

А. В. Зыгмант, Т. А. Савицкая, Н. Г. Цыганкова, Д. Д. Гриншпан

*Учреждение Белорусского государственного университета «НИИ физико-химических проблем»,
Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ КОАГУЛЯНТОВ НА КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСИЙ КАОЛИНА

С помощью метода лазерной дифракции проведено исследование влияния состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики дисперсий каолина: средний диаметр частиц, распределение частиц по размерам, плотность коагуляционных агрегатов, скорость седиментации. Показано, что форма и структура коагуляционных агрегатов может быть охарактеризована путем сопоставления экспериментально определенных величин их фрактальной размерности и данных 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 каолином. В случае применения в качестве коагулянта хлорида пентагидроксодиалюминия наблюдается обратная зависимость.

Ключевые слова: дисперсии, коагулянты, сульфат алюминия, хлорид пентагидроксодиалюминия, скорость седиментации, каолин.

A. V. Zyhmant, T. A. Savitskaya, N. G. Tsygankova, D. D. Hrynshpan

Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF ALUMINIUM COAGULANTS COMPOSITION ON COLLOIDAL CHARACTERISTICS OF KAOLIN DISPERSIONS

The effect of aluminium coagulants' composition on colloidal characteristics of kaolin dispersions (diameter, particle size distribution, density and sedimentation rate of aggregates) has been investigated by the laser diffraction method. Shape and structure of aggregates have been characterized by comparing the experimentally determined fractal dimension values and computer simulation data. When aluminium sulphate was used as a coagulant, the size of aggregates has been found to increase, while their density decreased, for dispersions of mixed aluminium hydroxide aggregates with kaolin, as compared to pure aluminium hydroxide dispersions. In the case of pentahydroxydialuminium chloride, the reverse relationships have been observed.

Keywords: dispersions, coagulants, aluminium sulphate, pentahydroxydialuminium chloride, sedimentation rate, kaolin.

Введение. Процесс реагентной коагуляции используется для эффективного осветления вод различного состава в том случае, если в них содержатся окрашенные, мелкодисперсные и коллоидные частицы, которые медленно осаждаются при отстаивании. Основной стадией этого процесса является гетерокоагуляция – взаимодействие частиц, образующихся в результате гидролиза коагулянта, и частиц, обуславливающих повышенную мутность и цветность загрязненных вод.

Соединения алюминия являются наиболее широко применяемыми неорганическими коагулянтами [1]. Однако несмотря на большой объем информации единого подхода, позволяющего объяснить различную эффективность их действия для конкретных типов загрязненных вод, в настоящее время не существует [2–6]. В связи с этим необходимо продолжение исследований, направленных на установление взаимосвязи между химическим составом коагулянтов и свойствами дисперсий, образующихся в результате коагуляции [7, 8].

Цель данной работы – изучение влияния состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики модельных дисперсий каолина.

Реагенты и методики исследования. Приготовление исходных дисперсий каолина (МИКАО®, ЗАО «Геокон», РФ) проводили по методике, описанной в работе [9]. Для приготовления модельных дисперсий каолина с различной мутностью 2,0 или 3,0 см³ исходной дисперсии с концентрацией (5,6 ± 0,5) г/дм³ разбавляли до 1000 см³ раствором КНСО₃ (9 ммоль/дм³) и NaCl (9 ммоль/дм³). Мутность полученных модельных дисперсий составила (8 ± 1) и (12 ± 1) мг/дм³. Ее определяли

с помощью фотоэлектроколориметра КФК-3-01 путем сравнения оптической плотности дисперсии со стандартной суспензией формазина, согласно ГОСТу 3351-74.

