

УДК 628.161:541.18.047  
ББК 38.761.104.33  
П 58

**Попова Ангелина Алексеевна**

*Доктор химических наук, зав. кафедрой химии, физики и физико-химических методов исследования Майкопского государственного технологического университета, Майкоп, тел. (8772) 523217, e-mail: ang.popova@gmail.com*

**Беданокв Рамазан Асланович**

*Доктор философских наук, профессор, профессор кафедры химии, физики и физико-химических методов исследования Майкопского государственного технологического университета, Майкоп, тел. (8772) 523217, e-mail: rbedanokov65@mail.ru*

**Кинетические закономерности электрокоагуляции природных вод**  
(Рецензирована)

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию кинетики электрокоагуляции природных вод с помощью гранулированного сульфата алюминия, полимеризованного оксихлорида алюминия и композиций на их основе. С помощью комплекса физико-химических методов установлено, что скорость и механизм электрокоагуляционных процессов в исследованных системах определяются соотношением различных видов электростатических взаимодействий, отражающимся на двойнослойных характеристиках частиц, в том числе величине электрокинетического потенциала и толщине двойного слоя, а также электрофоретической подвижности частиц. Установлен синергетический эффект коагулянтов и нитрит-гидроксидных смесей в условиях электрокоагуляционной очистки природных вод.

**Ключевые слова:** коагуляция, электрокоагуляция, кинетика коагуляции, коагулянт, очистка воды, питьевая вода.

**Popova Angelina Alekseevna**

*Doctor of Chemistry, Head of Department of Chemistry, Physics and Physicochemical Methods of Research, Maikop State University of Technology, Maikop, ph. (8772) 523217, e-mail: ang.popova@gmail.com*

**Bedanokov Ramazan Aslanovich**

*Doctor of Philosophy, Professor, Professor of Department of Chemistry, Physics and Physicochemical Methods of Research, Maikop State University of Technology, Maikop, ph. (8772) 523217, e-mail: rbedanokov65@mail.ru*

**Kinetics of natural water electrocoagulation**

**Abstract.** The work explores kinetics of natural water electrocoagulation with the help of the granulated aluminum sulfate, the polymerized aluminum oxychloride and compositions made on their basis. By using a complex of physicochemical methods, we have found out that speed and mechanism of electrocoagulation in the systems under study is determined by correlation of different types of electrostatic interactions. They influence the double-layer parameters and electrophoretic mobility of the particles. We have established the synergistic effect of coagulants and nitrite-hydroxide mixtures in the conditions of electrocoagulating purification of natural waters.

**Keywords:** coagulation, electrocoagulation, coagulation kinetics, water purification, drinking water.

**Введение**

Проблема чистой воды является глобальной проблемой. Во всем мире наблюдается нехватка чистой воды, пригодной для питья, бытового и промышленного использования.

Вода пресных природных водоемов отличается повышенной мутностью и цветностью вследствие образования в них высокодисперсных коллоидных систем. Частицы данных систем содержат как органические, так и неорганические компоненты природного и антропогенного происхождения. В результате промышленных, сельскохозяйственных и бытовых стоков в пресные водоемы попадает большое количество агрессивных анионов, катионов жесткости, ароматических, гетероциклических и ациклических соединений высоких классов опасности. Эти процессы делают пресную природную воду (ПВ) большинства водных бассейнов планеты практически непригодной для безопасного использования без предварительной очистки.

Основной целью водоподготовки является осветление воды и устранение загрязняющих веществ (ЗВ). В больших масштабах для этого используются коагуляционные процессы. Коагулянты сульфат алюминия гранулированный (ГСА) и оксихлорид алюминия полимери-

зованный (ОХА) имеют хорошие экономические и эксплуатационные показатели коагуляционной очистки в нейтральных водных средах [1, 2]. На осветляющее действие данных коагулянтов влияют заряд и размер коагулирующих частиц [3, 4]. Поэтому в случае каждого водоочистного сооружения или масштабного мероприятия по водоподготовке проводится дополнительный анализ ПВ, уточняются ее физико-химические и химические параметры, устанавливаются ЗВ, которые требуется устранить и определяются оптимальные дозы коагулянта.

