

КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСИЙ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА КОАГУЛЯНТА И СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА рН

**Р. А. АНУШКО¹⁾, А. В. ЗЫГМАНТ²⁾, Т. А. САВИЦКАЯ^{1), 2)},
Н. Г. ЦЫГАНКОВА²⁾, Д. Д. ГРИНШПАН²⁾**

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ,
ул. Ленинградская, 14, 220006, г. Минск, Беларусь

С помощью метода лазерной дифракции проведено исследование влияния состава алюминийсодержащих коагулянтов и способа введения гидроксида натрия как регулятора pH на коллоидно-химические характеристики образующихся при их гидролизе дисперсий гидроксида алюминия: средний диаметр частиц, распределение частиц по размерам, плотность коагуляционных агрегатов, скорость их седиментации. Установлено, что высокоосновный полигидроксохлорид алюминия «Бриллиант-50» образует агрегаты большего размера и меньшей плотности, чем сульфат алюминия. Показано, что размер и плотность агрегатов сульфата алюминия можно регулировать путем последовательного, а не одностадийного введения гидроксида натрия. Этот эффект в большей степени выражен в случае использования порошкообразного, а не предварительно растворенного коагулянта. На основании данных квантово-химических расчетов сделано предположение о том, что увеличение молекулярной массы полиядерных гидроксокомплексов алюминия приводит к повышению степени их гидратации и, как следствие, к закономерному уменьшению плотности образованных ими коагуляционных агрегатов.

Ключевые слова: дисперсии; коагулянты; алюминия гидроксид; сульфат алюминия; полигидроксохлорид алюминия; регулятор pH; седиментация.

Образец цитирования:

Анушко РА, Зыгмант АВ, Савицкая ТА, Цыганкова НГ, Гриншпан ДД. Коллоидно-химические характеристики дисперсий гидроксида алюминия в зависимости от состава коагулянта и способа введения регулятора pH. *Журнал Белорусского государственного университета. Химия*. 2019; 1:22–31.

<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2019-1-22-31>

Авторы:

Руслан Андреевич Анушко – студент химического факультета. Научный руководитель – Д. Д. Гриншпан.

Алеся Владимировна Зыгмант – научный сотрудник лаборатории растворов целлюлозы и продуктов их переработки.

Татьяна Александровна Савицкая – кандидат химических наук, доцент; профессор кафедры физической химии¹⁾, ведущий научный сотрудник лаборатории растворов целлюлозы и продуктов их переработки²⁾.

Надежда Георгиевна Цыганкова – кандидат химических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории растворов целлюлозы и продуктов их переработки.

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

For citation:

Anushko RA, Zyhmant AV, Savitskaya TA, Tsyhankova NG, Hrynshtan DD. Colloidal characteristics of aluminum hydroxide dispersions depending on coagulant composition and pH regulator dosing method. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*. 2019;1:22–31. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2019-1-22-31>

Authors:

Ruslan A. Anushko, student at the faculty of chemistry.
ruslananushko2113@gmail.com

Alesia V. Zyhmant, researcher at the laboratory for cellulose solutions and products of their treatment.
alesiazyhmant@gmail.com

Tatsiana A. Savitskaya, PhD (chemistry), docent; professor at the department of physical chemistry^a, leading researcher at the laboratory of cellulose solutions and products of their treatment^b.
savitskayata@bsu.by

Nadzeia G. Tsyhankova, PhD (chemistry); leading researcher at the laboratory of cellulose solutions and products of their treatment.
ng-tsyg@mail.ru

Dmitry D. Hrynshtan, doctor of science (chemistry), full professor; head of the laboratory of cellulose solutions and products of their treatment.
grinshpan@bsu.by

COLLOIDAL CHARACTERISTICS OF ALUMINUM HYDROXIDE DISPERSIONS DEPENDING ON COAGULANT COMPOSITION AND pH REGULATOR DOSING METHOD

R. A. ANUSHKO^a, A. V. ZYHMANT^b, T. A. SAVITSKAYA^{a, b},
N. G. TSYHANKOVA^b, D. D. HRYNSHPAN^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bResearch Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University,
14 Lieninhradskaja Street, Minsk 220006, Belarus

Corresponding author: R. A. Anushko (ruslananushko2113@gmail.com)

The effect of aluminum coagulants composition and pH regulator dosing method on colloidal characteristics of aluminum hydroxide dispersions (diameter, particle size distribution, density and sedimentation rate of aggregates) was investigated by using of laser diffraction method. Highly basic polyaluminum chloride «Brilliant-50» was established to form aggregates of larger size and lower density than aluminum sulfate. Size and density of the aluminum sulfate aggregates were found to be a function of the pH dosing method (multi- or single-stage dosing). This effect became more evident when powdered coagulant was used as compared to its solution. According to computational study results hydration of aluminum polynuclear hydroxocomplexes increased with their molecular mass increasing, and consequently density of coagulation aggregates formed by them was suggested to decrease.

Key words: dispersions; coagulants; aluminum sulfate; polyaluminum chloride; sedimentation rate; pH regulator; aluminum hydroxide.

Введение

Особенностью коагулирования загрязнений воды многовалентными ионами, к которым относится Al^{3+} , входящий в состав многочисленных коагулянтов, является процесс гидролиза [1; 2]. В результате поликонденсации продуктов образуются полиядерные гидроксидные соединения, которые обладают гораздо более сильной коагулирующей способностью, чем собственно ионы Al^{3+} [3; 4].

Протекание первичного гидролиза и структурообразование формирующихся золей гидроксида алюминия существенно зависят от величины pH среды [5; 6]. Для ее регулирования в очищаемую воду вводят гидроксид, карбонат или гидрокарбонат натрия. Данные о влиянии способа введения регулятора pH на коллоидно-химические параметры коагуляционных агрегатов в литературных источниках отсутствуют.

