

Флокуляционная очистка воды промышленными флокулянтами

**М.Т. Турсынбетов, А.К. Тыныбекова, Ж.А. Таттибаева, С.М. Тажибаева*,
Д.М-К. Ибраимова, Ж.А. Лахбаева, К.Б. Мусабеков**

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

Информация о статье

Получено
14.10.2025

Получено в исправленном виде
28.10.2025

Принято
05.11.2025

АННОТАЦИЯ

Проблема очистки воды является одной из актуальных проблем современности. В этой связи исследована возможность флокуляционной очистки суспензии каолина с высоким содержанием ионов тяжелых металлов с помощью промышленных флокулянтов “Kemira Superfloc A-120”, “Русфлок 506” и коагулянта “Kemira Ferix-3”. Показано, что наиболее высокая степень осветления суспензии достигается при концентрации агрегирующих агентов 0,16 г/л. Повышение их концентрации до 0,24 г/л приводит к стабилизации системы за счет перезарядки поверхности частиц глины. Электрокинетический потенциал частиц каолина составляет -21,8 мВ, который изменяется до -30,4 мВ в случае анионного флокулянта “Superfloc A-120”; в присутствии катионного флокулянта “Русфлок 506” и коагулянта “Kemira Ferix-3” наступает инверсия заряда, значения ζ -потенциала возрастают до +6,5 мВ и +5,5 мВ, соответственно. Флокуляционная очистка суспензии каолина сопровождается снижением концентрации ионов металлов.

Ключевые слова:

флокуляция; коагуляция;
промышленные флокулянты;
каolin; дзета-потенциал

1. Введение

Управление сточными водами стало одним из важнейших узлов глобальной экологической устойчивости. Сточные воды являются не только побочным продуктом бытовой или промышленной деятельности, а представляют собой динамичный интерфейс между развитием человечества и экологической целостностью. При неправильном управлении они становятся источником нестабильности, нарушая биогеохимические циклы, угрожая здоровью населения и подрывая гидрологическую устойчивость [1]. Одним из основных источников загрязнения окружающей среды является вода, добываемая из нефтяных и газовых скважин при разведке углеводородов [2]. Она содержит огромное количество органических и неорганических компонентов вместе с различными взвешенными частицами, маслами и смазками [3, 4]. Не менее актуальной проблемой являются вопросы очистки сточных вод металлургических предприятий, которые могут содержать ионы тяжелых металлов, опасных для флоры и фауны окружающей среды. С экологической точки зрения очень важно удалять из воды соли. Хотя химическое осаждение является наиболее экономичным методом, зачастую оно не

используется из-за медленной скорости удаления и большого количества отходов.

Флокуляция, как одна из технологий очистки воды, используется для обеспечения разделения твердой и жидкой фаз водной суспензии [5]. Ее преимущества заключаются в низких затратах, высокой эффективности очистки и простоте выполнения [5, 6]. Флокуляция может эффективно бороться с различными показателями загрязнения воды, такими как мутность, наличие красителей, ионов тяжелых металлов, водорослей и др. Флокулянты могут агрегировать коллоидные и твердые частицы, взвешенные в жидкости, в более крупные хлопья, а затем осаждать эти частицы из устойчивой суспензии [7]. Характеристики флокулянта, являющегося основой деструкции взвешенных дисперсных систем согласно применяемой технологии, напрямую определяют эффективность очистки и осветления воды [8].

По химическому составу флокулянты можно разделить на неорганические и органические коагулянты. Неорганические коагулянты, такие как соли железа и алюминия, имеют низкую стоимость, но их действие сильно зависит от температуры, pH и других условий. Кроме того, для флокуляции на основе неорганических коагулянтов требуется большая дозировка, а подходящих

*Corresponding author: S.M. Tazhibayeva; E-mail address: Tazhibayeva@kaznu.edu.kz

© The Author(s). This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

для этого типов сточных вод немного [9]. С другой стороны, это может привести к появлению высокой концентрации металлов в очищенной воде, что представляет угрозу для здоровья человека [10]. В свою очередь, органические флокулянты можно разделить на синтетические и биополимерные. Синтетические органические флокулянты могут достигать хорошей эффективности при низких дозировках, но имеют риск сложной биоразлагаемости и токсичности [11, 12]. Флокулянты на основе биополимеров относятся к длинноцепочечным молекулам, продуцируемым клетками живых организмов, и материалам, полученным из этих длинноцепочечных молекул или биомономеров [13, 14].