Вместе с тем процесс формирования крупных коллоидных частиц, способных к седиментации, протекает во времени,  $\tau$  коагулирования может достигать нескольких суток. Это технологически осложняет процесс очистки и требует наличия специальных резервуаров для проведения коагуляции. Использование метода электрохимической коагуляции позволяет значительно сократить время достижения осветляющего эффекта, снизить в разы оптимальные дозы коагулянта, а в сочетании с модификацией коагулирующей смеси добиться устранения практически всех ЗВ.

Данная работа посвящена исследованию кинетических закономерностей электрохимического осветления природных вод с помощью коагулянтов ГСА и ОХА, а также композиций на их основе.

### Методика эксперимента

Оптическую плотность проб ПВ, взятой для исследования в соответствии с требованиями к отбору проб [5] до и после электрокоагуляционной обработки, проводили с помощью фотометра КФК-3 со светофильтрами 450 нм и 750 нм в кюветах 20 мм и 50 мм.

Электрохимическую обработку водной пробы проводили в стандартном термостатируемом трехэлектродном электролизере с разделенными катодным и анодным пространствами. Вспомогательным электродом служил платиновый электрод, электродом сравнения – насыщенный хлоридсеребряный электрод. В качестве рабочего электрода применяли оксидно-алюминиевый, анодированный стальной и угольный электроды. Потенциалы приведены в шкале стандартного водородного электрода (ст.в.э.), токи нормированы на единицу истинной поверхности электрода.

Капиллярный зонный электрофорез (КЗЭ) исследуемых систем проводили с помощью Agilent 7100 (Agilent Technologies, USA) с хроматомасс-спектроскопической системой детектирования (масс-селективный детектор Agilent 5975 SeriesMSD, газовый хроматограф Agilent 7820 AGC System с колонкой HP-FFAP ( $l=50$  м,  $d=22$  мкм, толщина пленки 0,3 мкм, напряжение 21 кВ,  $t$  капилляра 16°C, давление ввода пробы 40 мбар, время ввода пробы 18–32 с, скорость сканирования 1–5 кГц)). Идентификация очищенной воды (ОВ) проводилась с использованием библиотек Wiley, NIST-11 и др.

Электрохимическую обработку воды проводили в гальваностатическом и потенциостатическом режимах с помощью потенциостата/гальваностата Autolab 302N, используемого также для кондуктометрических измерений.

В качестве коагулянтов использовали сульфат алюминия, производитель “Scharlau” (особо чистый – осч) и оксихлорид алюминия (осч), в композициях на их основе использовали нитрит натрия (осч) и гидроксид натрия (осч). Микроскопию водных сред проводили с интервалом 1 мин с помощью TEMJEM 2100.

### Результаты и их обсуждение

Исследование кинетики осветления ПВ показало, что оптическая плотность  $A$  статических водных проб незначительно уменьшается во времени и около времени структурообразования  $t_s$  выходит на стационарное значение, которое может поддерживаться до нескольких суток (рис. 1, кривая 1).

Это объясняется созданием равновесной сетчатой структуры молекулами гуминовых веществ (ГВ), содержащихся в ПВ в виде тонкодисперсного золя. Процессы комплексообразования по пептидным и сложноэфирным связям молекул ГВ (рис. 2) приводят к стабилизации структуры коллоидной системы ПВ по достижении  $t_s$ .

