and non-preformed Al species. *Colloids Surf. A*. 2007. Vol. 296. P. 141–148.
10. Duan J., Wang J., Guo T., et al. Zeta potentials and sizes of aluminum salt precipitates – Effect of anions and organics and implications for coagulation mechanisms. *J. Water Proc. Eng.* 2014. Vol. 4. P. 224–232.
11. Tang H., Xiao F., Wang D. Speciation, stability, and coagulation mechanisms of hydroxyl aluminum clusters formed by PACl and alum: A critical review. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. Vol. 226, part A. P. 78–85.
12. Wu Ch., Wang L., Hu B., et al. Influential factors of formation kinetics of flocs produced by water treatment coagulants. *J. Environ. Sci.* 2013. Vol. 25, No. 5. P. 1015–1022.
13. Feng R., Yue Q., Gao B., et al. Coagulation performance and membrane fouling of different aluminum species during coagulation/ultrafiltration combined process. *Chem. Eng. J.* 2015. Vol. 262. P. 1161–1167.

14. Yua W., Gregory J., Camposa L. C. Breakage and re-growth of flocs: Effect of additional doses of coagulant species. *Water Res.* 2011. Vol. 45. P. 6718–6724.
15. Spravochnik khimika : in 6 vol. Mosc. ; Leningr., 1963. Vol. 2 (in Russ.).
16. Dinar E., Mentel T. F., Rudich Y. The density of humic acids and humic like substances (HULIS) from fresh and aged wood burning and pollution aerosol particles. *Atmos. Chem. Phys.* 2006. Vol. 6. P. 5213–5224.
17. Babenkov E. D. Ochistka vody koagulyantami. Mosc., 1977 (in Russ.).
18. Frolov Yu. G. Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy. Mosc., 1988 (in Russ.).
19. Pabst W., Gregorová E. Characterization of particles and particle systems. Prague, 2007.
20. Yan W., Yu G. B., Ming X. X., et al. The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species. *Sep. Purif. Technol.* 2009. Vol. 66. P. 457–462.
21. Heinson W. R., Sorensen C. M., Chakrabarti A. A three parameter description of the structure of diffusion limited cluster fractal aggregates. *J. Colloid Interface Sci.* 2012. Vol. 375. P. 65–69.
22. Zyhmant A. V., Savitskaya T. A., Tsyhankova N. G., et al. Influence of aluminium coagulants composition on colloidal characteristics of kaolin dispersions. *Vesci Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. himichnyh navuc.* 2017. No. 1. P. 49–56 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 26.12.2016.
Received by editorial board 26.12.2016.