Таким образом, флокулянты обладают множеством преимуществ, такими как экологичность, низкая токсичность или нетоксичность, широкий диапазон регулируемого pH и высокая эффективность. Примеры использования отдельных флокулянтов описаны в работах [15–18]. Однако более широкое использование промышленных флокулянтов ограничивается недостатком информации по их эффективности при очистке воды и отсутствием сравнительного анализа флокулирующего действия флокулянтов различной природы. Кроме того, определенный интерес вызывает выяснение роли заряда флокулянта в его агрегирующем действии, так как макромолекулы классических флокулянтов на основе поликариламида не имеют заряд, однако показывают высокую эффективность при очистке воды. В этой связи целью настоящего исследования является определение особенностей флокуляции дисперсных частиц с помощью промышленных флокулянтов, а также изучение влияния концентрации и заряда флокулянта на эффективность процесса очистки воды.

2. Экспериментальная часть

2.1. Материалы и методы исследования

В качестве дисперсных частиц для флокуляции использованы образцы каолина месторождения “Алексеевское” (Акмолинская обл.). Глина была предварительно измельчена и просеяна через сито с размером пор 10 мкм (наиболее вероятный размер частиц составляет 6,5 мкм), затем на ее основе готовили 0,5% суспензии. В качестве агрегирующих агентов использованы промышленные флокулянты “Kemira Superfloc A-120” (Kemira, Финляндия), “Русфлок 506” (Россия) и “Kemira Ferix-3” (Kemira, Финляндия), их характеристики приведены в табл. 1 [19].

Таблица 1. Характеристики агрегирующих агентов [20]

Флокулянты/ коагулянты	Характеристики
Анионный флокулянт “Superfloc A-120”	Сополимер акриламида, беловатое сыпучее гранулированное твердое вещество с содержанием >87% активного вещества; нерасторимые примеси <0,5%.
Катионный флокулянт “Русфлок 506”	Белый гранулированный порошок, быстро растворяется в воде, образуя раствор без осадка; эффективно действует в широком диапазоне pH среды (от 4 до 10).
Коагулянт “Kemira Ferix-3”	Гранулы сульфата железа (III) зеле- новато-желтого цвета. Содержание трехвалентного железа в грану- лированном продукте составляет 19–21%. Количество нерастворимых примесей не превышает 1,0%.

Флокуляцию/коагуляцию частиц каолина оценивали по изменению оптической плотности очищаемой воды. Концентрация флокулянтов и коагулянтов в суспензии глины составляла 0,8 г/л, 0,16 г/л и 0,24 г/л. Оптическую плотность суспензий определяли при длине волны 540 нм с помощью спектрофотометра UV-7504 с точностью измерения $\pm 2\%$. Оптическая плотность суспензий составляла 0,86, pH – 6,4.

Эффективность флокуляции (Φ , %) рассчитана по формуле: $\Phi = (1 - D/D_0) \times 100$. В очищаемой воде, использованной для приготовления суспензий, были предварительно растворены в различной концентрации ионы металлов Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Cu^{2+} и Hg^{2+} . Анализ воды на содержание металлов проводили на атомно-адсорбционном спектрофотометре Agilent 240 FS (США). Точность определения концентрации ионов металлов составляла 1–3 %.