Негидролизруемая часть ГВ содержит отрицательно заряженные карбоксилы (рис. 2),

которые могут служить активными центрами адсорбции частиц из окружающего пространства. В результате данного процесса и последующего электростатического взаимодействия с противоионами формируются коллоидные частицы состава:

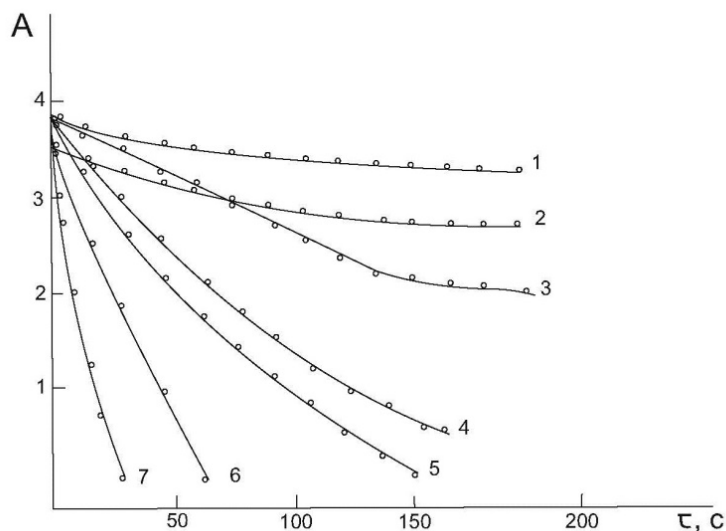
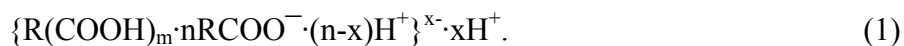


Рис. 1. Кинетические кривые осветления проб ПВ:  
 1 – ПВ; 2 – ПВ + ОХА; 3 – ПВ + ГСА;  
 4 – электрокоагуляционная кинетическая кривая для ПВ + ГСА;  
 5 – ПВ + ГСА + НГС; 6 – ПВ + ОХА + НГС;  
 7 – электрокоагуляционная кинетическая кривая для ПВ + ГСА + НГС

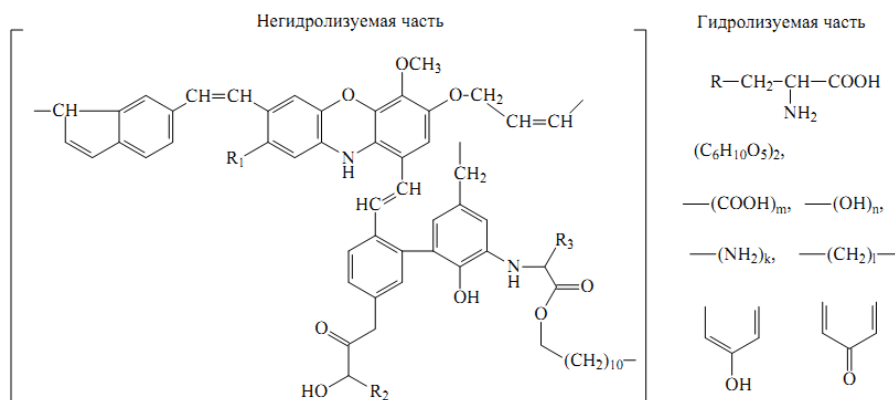


Рис. 2. Структура гуминовых кислот

Электрофореграммы, полученные методом капиллярного зонного электрофореза, подтверждают наличие в объеме исследуемых водных проб различных карбоксил-ионов (рис. 3). ГВ в электрофореграмме идентифицировали по многочисленным гетероциклам и метокси-группам в негидролизуемой части.