Алюминийсодержащие коагулянты традиционно применяют в виде водных растворов или суспензий. Этот подход имеет ряд недостатков: резко ограничивается дальность перевозок реагентов; для хранения требуется большое количество емкостей и складских помещений; в силу кислотных свойств растворов возникает коррозия оборудования; при длительном хранении растворов реагентов происходит изменение их физических и химических свойств и даже переход в нерастворимое состояние [7; 8]. В связи с этим производители и потребители все чаще пробуют применять для очистки воды коагулянты в порошкообразной или гранулированной форме. Однако в литературе отсутствуют данные о влиянии формы введения коагулянта на такие характеристики образующихся в результате его гидролиза дисперсий, как размер, плотность коагуляционных агрегатов, скорость их седиментации, параметры очищенной воды.

Цель данной работы – изучение различий коллоидно-химических характеристик дисперсий гидроксида алюминия, образующихся в результате гидролиза сульфата и полигидроксохлорида алюминия, в зависимости от их основности, физического состояния (порошкообразный или растворенный) и способа введения гидроксида натрия как регулятора pH.

Реагенты и методики исследования

В качестве объектов исследования использовали два коагулянта, которые широко применяются в процессах очистки природных и сточных вод: порошкообразный и растворенный сульфат алюминия (СА) (производитель – *Sigma-Aldrich*, Германия) и порошкообразный пентагидроксохлорид алюминия «Бриллиант-50» (Б50) (Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов, Россия) (табл. 1). СА наиболее распространен и доступен по цене. Б50 является представителем нового

поколения коагулянтов – полигидроксохлоридов алюминия с высокой величиной относительной основности, которая коррелирует с содержанием полигидроксокомплексов в коагулянте [9; 10].

Таблица 1

Характеристики исследуемых коагулянтов

Table 1

Coagulants characteristics

Коагулянт	Содержание основного вещества (в расчете на Al_2O_3), %	Химическая формула	Основность, %
СА	17 ± 2	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $n = 14, \dots, 18$	–
Б50	48 ± 4	$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$	83

Для исследования коллоидно-химических свойств коагуляционных агрегатов, образующихся в результате гидролиза, коагулянт, содержащий 71 мг основного вещества в пересчете на Al_2O_3 , в порошкообразной или растворенной форме добавляли к 1 дм³ 9 ммоль/дм³ раствора NaCl , затем перемешивали со скоростью 150 об/мин в течение 1,5 мин. Одновременно с перемешиванием в систему вводили одной порцией или тремя с 20-секундным интервалом 0,1 моль/дм³ раствор NaOH в количестве 45 см³ для СА и 7,5 см³ для Б50 до достижения значения рН, равного 8,5–9,5. Распределение частиц по размерам, внешнюю удельную поверхность и объемную концентрацию образовавшихся агрегатов определяли с помощью лазерного анализатора дисперсности Master Sizer 3000 (Malvern Ltd., Великобритания) в течение 30 мин от момента введения коагулянта [11].

Среднюю плотность частиц ρ_q , образовавшихся в результате гидролиза коагулянта, рассчитывали по формуле [12]

$$\rho_q = \rho_b + \frac{m_{tb}}{0,01\rho_{tb} C_v V_{cist}} (\rho_{tb} - \rho_b), \quad (1)$$

где $\rho_b = 998,23 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды в условиях проведения эксперимента ($t = 293 \text{ К}$); m_{tb} – масса гидроксида алюминия, образовавшегося при полном гидролизе коагулянта, которую рассчитывали, исходя из навески коагулянта; C_v – объемная концентрация; $V_{cist} = 1 \text{ дм}^3$ – объем исследуемой системы; $\rho_{tb} = 2424 \text{ кг/м}^3$ – плотность гидроксида алюминия [13].

Скорость седиментации u определяли по формуле [14]

$$u = \frac{2g(\rho_q - \rho_b) \left(\frac{\langle d \rangle}{2} \right)^2}{9\eta}, \quad (2)$$

где $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\langle d \rangle$ – средний диаметр частиц, определенный методом лазерной дифракции; $\eta = 1004,0 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – вязкость воды при 293 К.

Результаты и их обсуждение

Из рис. 1 следует, что при переходе от одностадийного к трехстадийному введению гидроксида натрия наблюдается увеличение конечных размеров коагуляционных агрегатов (при $t = 30 \text{ мин}$). При этом в случае использования растворенного СА различие между одно- и трехстадийным введением проявляется менее четко, чем при использовании порошкообразного коагулянта. Также следует отметить, что при трехстадийном введении гидроксида натрия конечный размер коагуляционных агрегатов, полученных из СА, сопоставим с размером агрегатов, которые образуются из высокоосновного коагулянта Б50 при одностадийном введении.

Распределение по размерам коагуляционных агрегатов, сформировавшихся в результате гидролиза порошкообразного и растворенного СА, представлено на рис. 2, согласно которому в начальные моменты времени (0,2–0,6 мин) скорость увеличения размеров агрегатов (скорость роста) при одностадийном введении NaOH превышает скорость роста агрегатов, полученных при трехстадийном введении. При $t = 1,1 \text{ мин}$ значительных отличий в распределениях агрегатов по размерам не наблюдается. Начиная с $t = 2,2 \text{ мин}$ агрегаты, сформированные при трехстадийном введении NaOH , демонстрируют более высокую скорость роста в сравнении с одностадийным. Вследствие этого трехстадийное введение NaOH приводит к образованию более крупных конечных коагуляционных агрегатов (при $t = 30 \text{ мин}$).