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

Таблица 1. Характеристики модельных дисперсий каолина

Мутность, мг/дм ³	$\langle d \rangle$, мкм	$S_{\text{внешн. уд.}}$, м ² /кг	$C_v \cdot 10^4$, об. %	ρ , кг/м ³	$u \cdot 10^3$, м/с
8	$5,0 \pm 0,6$	1800 ± 30	$7,2 \pm 0,5$	1910 ± 60	$0,012 \pm 0,003$
12	$5,4 \pm 0,2$	1720 ± 20	$11,9 \pm 0,8$	1820 ± 50	$0,013 \pm 0,001$

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

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

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, в условиях проведения эксперимента ($t = 293$ К) $\rho_{\text{в}} = 998,23$ кг/м³; $m_{\text{ТВ}}$ – масса гидроксида, образовавшегося при полном гидролизе коагулянта, которую рассчитывали исходя из навески коагулянта; $\rho_{\text{ТВ}}$ – плотность гидроксида алюминия, равная 2424 кг/м³ [10]; $V_{\text{сист}}$ – объем исследуемой системы, равный 1 дм³.

Для расчета плотности агрегатов, образующихся в присутствии коагулянта и частиц модельной дисперсионной системы, использовали следующую формулу:

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

где $m_{\text{ТВ1}}$ – масса гидроксида алюминия, образовавшегося при полном гидролизе коагулянта; $m_{\text{ТВ2}}$ – масса каолина, рассчитанная исходя из концентрации исходной дисперсии; $\rho_{\text{ТВ1}}$ – плотность гидроксида алюминия, равная 2424 кг/м³ [10]; $\rho_{\text{ТВ2}}$ – плотность каолина (2600 кг/м³, согласно информации производителя).

Формулы (1) и (2) получены на основании формул, приведенных в работе [11, с. 186].

Скорость седиментации u рассчитывали по формуле [12]:

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

где $g = 9,80665$ м/с² – ускорение свободного падения; $\langle d \rangle$ – средний диаметр частиц, определенный методом лазерной дифракции; $\eta = 1004,0 \cdot 10^{-6}$ Па·с – вязкость воды при 293 К.

Для коагуляции модельных дисперсий использовали два коагулянта: сульфат алюминия (СА) (производитель Sigma-Aldrich, Германия) и пентагидроксохлорид алюминия «Бриллиант 50» (Б50) (производитель ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов», РФ) (табл. 2), которые добавляли к модельной дисперсии непосредственно в виде порошков, а не растворов.

Таблица 2. Характеристики исследуемых коагулянтов

Коагулянт	Содержание основного вещества (в расчете на Al ₂ O ₃), %	Химическая формула	Основность, %
СА / AS	17 ± 2	Al ₂ (SO ₄) ₃ · nH ₂ O, n = (14 ÷ 18)	–
Б50 / B50	48 ± 4	Al ₂ (OH) ₅ Cl	83

Для исследования коллоидно-химических свойств агрегатов продуктов гидролиза коагулянтов и частиц модельной дисперсии навеску коагулянта, содержащего 71 мг основного вещества

в пересчете на Al_2O_3 , добавляли к 1 дм^3 модельной дисперсии, 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 [13]. После этого дисперсию отстаивали в течение 30 мин, отбирали образец надосадочной жидкости и определяли мутность.

Значения фрактальной размерности агрегатов рассчитывали исходя из данных, полученных с помощью лазерного анализатора дисперсности MasterSizer 3000, по углу наклона зависимости логарифма интенсивности рассеяния от логарифма момента рассеяния q в соответствии с [14] и рекомендациями производителя прибора – компании Malvern Ltd.:

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

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

Результаты и их обсуждение. В табл. 3 представлены характеристики агрегатов, сформированных при взаимодействии частиц продуктов гидролиза СА с частицами дисперсий каолина через 30 мин после смешения. Из данных табл. 3 следует, что такое взаимодействие приводит к увеличению размеров частиц по сравнению с частицами гидроксида алюминия, что можно объяснить адсорбцией на их поверхности меньших по размерам частиц каолина (см. табл. 1). При этом плотность агрегатов, рассчитанная исходя из данных по объемной концентрации, закономерно уменьшается при переходе от дисперсий чистого гидроксида алюминия к его агрегатам с каолином.