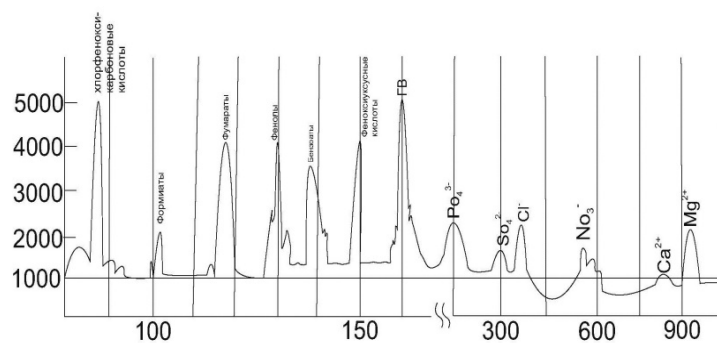


Рис. 3. Электрофореграмма пробы ПВ

В результате конденсационного укрупнения частиц при добавлении в пробу ПВ коагулянтов ГСА и ОХА оптическая плотность растворов снижается интенсивнее, чем в пробах без коагулянтов (рис. 1, кривые 2, 3). Увеличение концентрации добавки приводит к немонотонному изменению  $A$  с пологим минимумом в области критической концентрации  $C_{\text{крит}}$  коагулянта (рис. 4).

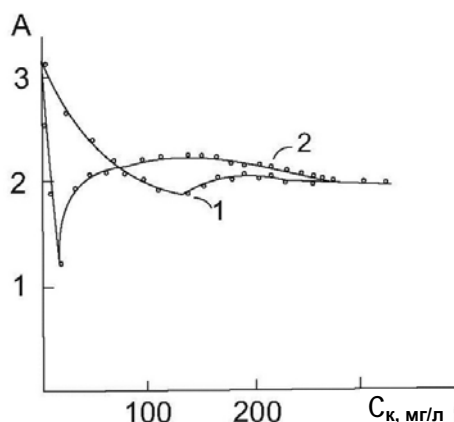
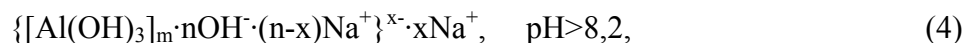
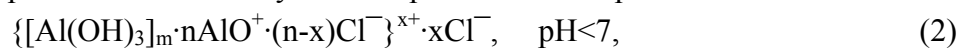


Рис. 4. Зависимость оптической плотности пробы ПВ от концентрации коагулянта: 1 – в отсутствие тока; 2 – при электрохимической обработке

Проведение процесса коагуляции в электрохимическом режиме позволяет резко снизить концентрацию коагулянта как в бестоковом, так и в электрохимических режимах, не влияя на оптическую плотность коллоидной системы ПВ, что обусловлено, по-видимому, полной стабилизацией двойного электрического слоя [6–8] мицеллы при  $C_{\text{крит}}$ .

Изменение состава коагулирующей смеси отражается на скорости изменения оптической плотности пробы. Так, добавление в коагулирующую систему нитрит-гидроксидной смеси (НГС) может вызвать синергетический эффект осветления в отсутствие тока (рис. 1, кривые 5, 6), но особенно в режиме электрокоагуляции (рис. 1, кривая 7).

Осветление воды при добавлении коагулянтов происходит с образованием частиц:



в зависимости от pH среды.

Присутствие в ПВ разноименно заряженных частиц определяет высокую вероятность взаимной коагуляции дисперсных систем, возникающих в ПВ в присутствии коагулянтов. Данный процесс приводит к уменьшению измеренного методом КЗЭ  $\zeta$ -потенциала, характеризующего энергию поверхности скольжения частицы (табл. 1).

Таблица 1

Параметры электростатического взаимодействия коагулирующих частиц в ПВ, содержащих ГВ, в присутствии коагулянтов ( $C_k=100$  мг/л)

Система	pH	$r$ , нм	$kr$	$\zeta$ , мВ	$\lambda_{\text{эф}}$ , нм	$L$ , нм	$\mu$ , $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	
							$\mu_{\text{КЗЭ}}$	$\mu_{\Gamma}$
ПВ	8,30	30÷36	0,51	42	1360	59	18,8	3,8
ПВ+ОХА	6,98	38÷55	0,57	37	1275	67	14,2	3,3
ПВ+ГСА	6,96	50÷60	0,60	35	1213	83	13,9	3,1
ПВ+ОХА+НГС	7,39	160÷182	0,65	21	814	250	9,1	1,9
ПВ+ГСА+НГС	7,78	170÷210	0,67	20	781	256	8,9	1,8