Электрокинетический потенциал частиц глин до и после обработки их растворами флокулянтов определяли путем измерения электрофоретической подвижности в сочетании со светорассеянием на приборе Malvern ZetaSizer NanoZS (Malvern, UK). Для каждого образца было измерено не менее 20 показаний электрофоретической подвижности, по которым были рассчитаны средние значения. Все эксперименты проводили при температуре $25 \pm 0,2$ °C.

3. Результаты и обсуждение

Проведены исследования по флокуляции частиц каолина с помощью анионного флокулянта “Kemira Superfloc A-120”, катионного флокулянта “Русфлок 506” и коагулянта “Kemira Ferix-3”. Для сравнения интенсивности оседания частиц в отсутствие и присутствии флокулянтов результаты исследований по седиментации частиц глины выражены в виде отношения значений оптической плотности суспензий, полученных в присутствии (D) и в отсутствие (D_0) агрегирующих агентов (рис. 1). Как видно из рис. 1, все использованные реагенты способствуют резкому снижению величин D/D_0 .

Сравнение эффективности флокулирующего действия двух флокулянтов – анионного флокулянта “Kemira Superfloc A-120” и катионного флокулянта “Русфлок 506” – показывает, что наименьшие значения D/D_0 после добавления в суспензии флокулянтов достигаются в случае катионного флокулянта “Русфлок 506” (табл. 2). Однако коагулянт “Kemira Ferix-3” показывает наилучший результат: если в случае двух флокулянтов значения D/D_0 снижались от 1,0 до 0,42 и 0,18 для анионного и катионного флокулянта, соответственно, то в случае коагулянта наименьшие значения D/D_0 достигают 0,12. Кроме того, наименьший наклон кривой оседания также достигается в случае коагулянта “Kemira Ferix-3”. Со-

ответственно, время достижения максимального осветления воды (t_{kp}), найденное по касательной к начальным участкам кривых осветления воды, также минимально для коагулянта. Это указывает на высокую агрегирующую способность коагулянта, превосходящую действие используемых флокулянтов на суспензию каолина. Действительно, эффективность флокуляции, которая показывает степень очистки воды от взвешенных частиц, имеет наиболее высокие значения в случае коагулянта “Kemira Ferix-3” и составляет 88,0%.

В основе процесса флокуляции лежит адсорбция макромолекул полимера на поверхности частиц глин с образованием агрегатов, так называемых флокул, которые могут увеличиваться в размере благодаря сцеплению адсорбированных макромолекул за счет своих “петель” и “хвостов”. Такой механизм флокуляции называется “мостичным,” так как обусловлен образованием “мостиков” между флокулируемыми частицами [21]. Не менее важное значение при флокуляции имеет наличие заряда на поверхности дисперсных частиц и вдоль углеводородной цепи флокулянта [22]. Именно наличие противоположного заряда между частицами глины и катионным флокулянтом обеспечивает более высокий флокулирующий эффект в случае катионного флокулянта “Русфлок 506” и такой механизм флокуляции называется нейтрализационным (рис. 2).