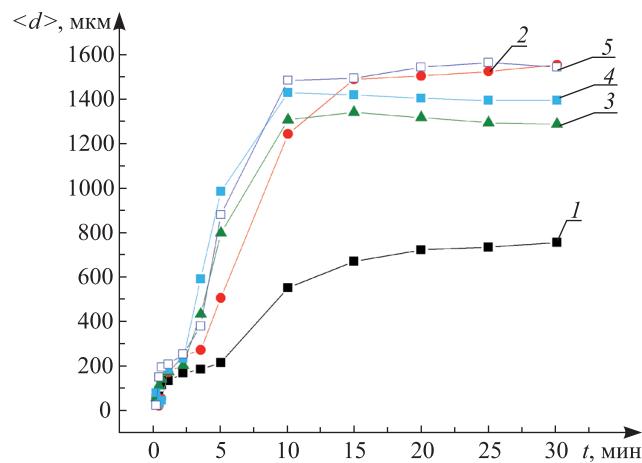


Рис. 1. Зависимость от времени t среднего диаметра $\langle d \rangle$ коагуляционных агрегатов, полученных из порошкообразного (1, 2) и растворенного СА (3, 4) и порошкообразного коагулянта Б50 (5) при одностадийном (1, 3, 5) и трехстадийном (2, 4) введении регулятора pH (NaOH)

Fig. 1. Time dependencies of the average diameter $\langle d \rangle$ of coagulation aggregates obtained from powdered (1, 2) and dissolved aluminum sulfate (3, 4) and powdered coagulant «Brilliant-50» at single-stage (1, 3, 5) and three-stage (2, 4) pH regulator dosing (NaOH)

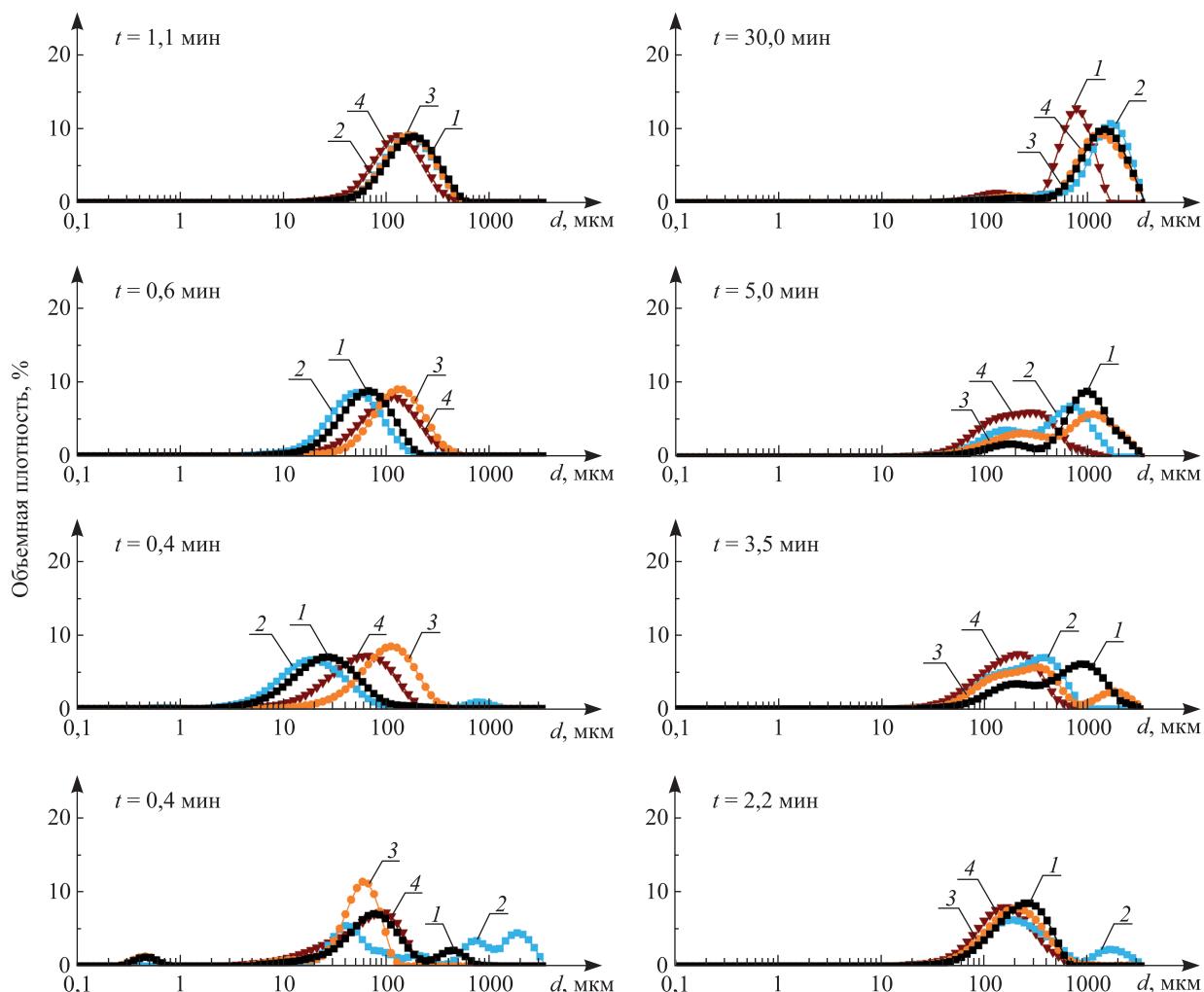


Рис. 2. Кривые распределения по размерам агрегатов, полученных из порошкообразного (1, 2) и растворенного СА (3, 4) при одностадийном (1, 3) и трехстадийном (2, 4) введении NaOH, в различные моменты времени

Fig. 2. Size distribution curves of aggregates formed by powdered (1, 2) and dissolved (3, 4) aluminum sulfate at single-stage (1, 3) and three-stage (2, 4) NaOH dosing at various time points

Из сравнения данных рис. 3 следует, что в присутствии высокоосновного Б50 быстро образуются крупные коагуляционные агрегаты. В начальные моменты времени (0,2–0,6 мин) агрегаты, полученные из СА при трехстадийном введении NaOH, значительно уступают по размерам и скорости роста агрегатам, полученным из СА и Б50 при одностадийном введении. Однако на последующих этапах процесса скорость роста агрегатов при трехстадийном введении увеличивается, что в итоге приводит к формированию агрегатов, для которых распределение по размерам идентично таковому для агрегатов, образующихся из высокоосновного Б50.