Замещение ионов диффузного слоя гуминовой частицы ионами  $\text{Na}^+$  из НГС, склонными к образованию мостиковых связей с мицеллами коагулянта [9, 10], приводит к значительному укрупнению частиц, созданию конгломератов и резкому увеличению скорости коагуляции, связанному с синергетическим влиянием эффекта нейтрализации высвободившихся  $\text{H}^+$  высокоподвижными ионами  $\text{OH}^-$  и  $\text{NO}_2^-$ . Отсутствие накопления свободных  $\text{H}^+$  в

объеме исследуемых растворов подтверждают данные рН-метрии, согласно которым при добавлении к пробам воды, содержащей гуминовые кислоты, коагулянтов, гидролизующихся по кислотному типу, происходит сначала снижение рН, а затем заметное увеличение рН при введении НГС (табл. 1).

Скорость коагуляции оценивали с помощью параметра  $\Delta A/\Delta t$ . Экспериментальные данные свидетельствуют о росте  $\Delta A/\Delta t$  во времени до  $t_s$  с последующим выходом величины данного параметра на стационарное значение (рис. 4) как в случае ПВ, так и при добавлении коагулянтов. Проведение коагуляции в электрохимическом режиме позволяет значительно увеличить скорость процесса и перевести его в область быстрой коагуляции, когда  $\Delta A/\Delta t$  не прекращает роста во времени.

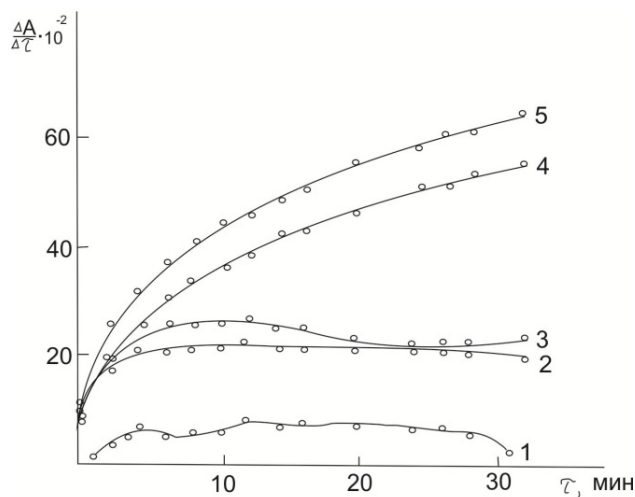


Рис. 4. Зависимость  $\Delta A/\Delta t$  от времени для:  
1 – пробы ПВ; 2 – ПВ + ГСА; 3 – ПВ + ОХА; 4 – ПВ + ОХА + НГС;  
5 – ПВ + ОХА + НГС в режиме электрохимической обработки

Скорость движения частицы в электрическом поле, характеризующуюся электрофоретической подвижностью  $\mu$ , определяет соотношение электрических сил, обусловленных наличием заряда, сил электрофоретического замедления, возникающих в результате движения противоионов в диффузной части двойного электрического слоя в направлении, противоположном движению частицы, и сил сопротивления среды, определяющих вязкость раствора.

Соотношение данных сил оценивали с помощью параметра Дебая-Хюккеля  $\kappa$ ,  $\kappa = \lambda_{\text{эф}}^{-1}$  ( $\lambda_{\text{эф}}$  – эффективная толщина диффузного слоя), и величины  $\kappa r$ , где  $r$  – размер частицы (табл. 1).

Размер частиц определяли, используя подход [11] и уравнение Геллера в логарифмической форме:

$$\lg D = \text{const} - a \lg \lambda, \quad (5)$$

где  $D$  – оптическая плотность системы,  $\lambda$  – длина волны,  $a$  – коэффициент, характеризующий размер частиц.