Таблица 3. Характеристики дисперсий каолина в присутствии СА

Состав дисперсии	$\langle d \rangle$, мкм	$S_{\text{внешн. уд.}}$, м ² /кг	C_p , об. %/	ρ , кг/м ³	$u \cdot 10^3$, м/с
СА / АS	350 ± 30	35 ± 4	$0,17 \pm 0,01$	1036 ± 2	$2,5 \pm 0,5$
СА + каолин (8 мг/дм ³)	460 ± 30	26 ± 3	$0,4 \pm 0,1$	1016 ± 4	$2,0 \pm 0,5$
СА + каолин (12 мг/дм ³)	640 ± 50	25 ± 2	$0,7 \pm 0,1$	1009 ± 2	$2,3 \pm 0,3$

Как следует из данных табл. 3, скорость седиментации смешанных агрегатов в большинстве случаев уменьшается по сравнению со скоростью седиментации частиц чистого гидроксида алюминия. Увеличение концентрации дисперсных частиц каолина с 8 до 12 мг/дм³ приводит к увеличению размеров смешанных агрегатов и к росту скорости их седиментации.

На рис. 1 представлены кривые распределения по размерам агрегатов, сформированных в различные моменты времени из СА в водной среде и в дисперсии каолина. Согласно рис. 1, скорость роста размеров агрегатов из чистого гидроксида ниже, чем скорость роста смешанных агрегатов гидроксида с каолином. При этом конечный размер смешанных агрегатов больше, чем размер агрегатов из чистого гидроксида.

В случае использования Б50 для коагуляции модельных дисперсий наблюдается иная картина. В отличие от СА добавление Б50 к модельной дисперсии приводит не к росту, а к уменьшению размеров агрегатов по сравнению с дисперсией чистого гидроксида алюминия (табл. 4).

Таблица 4. Характеристики дисперсий каолина в присутствии Б50

Вид агрегатов	$\langle d \rangle$, мкм	$S_{\text{внешн. уд.}}$, м ² /кг	C_p , об. %	ρ , кг/м ³	$u \cdot 10^3$, м/с
Б50 / Б50	1530 ± 70	7 ± 1	$2,1 \pm 0,1$	1001 ± 1	$3,9 \pm 0,4$
Б50 + каолин (8 мг/дм ³)	1470 ± 70	7 ± 1	$2,3 \pm 0,3$	1001 ± 1	$3,6 \pm 0,5$
Б50 + каолин (12 мг/дм ³)	1490 ± 70	7 ± 1	$2,1 \pm 0,2$	1002 ± 1	$4,2 \pm 0,4$

Кривые распределения по размерам агрегатов, сформированных из Б50 в водной среде и в дисперсии каолина, приведены на рис. 2. Агрегаты частиц гидроксида алюминия, полученные при