Из приведенных экспериментальных фактов следует, что коллоидные частицы, формирующиеся при трехстадийном введении NaOH, обладают повышенной способностью к агрегации. Благодаря этому удается получить конечные агрегаты, близкие по своим коллоидно-химическим свойствам к агрегатам из высокоосновных коагулянтов, т. е. значительно увеличить коагулирующую способность СА.

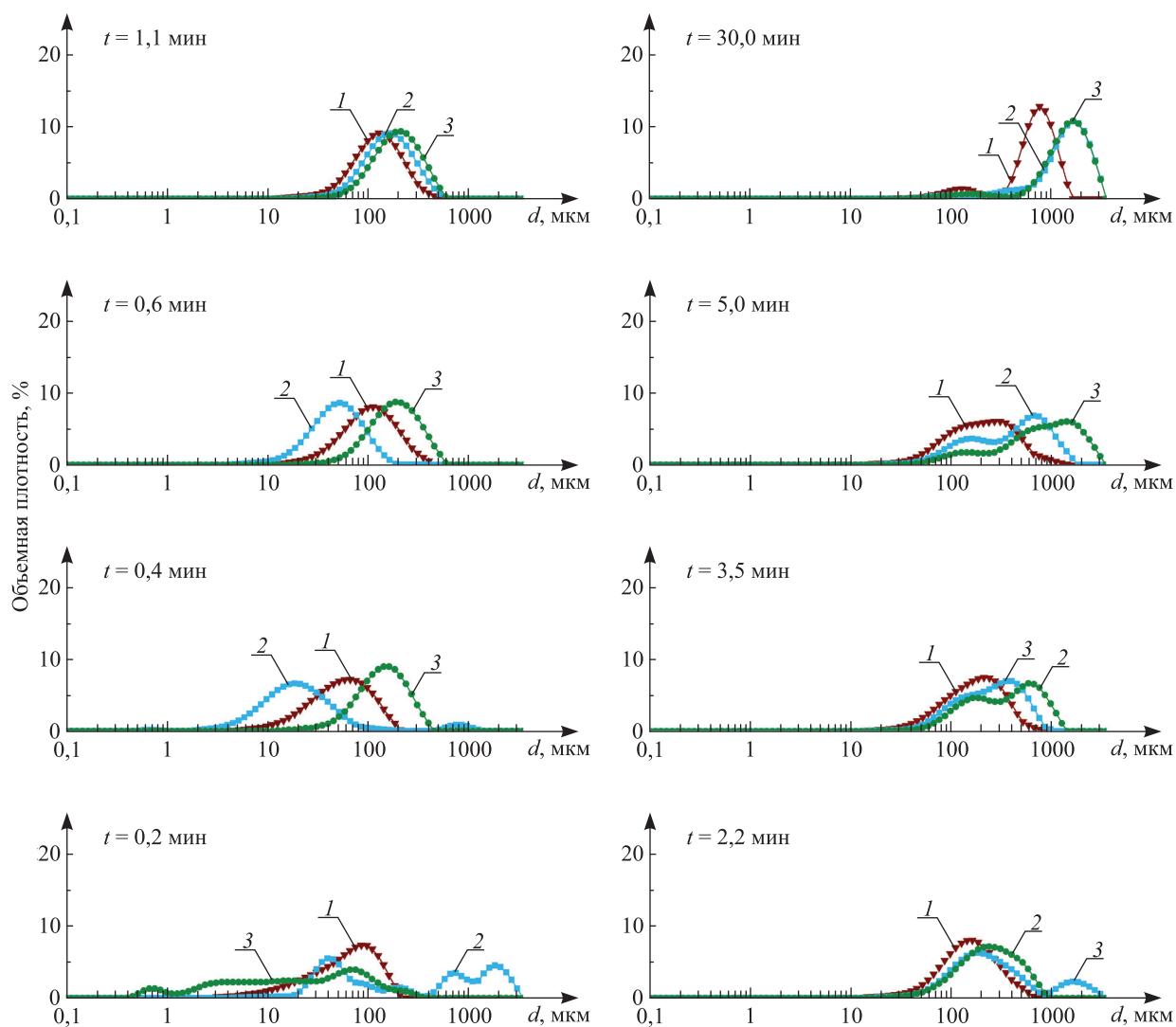


Рис. 3. Кривые распределения по размерам агрегатов, полученных из порошкообразного СА при одностадийном (1) и трехстадийном (2) введении NaOH и из порошкообразного Б50 (3) при одностадийном введении NaOH в различные моменты времени

Fig. 3. Size distribution curves of aggregates formed by powdered aluminum sulfate at single-stage (1) and three-stage (2) NaOH dosing and by «Brilliant-50» (3) at single-stage NaOH dosing at various time points

Как было показано выше, поэтапное введение гидроксида натрия обеспечивает формирование более крупных агрегатов по сравнению с одностадийным введением. Увеличение размеров агрегатов сопровождается уменьшением внешней удельной поверхности (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики коагуляционных агрегатов, полученных из СА и Б50
при одно- и трехстадийном введении гидроксида натрия ($t = 30$ мин)

Table 2

Characteristics of coagulation aggregates formed by aluminum sulfate and «Brilliant-50»
at single- and three-stage sodium hydroxide dosing ($t = 30$ min)