Построив в соответствии с (5) график прямо-пропорциональной зависимости  $\lg D \sim \lg \lambda$  и по тангенсу угла наклона находили значение  $a$ , зависящее от соотношения длины волны падающего света и среднего размера частиц дисперсной фазы системы, определяющего параметр  $z$ :

$$z = \frac{8\pi r}{\lambda}. \quad (6)$$

Табличные значения  $z$  для различных  $a$ , соотнесенные с калибровочной кривой Геллера, позволяют рассчитать средний радиус частиц при условии, что в формуле (6) используется среднее значение  $\lambda$  в том интервале, в котором проводилось определение  $a$ .

Рассчитанные из величины  $a$  значения  $r$  показывают, что в процессе коагуляции размер частиц увеличивается (табл. 1), снижая агрегативную устойчивость коллоидной

системы воды, содержащей гуминовые вещества [12, 13]. При этом в случае ГСА отмечается большее изменение  $r$ , чем в случае ОХА, что отражается и на скорости коагуляции частиц золь (рис. 5).

Для определения электрофоретической подвижности коллоидных частиц использовали уравнение Генри [14–16]:

$$\mu = (2\varepsilon\zeta/3\eta)f(\kappa r), \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\eta$  – вязкость среды,  $\zeta$  – электрокинетический потенциал частицы.

Значения аргумента функции  $f(\kappa r)$  варьируются в пределах  $\kappa r < 1$ , что свидетельствует о незначительном влиянии релаксационного эффекта ионной атмосферы на процесс движения частицы в электрическом поле.

Из таблицы 1 видно, что величины  $\mu_G$ , рассчитанные по уравнению (7), практически на порядок ниже  $\mu_{K3Э}$ , полученных методом КЗЭ, что является следствием высокой скорости движения электрофоретического потока, при которой не успевают сформироваться структурные фрагменты больших размеров, в результате чего снижается вязкость среды и повышается  $\mu_{K3Э}$ . Эти данные находятся в соответствии с результатами кондуктометрических измерений.

Рассчитанные в рамках модели Гуи-Чепмена величины эффективной толщины двойного электрического слоя  $\lambda_{эф}$  и толщины диффузной части двойного электрического слоя  $L$  (табл. 1) позволили интерпретировать полученные результаты с позиций электростатических взаимодействий в коагулирующих системах. Можно видеть, что электрокоагуляция в ПВ при добавлении ОХА или ГСА происходит при снижении электрокинетического потенциала, эффективной толщины двойного электрического слоя при значительном размывании диффузной части двойного электрического слоя (ДЭС), что приводит к увеличению размера частиц, а следовательно, скорости коагуляции и снижению оптической плотности системы.

Начальную концентрацию частиц в пробе ПВ с добавлением коагулянта принимали равной  $n_0$  [17]:

$$n_0 = \frac{6C_0}{\pi\rho_0 r_0^3}, \quad (8)$$

где  $C_0$  – средняя концентрация дисперсной фазы,  $\rho_0$  – средняя плотность коагулирующих частиц,  $r_0$  – математическое ожидание среднечислового размера взвешенных частиц.

Средняя концентрация дисперсной фазы установлена методом термоиспарения,  $C_0 = 7,9 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $r_0$  при средней плотности коагулирующих частиц  $\rho_0 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  составило  $1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ . С учетом данных величин  $n_0 = 7,9 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . На основании микроскопических данных и полученного значения  $n_0$  построили кинетическую кривую коагуляции в ПВ при добавлении коагулянтов и коагулирующих смесей (рис. 5).

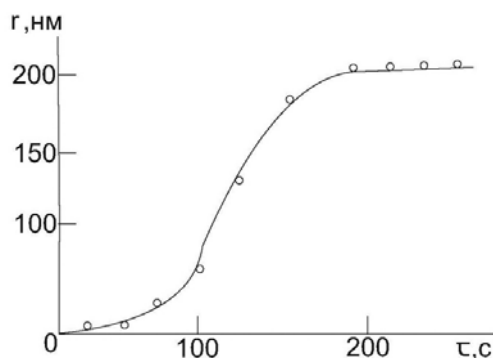


Рис. 5. Кинетическая кривая процесса коагуляции ГВ в пробе природной воды в присутствии оптимальной дозы коагулянта ОХА + НГС