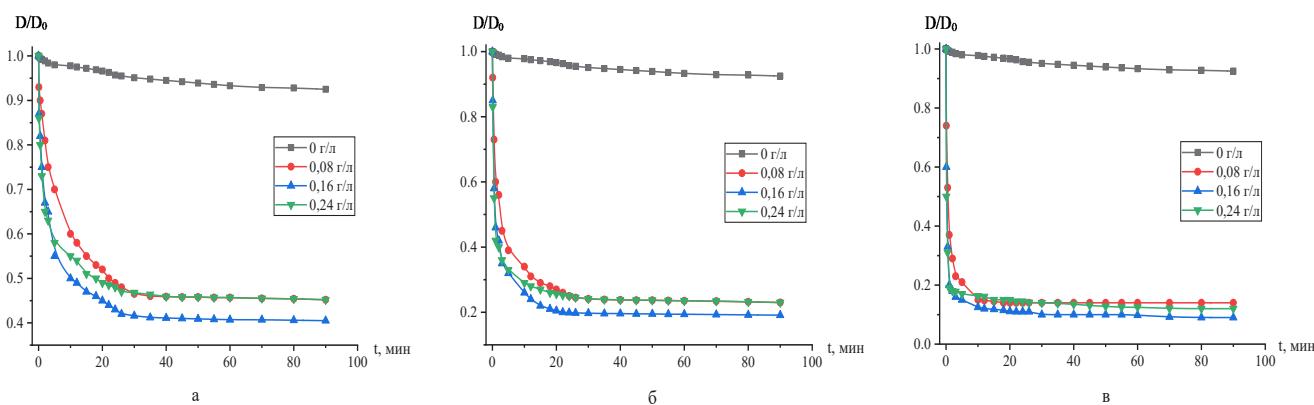


Рис. 1. Влияние концентрации флокулянтов “Kemira Superfloc A-120” (а), “Русфлок 506” (б) и коагулянта “Kemira Ferix-3” (в) на степень осветления суспензии каолина.

Таблица 2. Показатели эффективности флокулирующего и коагулирующего действия агрегирующих агентов на суспензию каолина

Флокулянты/коагулянты	Минимальные значения D/D_0	t_{kp} , мин	ЭФ, %
Анионный флокулянт “Kemira Superfloc A-120”	0,42	8	58,0
Катионный флокулянт “Русфлок 506”	0,18	4	82,0
Коагулянт “Kemira Ferix-3”	0,12	3	88,0

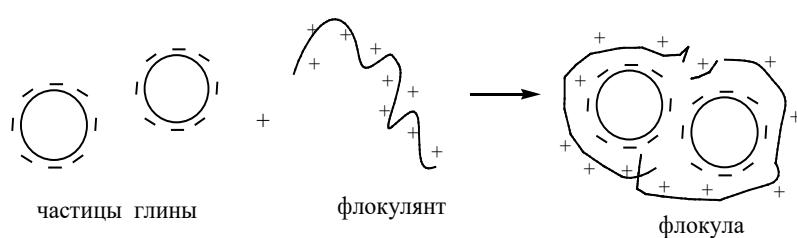


Рис. 2. Схема флокуляции частиц глины с помощью катионного флокулянта.

Как видно из рисунка 3, исходная глина имеет отрицательный заряд, дзета-потенциал ее частиц составляет -21,8 мВ. Увеличение концентрации анионного флокулянта "Kemira Superfloc A-120" приводит к повышению отрицательного заряда поверхности каолина. В случае катионного флокулянта "Русфлок 506" и коагулянта на основе сульфата железа наблюдается снижение отрицательного заряда поверхности частиц глины вплоть до перезарядки. Это является свидетельством того, что в основе флокуляции частиц глин флокулянтами лежит нейтрализация ее отрицательного заряда катионными функциональными группами флокулянта и ионами Fe^{3+} коагулянта. В случае анионного флокулянта адсорбция полимера на поверхности частиц глин может быть обусловлена образованием Н-связей между Si-OH группами на поверхности силиката и функциональными группами $-\text{CONH}_2$ акриламида полимера. В водной среде $-\text{CONH}_2$ группы могут быть гидролизованы до $-\text{COOH}$ групп, которые также склонны к образованию водородных связей.

Согласно [23], минеральный состав каолина месторождения "Алексеевское" включает следующие компоненты, мас.%: кварц – 67,3; каолинит – 31,4 и мусковит – 1,1. Химический состав, мас.%: Al_2O_3 – 19,3; SiO_2 – 69,6; Fe_2O_3 – 0,97; Na_2O – 0,15 и K_2O – 0,6. Потери при прокаливании составляют 6,3%. Превалирование в составе каолина оксида кремния и обусловливает отрицательный заряд частиц глины.