Коагулянт	Способ введения NaOH	Средний диаметр $\langle d \rangle$, мкм	Внешняя удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$	Объемная концентрация C_v , об. %	Плотность ρ_q , $\text{кг}/\text{м}^3$	Скорость седиментации $u \cdot 10^3$, м/с
Порошкообразный СА	Одностадийно	750 ± 70	15 ± 2	$0,44 \pm 0,05$	1013 ± 1	$4,5 \pm 0,6$
	Трехстадийно	1550 ± 80	$7,6 \pm 0,5$	$1,2 \pm 0,1$	1004 ± 1	$6,9 \pm 0,7$
Растворенный СА	Одностадийно	1260 ± 80	9 ± 1	$0,9 \pm 0,1$	1005 ± 1	$6,1 \pm 0,7$
	Трехстадийно	1390 ± 80	$7,7 \pm 0,8$	$1,2 \pm 0,1$	1003 ± 1	$5,4 \pm 0,6$
Порошкообразный Б50	Одностадийно	1540 ± 80	$7,1 \pm 0,8$	$1,0 \pm 0,1$	1004 ± 1	$8,0 \pm 0,9$

Объемная концентрация C_v определяется как отношение суммарного объема агрегатов к общему объему всей системы. Согласно данным табл. 2, она увеличивается с ростом размера частиц. Вероятно, это связано с тем, что при столкновении двух частиц с образованием агрегата между ними сохраняется прослойка дисперсионной среды, в результате чего объем агрегата оказывается больше суммарного объема исходных частиц.

На основании данных о величине объемной концентрации была рассчитана плотность частиц ρ_q . Согласно формуле (1), между этими величинами наблюдается обратно пропорциональная зависимость. При переходе от одностадийного введения гидроксида натрия к многостадийному наблюдается увеличение размеров агрегатов и уменьшение их плотности (см. табл. 2).

В соответствии с формулой (2) скорость седиментации агрегатов прямо пропорциональна квадрату радиуса частиц и их плотности. Последняя уменьшается при увеличении их размеров вследствие наличия гидратной прослойки между частицами в агрегате. Поэтому при переходе от одностадийного введения гидроксида натрия к трехстадийному проявляются две тенденции: увеличение размеров агрегатов, что повышает скорость седиментации, и уменьшение их плотности, вследствие чего скорость седиментации снижается. В итоге переход к трехстадийному введению гидроксида натрия в случае порошкообразного и растворенного СА приводит к разным результатам: увеличению скорости седиментации для порошкообразного СА и ее уменьшению для растворенного. Это может быть обусловлено тем, что для порошкообразного СА вклад роста размеров частиц в изменение скорости седиментации преобладает над уменьшением их плотности, поскольку увеличение размера частиц при изменении способа введения растет в 2,1 раза, в то время как для растворенного СА – только в 1,1 раза.

Наибольшая скорость седиментации, а значит, и более высокая скорость очистки воды достигаются в случае применения СА в порошкообразной форме при трехстадийном введении гидроксида натрия. Этот показатель сопоставим со скоростью седиментации агрегатов, полученных из Б50, что подтверждает сделанное выше предположение о том, что трехстадийное введение указанного регулятора pH позволяет повысить коагулирующую способность СА, а также улучшить показатели очищенной воды при использовании данного коагулянта (уменьшается содержание в очищенной воде остаточного алюминия).

Причиной наблюдаемого увеличения размеров агрегатов при переходе от одностадийного к трехстадийному введению гидроксида натрия является изменение условий, в которых протекает гидролиз коагулянта. Как показано в [5; 10], СА не содержит полиядерных форм алюминия, для него характерны только моно- и димерные формы. При одностадийном введении гидроксида натрия происходит гидролиз СА с образованием золя гидроксида алюминия с малым размером первичных частиц, из которых затем образуются агрегаты. При трехстадийном введении гидроксида натрия гидролиз СА протекает ступенчато. В случае высокоосновных коагулянтов полигидроксохлоридов алюминия, например Б50, этот процесс протекает еще на стадии синтеза коагулянта. В соответствии с данными [10] размер коагуляционных агрегатов пропорционален содержанию полиядерных форм алюминия в коагулянте. В результате трехстадийного введения гидроксида натрия в СА увеличивается содержание димеров гидроксокомплексов алюминия, что приводит к образованию более крупных агрегатов, для которых характерна наиболее высокая скорость седиментации.

С помощью квантово-химических расчетов в пакете *GAMESS Interface* с использованием метода HF 6-31G++ была охарактеризована структура полиядерных гидроксокомплексов алюминия, главным образом геометрия их молекул и специфические внутриструктурные связи [15]. Показано, что моно- и полиядерные комплексы с невысокой молекулярной массой $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Al}_2\text{O}(\text{OH})_4$, $\text{Al}_3\text{O}_2(\text{OH})_5$ (рис. 4) имеют плоскую форму. С увеличением молекулярной массы $\text{Al}_3\text{O}_2(\text{OH})_5$ и $\text{Al}_7\text{O}_6(\text{OH})_9$ наблюдается переход от уплощенной формы к спиралеподобной. При этом во внутреннем пространстве структуры появляются полости, диаметр которых может достигать 5 Å.