Из рисунка 5 следует, что до  $\tau = 15–40$  с система находится в метастабильном состоянии, скорость коагуляции близка к нулю, что обеспечивается, по-видимому, преобладанием

поверхностных сил отталкивания дисперсных частиц друг от друга над молекулярными силами притяжения, а также высоким потенциальным барьером реакции взаимодействия частиц. Снижение данного барьера с окончанием формирования двойного электрического слоя частицы переводит процесс в режим медленной, а затем и быстрой коагуляции.

Таким образом, на кинетику электрокоагуляции в ПВ под действием оксихлорида алюминия, сульфата алюминия и коагулирующих композиций на их основе значительное влияние оказывает соотношение нескольких видов электростатических взаимодействий, определяющих  $\zeta$ -потенциал, электрофоретическую подвижность частиц, величины толщин двойного электрического слоя и его диффузной части.

Усиление коагуляции в присутствии нитрит-гидроксидной смеси связано с увеличением скорости процесса укрупнения частиц за счет образования мостиковых связей между частицами гуминовых кислот и коагулянта через ионы  $\text{Na}^+$ , усиленного связыванием высвобождающегося протона высокоподвижными гидроксид- и нитрит-ионами.

### Примечания:

1. Зонтаг Г., Штрэнге К. Коагуляция и устойчивость дисперсных систем. Л.: Химия, 1973. 152 с.
2. Запольский А.К., Баран А.А. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: свойства. Получение. Применение. Л.: Химия, 1987. 208 с.
3. Advances in water and wastewater treatment technology / ed. T. Matsuo, K. Hanaki, S. Takizawa, H. Satoh. Elsevier Science, 2001. 336 pp.
4. Линевич С.Н., Гетманцев С.В. Коагуляционный метод водообработки. Теоретические основы и практическое использование. М.: Наука, 2007. 230 с.
5. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. URL: <https://docplan.ru/Data2/1/4293785/4293785467.htm>
6. Беданов Р.А. Потенциал электрического поля в двойном слое на границе M/L // Экологические проблемы современности: материалы 30 Междунар. науч.-практ. конф. Майкоп: Кучеренко В.О., 2017. С. 176–177.
7. Попова А.А., Паланджянц Л.Ж. Анализ адсорбционных параметров и кривых дифференциальной емкости некоторых переходных металлов в растворах насыщенных спиртов // Коррозия: материалы, защита. 2009. № 2. С. 41–46.
8. Попова А.А., Паланджянц Л.Ж. Возникновение пиков дифференциальной емкости на поверхности переходных металлов при анодной поляризации // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2009. № 1. С. 32–35.
9. Popova A., Popova T. Investigation of kinetics of nature water refinement // Australian Journal of Scientific Research. 2014. Vol. 3, Iss. 1 (5). P. 62–69.
10. Попова А.А., Попова Т.Б. Исследование коагуляции ГСА с компонентами поверхностных природных вод // Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч. конф. Тамбов, 2016. С. 166.
11. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1951. 288 с.
12. Попова А.А. Кинетика коагуляционных процессов // Экологические проблемы современности: материалы 30 Междунар. науч.-практ. конф. Майкоп: Кучеренко В.О., 2017. С. 200–202.
13. Попова А.А., Попова Т.Б. Кинетические законо-