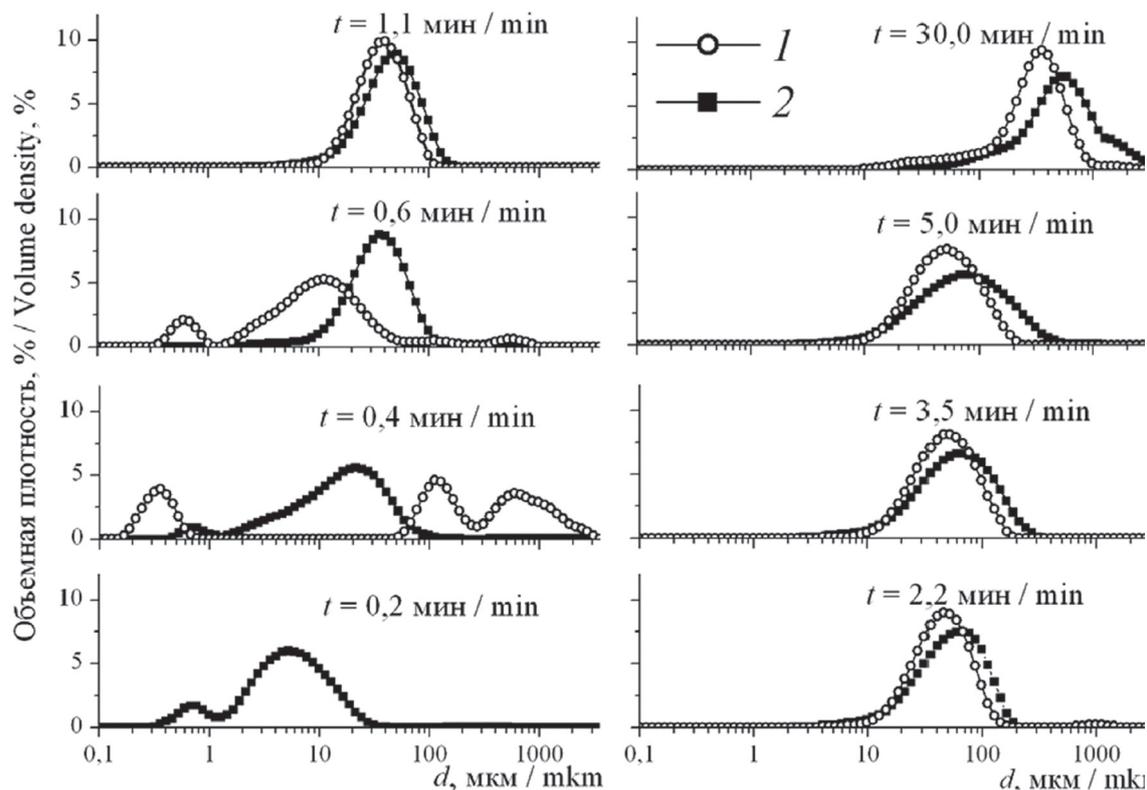


Рис. 1. Распределения по размерам агрегатов, полученных из СА (1), СА и каолина 12 мг/дм³ (2), в различные моменты времени

Fig. 1. Size distributions of aggregates formed from AS (1), AS and kaolin 12 mg/dm³ (2) at different time points