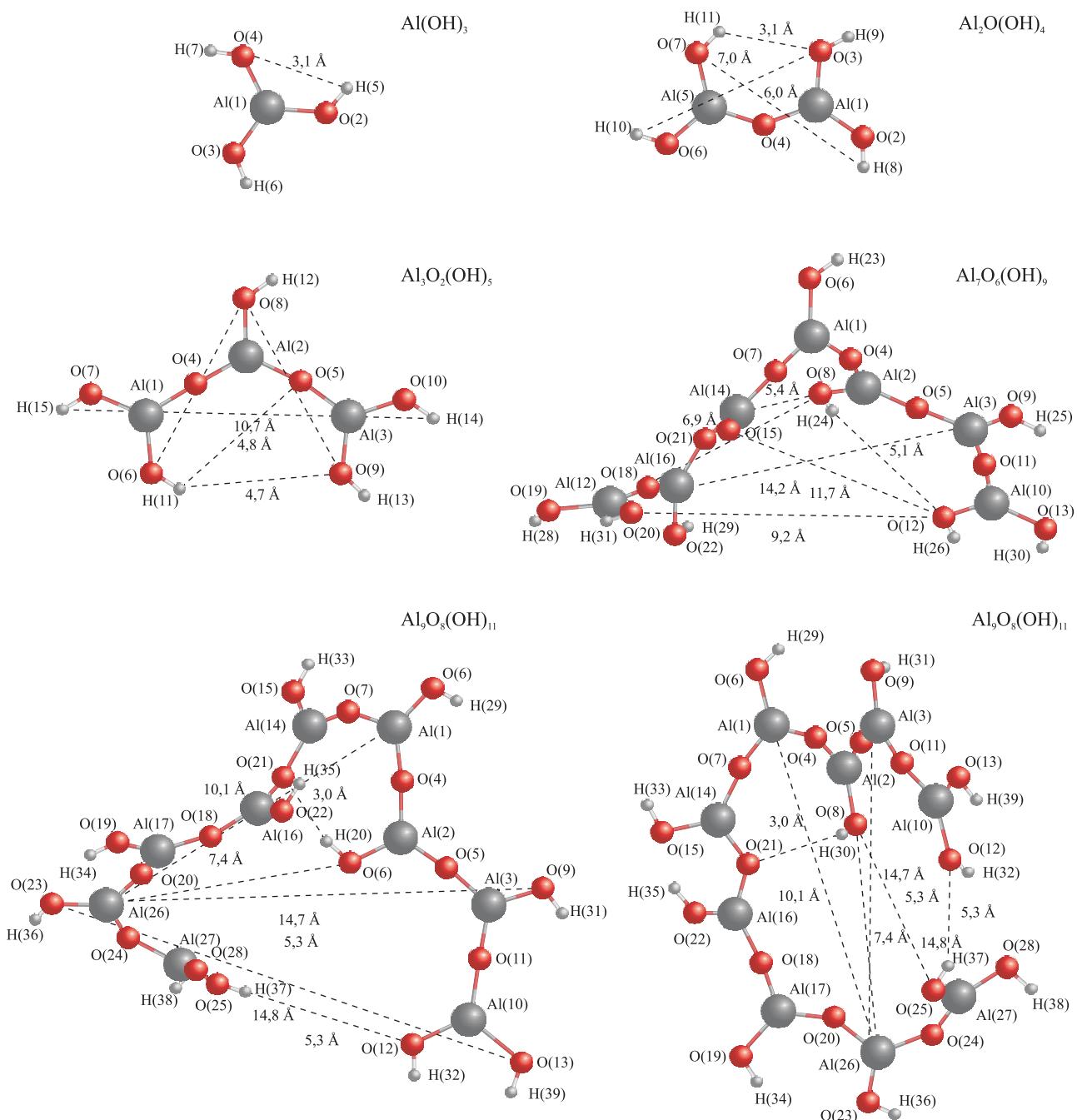


Рис. 4. Структуры моно- и полиядерных гидроксокомплексов алюминия
 Fig. 4. Structures of mono- and polynuclear aluminum hydroxocomplexes

Также был проведен квантово-химический расчет гидратированных моно- и полиядерных гидроксокомплексов алюминия (рис. 5). Такие комплексы могут входить в состав продуктов гидролиза различных коагулянтов, в том числе высокоосновных полигидроксоклоридов алюминия, таких как Б50.