Что же касается влияния концентрации агрегирующих агентов, то, как видно из кривых оседания частиц каолина на рис. 1, наименьшие значения D/D_0 и, соответственно, наилучший эффект флокуляции и осветления воды достигаются при концентрации 0,16 г/л. Вероятно, при данной концентрации происходит максимальная нейтрализация заряда частиц глины. Действительно, на кривой изменения дзета-потенциала (рис. 3.) снижение отрицательного заряда каолина до 0 происходит в области концентраций 0,15-0,20 г/л. Повышение концентрации вводимых в суспензию глины агрегирующих агентов до 0,24 г/л приводит

к перезарядке поверхности и соответствующему повышению значений относительной оптической плотности. Такое изменение значений D/D_0 может быть свидетельством стабилизации системы вследствие перезарядки поверхности частиц глины. Она наступает в результате отталкивания одноименно заряженных групп, которые появились на поверхности флокул глин из-за избытка адсорбированных макромолекул флокулянта.

Эффективность осветления суспензий каолина в случае коагулянта также может быть обусловлена осаждением частиц глины вследствие нейтрализации ее заряда и соответствующего снижения сил электростатического отталкивания одноименно заряженных частиц, препятствующих их сближению и агрегации. Более существенный эффект агрегации в случае коагулянта "Kemira Ferix-3" может быть объяснен высоким зарядом ионов Fe^{3+} в составе коагулянта. Вместе с тем соли Fe (III) могут образовывать мицеллы Fe(OH)_3 , в таком случае осаждение частиц глины могло бы осуществляться по механизму гетерокоагуляции. Однако ввиду низкой концентрации вводимой соли Fe (III) образование мицелл и, соответственно, коагуляция по данному механизму маловероятны.

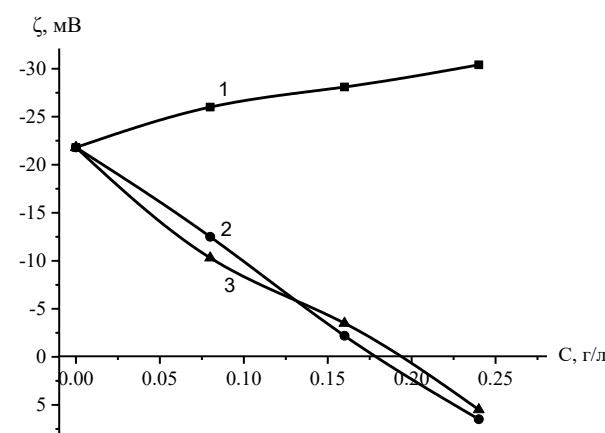


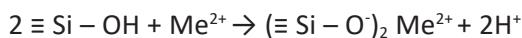
Рис. 3. Зависимость ζ -потенциала частиц каолина от концентрации анионного флокулянта Kemira Superfloc A-120 (1), катионного флокулянта Русфлок 506 (2) и коагулянта Kemira Ferix-3 (3).

Таблица 3. Влияние флокулянтов на содержание ионов металлов в суспензии каолина

Концентрация ионов металлов	Исходная суспензия	После флокуляции, мг/л		
		Kemira Superfloc A-120	RусФлок 506	Коагулянт Kemira Ferix-3
Al ³⁺	11,51±0,21	10,01±0,25	6,91±0,22	9,22±0,09
Mn ²⁺	6,35±0,24	6,03±0,21	5,72±0,28	6,35±0,11
Fe ³⁺	50,93±0,32	36,71±0,18	15,30±0,13	10,06±0,16
Co ²⁺	4,07±0,25	3,85±0,11	2,85±0,15	3,25±0,21
Cu ²⁺	5,76±0,12	4,75±0,22	1,71±0,24	1,73±0,25
Hg ²⁺	3,14±0,19	2,21±0,17	1,26±0,35	2,01±0,14

Поскольку промышленные сточные воды содержат большое разнообразие ионов тяжелых металлов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду, определенный интерес представляет возможность их соосаждения с помощью флокулянтов и коагулянтов. В этой связи для приготовления суспензий глины использована вода, содержащая ионы металлов Al³⁺, Mn²⁺, Fe³⁺, Co²⁺, Cu²⁺ и Hg²⁺ в концентрациях, соответствующих их количеству в сточных водах металлургических предприятий до предварительной очистки [24]. Как видно из табл. 3, после флокуляции и коагуляции частиц каолина наблюдается некоторое снижение концентрации ионов металлов, однако оно не столь значительно, как можно было бы ожидать при использовании адсорбентов или ионитов.