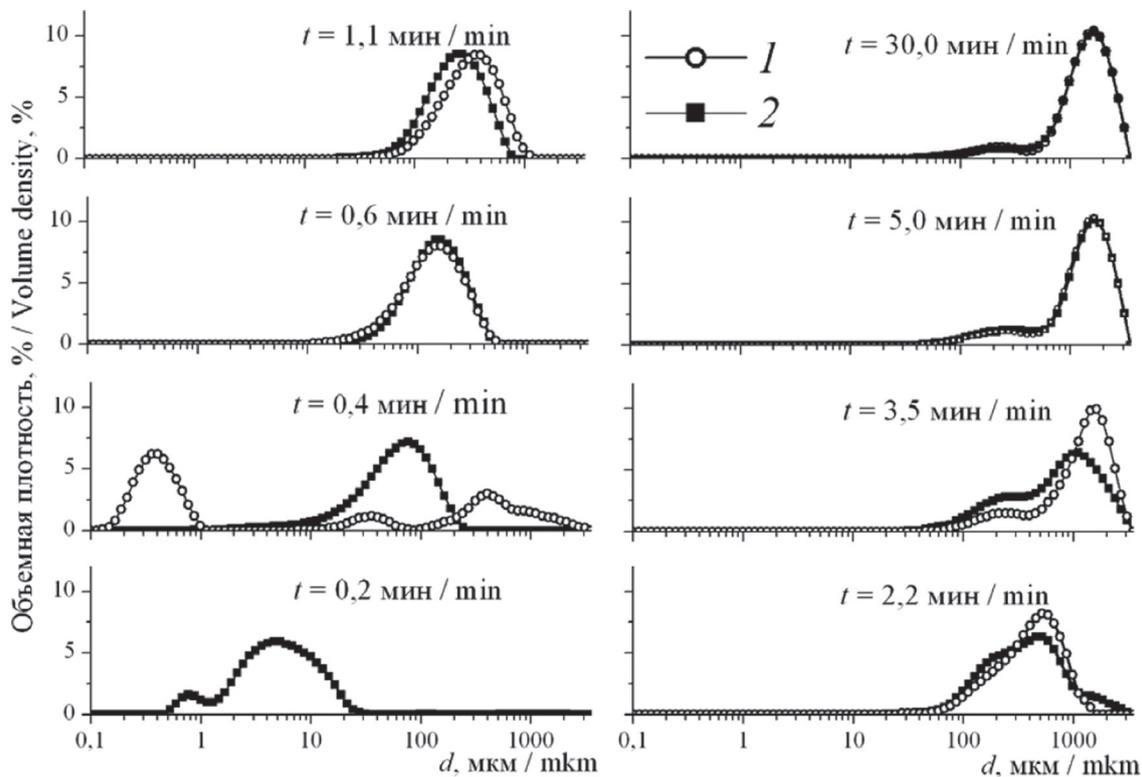


Рис. 2. Распределения по размерам агрегатов, полученных из Б50 (1), Б50 и каолина 12 мг/дм³ (2), в различные моменты времени

Fig. 2. Size distributions of aggregates formed from B50 (1), B50 and kaolin 12 mg/dm³ (2) at different time points

гидролизе Б50, характеризуются более высокой скоростью роста размеров в сравнении со смешанными агрегатами. Данный факт свидетельствует о большей склонности частиц гидроксида алюминия, полученных из Б50, к самоагрегации по сравнению с частицами, полученными из СА.

Эти данные позволяют предположить, что в случае СА коагуляция модельных дисперсий протекает путем сорбции их частиц на частицах гидроксида алюминия, поскольку во всех случаях наблюдается увеличение размеров агрегатов по сравнению с дисперсией гидроксида алюминия [6]. В случае Б50 наиболее вероятен механизм гетерокоагуляции за счет электростатического взаимодействия продуктов гидролиза коагулянта и дисперсных частиц, что приводит к уменьшению размеров агрегатов в сравнении с чистым гидроксидом алюминия [6]. Можно допустить, что это связано со «встраиванием» «малых» агрегатов каолина в «большие» агрегаты гидроксида алюминия, образующиеся при гидролизе Б50.

Эффективность коагуляции дисперсий каолина также оценивали по параметру мутности (после 30 мин отстаивания). Полученные результаты представлены в табл. 5. Согласно данным табл. 5, коагуляция дисперсий каолина с помощью Б50 протекает более эффективно, чем в присутствии СА, на что указывают более низкие значения мутности дисперсий после отстаивания. Это можно связать с более высокой скоростью осаждения агрегатов в случае Б50, чем в случае СА.

Таблица 5. Результаты коагуляции дисперсий каолина

Параметр / Parameter	СА / AS	Б50 / B50
Каолин 12 мг/дм ³		
$\langle d \rangle$, мкм	640 ± 50	1490 ± 70
$u \cdot 10^3$, м/с	2,3 ± 0,3	4,2 ± 0,4
Мутность, мг/дм ³	2,5 ± 0,4	< 0,1

Для более детальной характеристики структуры агрегатов нами с помощью лазерного анализатора дисперсности MasterSizer 3000 была осуществлена оценка их фрактальной размерности D_f (табл. 6) и одновременно проведено моделирование структуры агрегатов в приближении диффузионно-лимитированной агрегации (Diffusion Limited Aggregation, DLA) [15] с применением программного обеспечения DLA ver. 1.13.02 и Pov-ray ver. 3.7. Рассчитанные модели агрегатов с различной величиной фрактальной размерности приведены на рис. 3.

Таблица 6. Величина фрактальной размерности для различных систем

Номер системы	D_f	Система
1	2,12 ± 0,01	СА + Каолин 12 мг/дм ³
2	2,21 ± 0,01	СА + Каолин 8 мг/дм ³
3	2,23 ± 0,02	СА
4	2,32 ± 0,02	Б50 + Каолин 12 мг/дм ³
5	2,37 ± 0,02	Б50 + Каолин 8 мг/дм ³
6	2,43 ± 0,04	Каолин 8 мг/дм ³
7	2,43 ± 0,04	Каолин 12 мг/дм ³
8	2,59 ± 0,02	Б50