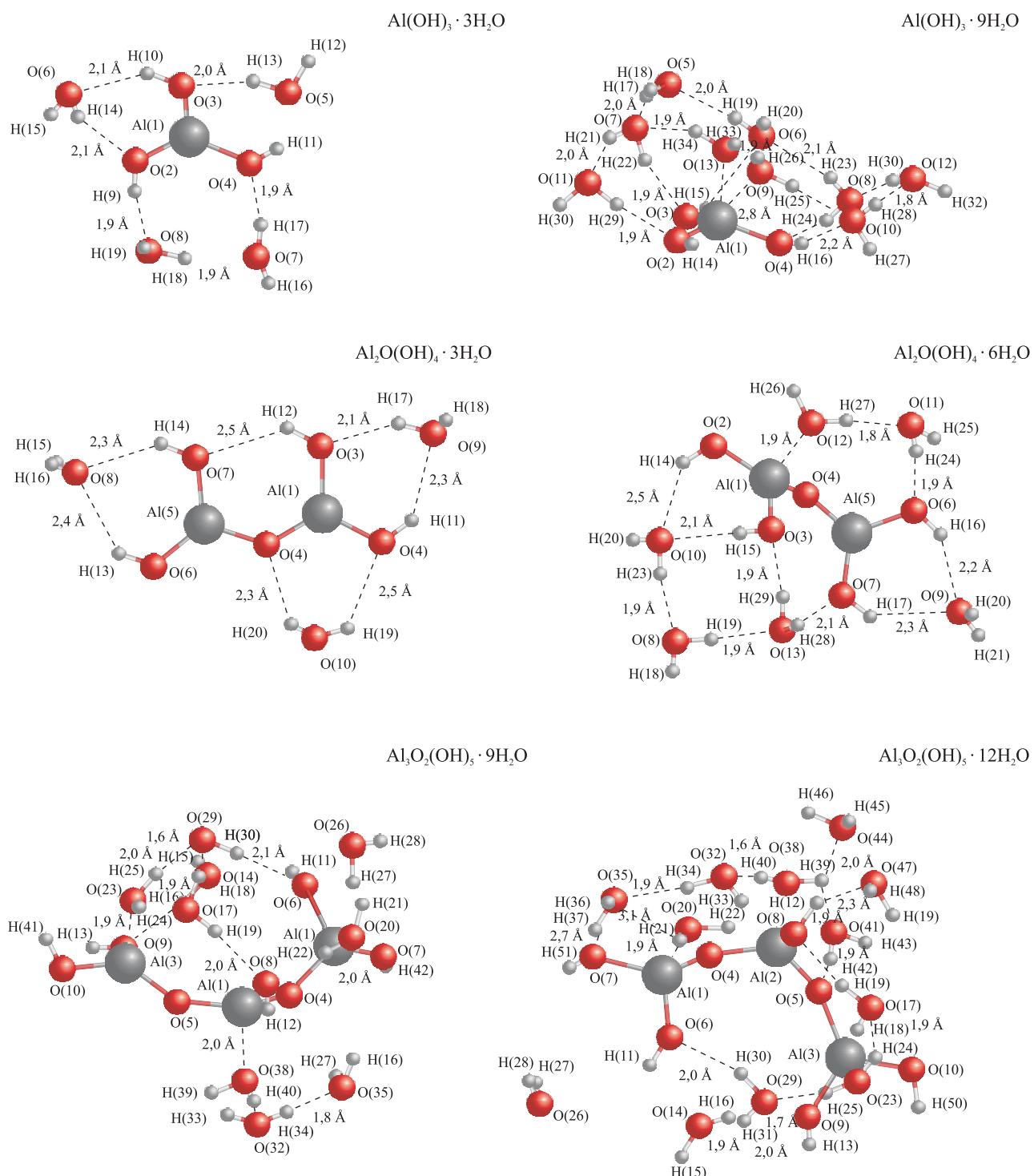


Рис. 5. Структуры гидратированных моно- и полиядерных гидроксокомплексов алюминия
 Fig. 5. Structures of hydrated mono- and polynuclear aluminum hydroxocomplexes

Согласно полученным данным, взаимодействие с гидратирующими молекулами воды может реализовываться по некоторым различным механизмам, при этом координация молекул воды непосредственно на атоме алюминия приводит к наибольшему снижению энергии структуры. Так, из табл. 3 и результатов квантово-химических расчетов следует, что в случае гидратированной структуры $Al(OH)_3$ наличие взаимодействия молекулы воды непосредственно с атомом алюминия понижает величину общей энергии в расчете на одну молекулу. Сходные результаты получены и для полиядерных комплексов. В этом случае координация молекул воды на атоме алюминия происходит при меньшем количестве

данных молекул, приходящихся на один атом алюминия. Различия процессов гидратации моно- и полиядерных гидроксокомплексов обусловлены тем, что в $\text{Al}(\text{OH})_3$ на один атом алюминия приходится три гидроксильные группы, в результате чего данная структура обладает большими возможностями взаимодействия с молекулами воды. Полиядерные формы содержат не более двух гидроксилов на один атом алюминия. Однако в случае полиядерных комплексов возможны другие взаимодействия, такие как взаимодействие молекул воды с мостиковыми атомами кислорода, что в целом увеличивает количество молекул воды, приходящихся на один атом алюминия в структуре. Таким образом, увеличение количества атомов в полиядерном комплексе приводит к повышению степени его гидратации, вследствие чего при образовании твердой фазы плотность агрегатов понижается, что объясняет меньшую плотность коагуляционных агрегатов, образующихся из полиядерных комплексов с большей молекулярной массой (табл. 3).

Таблица 3

Энергетические характеристики гидратированных гидроксокомплексов алюминия

Table 3

Energy characteristics of hydrated aluminum hydroxocomplexes

Состав комплекса	Энергия структуры, Дж · 10^{-6} /моль	Энергия в расчете на молекулу воды, Дж · 10^{-6} /моль
$\text{Al}(\text{OH})_3$	−1229,83	0,00
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	−199,60	−199,60
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	−1828,79	−199,65
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	−2028,41	−199,65
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	−2228,02	−199,64
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	−2427,67	−199,64
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	−2627,38	−199,65
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	−2826,99	−199,64
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	−3026,75	−199,66

Выводы

С помощью метода лазерной дифракции изучено влияние способа введения гидроксида натрия (одно- или трехстадийное введение) на коллоидно-химические характеристики дисперсий гидроксида алюминия, получаемых при гидролизе СА и высокоосновного полигидроксохлорида алюминия Б50, вводимых в водную среду в порошкообразной и растворенной форме. Рассчитаны плотности и скорости седиментации коагуляционных агрегатов.

Установлено, что переход от одностадийного введения гидроксида натрия к трехстадийному приводит к увеличению размеров коагуляционных агрегатов и уменьшению их плотности. Этот эффект более ярко проявляется в случае использования порошкообразного коагулянта. Предположено, что причиной наблюдаемой зависимости коллоидно-химических параметров дисперсий от способа введения регулятора pH является изменение состава и молекулярной массы гидроксокомплексов алюминия, участвующих в образовании первичных коллоидных частиц.

Для объяснения полученных экспериментальных данных привлечены результаты квантово-химических расчетов, в соответствии с которыми увеличение молекулярной массы полиядерных гидроксокомплексов алюминия приводит к повышению степени их гидратации и, как следствие, к закономерному уменьшению плотности образованных ими коагуляционных агрегатов.

Показано, что при использовании порошкообразного СА трехстадийное введение гидроксида натрия приводит к формированию коагуляционных агрегатов, сопоставимых по своим коллоидно-химическим параметрам с агрегатами, образующимися из высокоосновного полигидроксохлорида алюминия Б50. Выявленная закономерность позволяет прогнозировать увеличение коагулирующей способности СА и повышение эффективности процесса очистки воды с использованием данного коагулянта.