### References:

1. Sontag G., Strenge K. Coagulation and stability of disperse systems. L.: Chemistry, 1973. 152 pp.
2. Zapolsky A.K., Baran A.A. Coagulants and flocculants in water purification processes: properties. Production. Application. L.: Chemistry, 1987. 208 pp.
3. Advances in water and wastewater treatment technology / ed. T. Matsuo, K. Hanaki, S. Takizawa, H. Satoh. Elsevier Science, 2001. 336 pp.
4. Linevich S.N., Getmantsev S.V. Coagulation method of water treatment. Theoretical foundations and practical use. M.: Nauka, 2007. 230 pp.
5. GOST 31861-2012. Water. General requirements for sampling. URL: <https://docplan.ru/Data2/1/4293785/4293785467.htm>
6. Bedanokov R.A. Potential of the electric field in a double layer at the boundary of M/L // Ecological problems of the present: proceedings of the 30 Intern. scient. and pract. conf. Maikop: Kucherenko V.O., 2017. P. 176–177.
7. Popova A.A., Palandzhyants L.Zh. Analysis of adsorption parameters and curves of the differential capacity of some transition metals in solutions of saturated alcohols // Corrosion: Materials, Protection. 2009. No. 2. P. 41–46.
8. Popova A.A., Palandzhyants L.Zh. The appearance of peaks of the differential capacitance on the surface of transition metals during anodic polarization // Scientific Journal of Proceedings of VSU. Ser. Chemistry. Biology. Pharmacy. 2009. No. 1. P. 32–35.
9. Popova A., Popova T. Investigation of kinetics of nature water refinement // Australian Journal of Scientific Research. 2014. Vol. 3, Iss. 1 (5). P. 62–69.
10. Popova A.A., Popova T.B. Investigation of GSA coagulation with components of surface natural waters // Increase of efficiency and ecological aspects of resource use in agricultural production: proceedings of the Intern. scient. conf. Tambov, 2016. P. 166.
11. Shifrin K.S. Scattering of light in a turbid medium. M.; L.: Gostekhteoritizdat, 1951. 288 pp.
12. Popova A.A. Kinetics of coagulation processes // Ecological problems of the present: proceedings of the 30 Intern. scient. and pract. conf. Maikop: Kucherenko V.O., 2017. P. 200–202.
13. Popova A.A., Popova T.B. Kinetic regularities of the

- мерности процесса осветления воды в присутствии коагулянтов // Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч. конф. Тамбов, 2016. С. 165.
14. Hunter R.J. Zeta Potential in Colloid Science. Principles and Applications // London; New York; Toronto; Sydney; San Francisco: Academic Press, 1981. P. 11–124.
15. Grigoryev V.P., Popova A.A. Relationship between zero-charge potentials, critical passivation potentials and flat band potentials for transition metals of groups IV–VI of periodic table in neutral alcohol media // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surface. 2011. Vol. 47, Iss. 7. P. 850–855.
16. Григорьев В.П., Попова А.А. О взаимосвязи потенциалов нулевого заряда, критических потенциалов пассивации и потенциалов плоских зон для переходных металлов IV–VI групп Периодической системы в нейтральных спиртовых средах // Коррозия: материалы, защита. 2010. № 5. С. 6–11.
17. Zueva S., Veglio F. A solution to Smoluchowski's coagulation equation based on experimental data and a model to describe the frequency of particle collisions // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, Iss. 2. P. 260–266.
- process of clarification of water in the presence of coagulants // Increase of efficiency and ecological aspects of the use of resources in agricultural production: proceedings of the Intern. scient. conf. Tambov, 2016. P. 165.
14. Hunter R.J. Zeta Potential in Colloid Science. Principles and Applications // London; New York; Toronto; Sydney; San Francisco: Academic Press, 1981. P. 11–124.
15. Grigoryev V.P., Popova A.A. Relationship between zero-charge potentials, critical passivation potentials and flat band potentials for transition metals of groups IV–VI of periodic table in neutral alcohol media // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surface. 2011. Vol. 47, Iss. 7. P. 850–855.
16. Grigoryev V.P., Popova A.A. On the relationship between the potentials of the zero charge, the critical potentials of passivation and the potentials of flat zones for the transition metals of the IV–VI groups of the periodic system in neutral alcoholic environments // Corrosion: Materials, Protection. 2010. No. 5. P. 6–11.
17. Zueva S., Veglio F. A solution to Smoluchowski's coagulation equation based on experimental data and a model to describe the frequency of particle collisions // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, Iss. 2. P. 260–266.