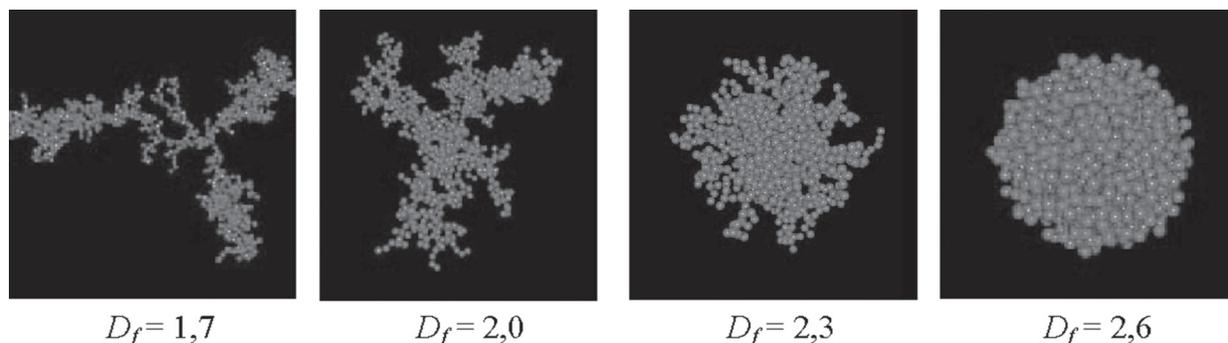


Рис. 3. Результаты моделирования агрегатов с различной величиной фрактальной размерности

Fig. 3. Computer simulations results of aggregates with different fractal dimension value

Для фрактальных аб'ектаў суадношэнне між масай M і размерам R выражаецца суадношэннем [14]:

$$M = R^{D_f}, \quad (5)$$

дзе $D_f \in (1; 3)$ – фрактальная размернасць.

Агрегаты з большай плотнасцю упаковки павінны характарызавацца высокімі значэннямі фрактальнай размернасці, блізкімі к 3, а нізкія значэння D_f (2 і менш) сведчаюць аб утварэнні разветленых структураў (рис. 3).

Дзейнальна, як відаць з рис. 3, з павелічэннем значэння фрактальнай размернасці плотнасць упаковки часціц у агрегатах павялічваецца. Так, змешаныя агрегаты СА + каолін 12 мг/дм^3 з $D_f = 2,12 \pm 0,01$ маюць дрэвавідушную форму, а часціцы дысперсіі гідроксида алюмінія, атрыманыя з Б50 ($D_f \approx 2,6$), прадстаўляюць сабой плотныя агрегаты з формай, блізкай к сферічнай.

Пры коагуляцыі дысперсіі каоліна з $D_f = 2,43$ коагулянтам СА ($D_f = 2,23$) утвараюцца агрегаты нават з меншым значэннем $D_f = 2,1 \div 2,2$, чым у пачатковых дысперсіях. З прыведзеных даных вынікае, што пры ўзаемадзейніі двух агрегатаў з высокай плотнасцю упаковки (напрыклад, агрегатаў СА і каоліна), якія не працякаюць у структуру аднаго аднаго, а ўзаемадзейнуюць на падобне двух жорсткіх сфер, плотнасць упаковки канечнага агрегата памяншаецца. Аналагічныя залежнасці характэрны і для коагуляцыйных структураў, атрыманых з выкарыстаннем Б50.

Выводы. З дапамогай метаду лазернай дыфракцыі вывучана ўплывае складу алюмінійсодержащих коагулянтаў на коллойдно-хімічныя характэрыстыкі дысперсій каоліна, мадэлюючых мутнасць забрудненых вод, высечаныя шчынасці і скорасці седыментацыі коагуляцыйных агрегатаў.