Библиографические ссылки

1. Trinh TK, Kang LS. Response surface methodological approach to optimize the coagulation – flocculation process in drinking water treatment. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011;89:1126–1135. DOI: 10.1016/j.psep.2018.03.001.
2. Zarchi I, Friedler E, Rebhun M. Polyaluminium chloride as an alternative to alum for the direct filtration of drinking water. *Environmental Technology*. 2013;34(9):1199–1209. DOI: 10.1080/09593330.2012.743594.
3. Yu W, Gregory J, Campos CL. Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles. *Water Research*. 2015;68:119–126. DOI: 10.1016/j.watres.2014.09.045.
4. Zouboulis A, Traskas A, Samaras P. Comparison of efficiency between poly-aluminium chloride and aluminium sulphate coagulants during full-scale experiments in a drinking water treatment plant. *Separation Science and Technology*. 2008;43:1507–1519. DOI: 10.1080/01496390801940903.
5. Feng L, Zhao S, Sun S. Effect of pH with different purified aluminum species on coagulation performance and membrane fouling in coagulation/ultrafiltration process. *Journal of Hazardous Materials*. 2015;300:67–74. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.06.034.
6. Costa AF, Albuquerque CD, Salgueiro AA. Color removal from industrial dyeing and laundry effluent by microbial consortium and coagulant agents. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018;118:203–210. DOI: 10.1016/j.psep.2018.03.001.
7. Mikola M, Tanskanen J. Preparation and coagulation performance of solid aluminium formate. *Journal of Water Process Engineering*. 2015;5:1–5. DOI: 10.1016/j.seppur.2011.11.010.
8. Денисов ДГ. Экспериментальное исследование процесса растворения гранулированного коагулянта. *Вестник ИГЭУ*. 2008;2:1–4.
9. Feng C, Shi B, Wang D. Characteristics of simplified ferron colorimetric solution and its application in hydroxy-aluminum speciation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. 2006;287:203–211. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.03.053.
10. Зыгмант АВ, Савицкая ТА, Цыганкова НГ. Влияние состава и условий диспергирования алюминийсодержащих коагулянтов на характеристики образуемых ими дисперсий. *Весці Нацыянальнай акадэміі науک Беларусі. Серыя хімічных наукаў*. 2016;1:27–32.
11. Xu W, Gao B, Du B. Influence of shear force on floc properties and residual aluminum in humic acid treatment by nano-Al₁₃. *Journal of Hazardous Materials*. 2014;271:104–110. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.01.049.
12. Зыгмант АВ, Савицкая ТА, Цыганкова НГ. Влияние состава алюминийсодержащих коагулянтов на коллоидно-химические характеристики дисперсий гуминовых веществ. *Журнал Белорусского государственного университета. Химия*. 2017;1:65–73.
13. Никольский БП, редактор. *Справочник химика. Том 2*. Москва, Ленинград: Химия; 1963. 1168 с.
14. Фролов ЮГ. *Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы*. Москва: Химия; 1988. 465 с.
15. Sillanpää AJ, Päiväranta JT, Hotokka MJ. A computational study of aluminum hydroxide solvation. *Journal Physical Chemistry A*. 2001;105:1011–1022. DOI: 10.1021/jp012171b.

References

1. Trinh TK, Kang LS. Response surface methodological approach to optimize the coagulation – flocculation process in drinking water treatment. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011;89:1126–1135. DOI: 10.1016/j.psep.2018.03.001.
2. Zarchi I, Friedler E, Rebhun M. Polyaluminium chloride as an alternative to alum for the direct filtration of drinking water. *Environmental Technology*. 2013;34(9):1199–1209. DOI: 10.1080/09593330.2012.743594.
3. Yu W, Gregory J, Campos CL. Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles. *Water Research*. 2015;68:119–126. DOI: 10.1016/j.watres.2014.09.045.
4. Zouboulis A, Traskas A, Samaras P. Comparison of efficiency between poly-aluminium chloride and aluminium sulphate coagulants during full-scale experiments in a drinking water treatment plant. *Separation Science and Technology*. 2008;43:1507–1519. DOI: 10.1080/01496390801940903.
5. Feng L, Zhao S, Sun S. Effect of pH with different purified aluminum species on coagulation performance and membrane fouling in coagulation/ultrafiltration process. *Journal of Hazardous Materials*. 2015;300:67–74. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.06.034.
6. Costa AF, Albuquerque CD, Salgueiro AA. Color removal from industrial dyeing and laundry effluent by microbial consortium and coagulant agents. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018;118:203–210. DOI: 10.1016/j.psep.2018.03.001.
7. Mikola M, Tanskanen J. Preparation and coagulation performance of solid aluminium formate. *Journal of Water Process Engineering*. 2015;5:1–5. DOI: 10.1016/j.seppur.2011.11.010.
8. Denisov DG. [Experimental study of granulated coagulant dissolution process]. *Vestnik IGEU*. 2008;2:1–4. Russian.
9. Feng C, Shi B, Wang D. Characteristics of simplified ferron colorimetric solution and its application in hydroxy-aluminum speciation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. 2006;287:203–211. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.03.053.
10. Zyhmant AV, Savitskaya TA, Tsygankova NG. [The effect of aluminium coagulants composition and mixing conditions on characteristics of dispersions formed]. *Vesci Nacyjanal'naj akademii navuk Belarusi. Seryja himichnyh navuk*. 2016;1:27–32. Russian.
11. Xu W, Gao B, Du B. Influence of shear force on floc properties and residual aluminum in humic acid treatment by nano-Al₁₃. *Journal of Hazardous Materials*. 2014;271:104–110. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.01.049.
12. Zyhmant AV, Savitskaya TA, Tsygankova NG. [Influence of aluminium coagulants composition on colloidal characteristics of humic substances dispersions]. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*. 2017;1:65–73. Russian.
13. Nikol'skii BP, editor. *Spravochnik khimika. Tom 2*. Moscow, Leningrad: Khimiya; 1963. 1168 p. Russian.
14. Frolov UG. *Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy*. Moscow: Khimiya; 1988. 465 p. Russian.
15. Sillanpää AJ, Päiväranta JT, Hotokka MJ. A computational study of aluminum hydroxide solvation. *Journal Physical Chemistry A*. 2001;105:1011–1022. DOI: 10.1021/jp012171b.

Статья поступила в редакцию 27.11.2019.
Received by editorial board 27.11.2019.