Устаноўлена, што памер коагуляцыйных агрегатаў пры выкарыстанні сульфата алюмінія павялічваецца пры пераходзе ад дысперсій гідроксида алюмінія к дысперсіям яго агрегатаў з каолінам, а ў выпадку прымянення Б50, наадварот, памяншаецца. Пры гэтым шчынасць коагуляцыйных агрегатаў ў выпадку СА памяншаецца пры пераходзе ад дысперсій гідроксида алюмінія к дысперсіям змешаных агрегатаў з каолінам, а ў выпадку Б50 – павялічваецца. Протывоположныя залежнасці ўласцівасцей коагулянтаў ад складу пачатковых коагулянтаў сведчаюць аб розных механізмах дэстабілізацыі мадэльных дысперсій з дапамогай СА і Б50. Сопаставленне эксперыментальна вызначаных велічын фрактальнай размернасці і даных камп'ютэрнага мадэлювання пазваляе ахарактарызаваць форму і структуру коагуляцыйных агрегатаў.

Спісок іспользаваных істочнікаў

1. 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.
2. Van Benschoten, J. E. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts – 2. Coagulation of fulvic acid using alum and polyaluminium chloride / J.E. VanBenschoten, J. Edzwald // *Water Res.* – 1990. – Vol. 24. – P. 1527–1536.
3. Coagulation of humic acid: The performance of preformed and non-preformed Al species / B. Shi [et al.] // *Colloid Surf. A* – 2007. – Vol. 296. – P. 141–148.
4. Exall, K.N. Using Coagulants to Remove Organic Matter / K.N. Exall, G.W. Vanloon // *Journal AWWA.* – 2000. – Vol. 92, № 11. – P. 93–102.
5. Zeta potentials and sizes of aluminum salt precipitates – Effect of anions and organics and implications for coagulation mechanisms / J. Duan [et al.] // *Journal of Water Process Engineering.* – 2014. – Vol. 4. – P. 224–232.
6. Tang, H. Speciation, stability, and coagulation mechanisms of hydroxyl aluminum clusters formed by PACl and alum: A critical review / H. Tang, F. Xiao, D. Wang // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2015. – Vol. 226, Part A. – P. 78–85.
7. Influential factors of formation kinetics of flocs produced by water treatment coagulants / Ch. Wu [et al.] // *Journal of Environmental Sciences.* – 2013. – Vol. 25, № 5. – P. 1015–1022.
8. Coagulation performance and membrane fouling of different aluminum species during coagulation/ultrafiltration combined process / L. Feng [et al.] // *Chemical Engineering Journal.* – 2015. – Vol. 262. – P. 1161–1167.
9. Yua, W. Breakage and re-growth of flocs: Effect of additional doses of coagulant species / W. Yua, J. Gregorya, L. C. Camposa // *Water Research.* – 2011. – Vol. 45. – P. 6718–6724.

10. Свойства неорганических соединений // Справочник химика / редкол.: Б. П. Никольский и др. – 2-е изд., испр. и доп. – М.-Л.: Химия, 1963. – Т. 2. – С. 9–269.
11. Бабенков, Е. Д. Свойства коагулированной взвеси / Е. Д. Бабенков // Очистка воды коагулянтами / Е. Д. Бабенков. – М.: Наука, 1977. – С. 186–187.
12. Фролов, Ю. Г. Седиментация и седиментационный анализ дисперсности / Ю. Г. Фролов // Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1988. – С. 220–239.
13. Pabst, W. Particle packing, coordination numbers and fractals / W. Pabst, E. Gregorová // Characterization of particles and particle systems / W. Pabst, E. Gregorová. – Prague, 2007. – Part 3. – P. 6–9.
14. The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species / Y. Wang [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2009. – Vol. 66. – P. 457–462.
15. Heinson, W. R. A three parameter description of the structure of diffusion limited cluster fractal aggregates / W. R. Heinson, C. M. Sorensen, A. Chakrabarti // Journal of Colloid and Interface Science. – 2012. – Vol. 375. – P. 65–69.

References

1. Hu Ch., Liu H., Qu J., Wang D. and Ru J., "Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: significance of Al13 species and pH control", *Environmental Science and Technology*, 2006, vol. 40, pp. 325–331.
2. Van Benschoten J.E. and Edzwald J., "Chemical aspects of coagulation using aluminum salts – 2. Coagulation of fulvic acid using alum and polyaluminum chloride", *Water Research*, 1990, vol. 24, pp. 1527–1536.
3. Shi B., Wei Q., Wang D., Zhu Zh. and Tang H., "Coagulation of humic acid: The performance of preformed and non-preformed Al species", *Colloids and Surfaces A*, 2007, vol. 296, pp. 141–148.
4. Exall K.N. and Vanloon G.W., "Using Coagulants to Remove Organic Matter", *Journal AWWA*, 2000, vol. 92, no. 11, pp. 93–102.
5. Duan J., Wang J., Guo T. and Gregory J., "Zeta potentials and sizes of aluminum salt precipitates – Effect of anions and organics and implications for coagulation mechanisms", *Journal of Water Process Engineering*, 2014, vol. 4, pp. 224–232.
6. Tang H., Xiao F. and Wang D., "Speciation, stability, and coagulation mechanisms of hydroxyl aluminum clusters formed by PACl and alum: A critical review", *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 226, part A, pp. 78–85.
7. Wu Ch., Wang L., Hu B. and Ye J., "Influential factors of formation kinetics of flocs produced by water treatment coagulants", *Journal of Environmental Sciences*, 2013, vol. 25, no. 5, pp. 1015–1022.
8. Feng R., Yue Q., Gao B., Feng L., Wang W., Dong H., Li R. and Sun S., "Coagulation performance and membrane fouling of different aluminum species during coagulation/ultrafiltration combined process", *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol. 262, pp. 1161–1167.
9. Yua W., Gregory J. and Camposa L.C., "Breakage and re-growth of flocs: Effect of additional doses of coagulant species", *Water Research*, 2011, vol. 45, pp. 6718–6724.
10. *Spravochnik khimika, T. 2* [Chemist reference book, Vol. 2], Khimiya, Moscow, RU, 1963.
11. Babenkov E.D., *Ochistka vody koagulyantami* [Water treatment with coagulants], Nauka, Moscow, RU, 1977.
12. Frolov U.G., *Kurs kolloidnoi khimii* [Colloidal chemistry course], Khimiya, Moscow, RU, 1988.
13. Pabst W. and Gregorová E., *Particle packing, coordination numbers and fractals*, ICT, Prague, CZ, 2007.
14. Yan W., Yu G.B., Ming X.X., Ying X.W. and Ying X.G., "The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species", *Separation and Purification Technology*, 2009, vol. 66, pp. 457–462.
15. Heinson W.R., Sorensen C.M. and Chakrabarti A., "A three parameter description of the structure of diffusion limited cluster fractal aggregates", *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, vol. 375, pp. 65–69.

Информация об авторах

Зыгмант Аляся Владимировна – мл. науч. сотрудник, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alesiazhyhmant@gmail.com.

Савицкая Татьяна Александровна – канд. хим. наук., профессор, вед. науч. сотрудник, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: SavitskayaTA@bsu.by.

Цыганкова Надежда Георгиевна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ng-tsyg@mail.ru.

Information about the authors

Zyhmant Alesia Vladimirovna – Research Assistant. Research Institute for Physical and Chemical Problems, Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alesiazhyhmant@gmail.com.

Savitskaya Tatsiana Aleksandrovna – Ph. D. (Chemistry), Professor, Leading Researcher. Research Institute for Physical and Chemical Problems, Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: SavitskayaTA@bsu.by.

Tsyhankova Nadzeia Georgievna – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Research Institute for Physical and Chemical Problems, Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ng-tsyg@mail.ru.

Гриншпан Дмитрий Давидович – д-р хим. наук, профессор, зав. лаб. растворов целлюлозы и продуктов их переработки, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grinshpan@bsu.by.

Для цитирования

Влияние состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики дисперсий каолина / А. В. Зыгмант [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 1. – С. 49–56.

Hrynshpan Dzmitry Davidovich – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory for cellulose solutions and products of their treatment. Research Institute for Physical and Chemical Problems, Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grinshpan@bsu.by.

For citation

Zyhmant A. V., Savitskaya T. A., Tsygankova N. G., Hrynshpan D. D. Influence of aluminium coagulants composition on colloidal characteristics of kaolin dispersions. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, chemical series, 2017, no.1, pp. 49–56.