С другой стороны, наряду с влиянием флокулянтов и коагулянта возможна адсорбция ионов металлов (Meⁿ⁺) на поверхности частиц каолина за счет ионного обмена:



Кроме того, для эффективного удаления воды необходимо регулировать pH среды и дозу реагентов. На основании этих результатов можно заключить, что предложенные для очистки воды флокулянты "Kemira Superfloc A-120", "РусФлок 506" и коагулянт "Kemira Ferix-3" показывают высокую эффективность при очистке воды от взвешенных частиц глины. Для удаления ионов металлов наряду со взвешенными частицами необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, при флокуляции и коагуляции частиц каолина помостью флокулянта "РусФлок 506" и коагулянта "Kemira Ferix-3" значительную роль играет нейтрализация заряда частиц

глины. Действие анионного флокулянта "Kemira Superfloc A-120" обусловлено возможностью адсорбции его макромолекул на частицах глины за счет водородных связей между Si-OH группами поверхности каолина и -CONH₂ группами акриламида полимера с последующей флокуляцией по мостиковому механизму. Этот флокулянт может быть более эффективным для удаления положительно заряженных взвесей, таких как магнетит и боксит.

Подбор типа флокулянта – катионного или анионного – позволяет эффективно управлять процессом осветления воды при небольших расходах реагента.

Дальнейшие исследования будут направлены на поиск минимальной дозы использованных реагентов, необходимой для очистки воды с устойчивой мутностью.

Благодарность

Исследование проведено в рамках выполнения задач программы BR24993113, финансируемой МНВО РК.

Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Padilla-Rivera A., Morgan-Sagastume J.M., Güereca-Hernández L.P. Sustainability assessment of wastewater systems: an environmental and economic approach // J. Environ. Prot. – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 241-259.
- [2]. Dutta R., Dhar S., Baruah K., Dutta N., Doley S., Sedai P., Dolui S.K., Ray B.C., Karmakar B. Removal of organic solvents and oils from wastewater by absorption with crosslinked poly(ethylene-co-vinyl acetate) modified by cetyl alcohol // J. Water Process Eng. – 2022. – Vol. 49.

- [3]. Ricceri F., Giagnorio M., Farinelli G., Blandini G., Minella M., Vione D., Tiraferri A. Desalination of produced water by membrane distillation: effect of the feed components and of a pre-treatment by Fenton oxidation // *Sci. Rep.* – 2019. – Vol. 9.
- [4]. Jimenez S., Mico M.M., Arnaldos M., et al. State of the art of produced water treatment // *Chemosphere.* – 2018. – Vol. 192. – P. 186-208.
- [5]. Dao V.H., Cameron N.R., Saito K. Synthesis, properties and performance of organic polymers employed in flocculation applications // *Polym. Chem.* – 2016. – Vol. 7, № 1. – P. 11-25.
- [6]. Yang R., Li H., Huang M., Yang H., Li A. A review on chitosan based flocculants and their applications in water treatment // *Water Res.* – 2016. – Vol. 95. – P. 59-89.
- [7]. Salehizadeh H., Yan N., Farnood R. Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants // *Biotechnol. Adv.* – 2018. – Vol. 36, № 1. – P. 92-119.
- [8]. Liao Y., Zheng H., Dai L., et al. Hydrophobically modified polyacrylamide synthesis and application in water treatment // *Asian J. Chem.* – 2014. – Vol. 26. – P. 5923-5927.
- [9]. Sharma B.R., Dhuldhoya N.C., Merchant U.C. Flocculants – an ecofriendly approach // *J. Polym. Environ.* – 2006. – Vol. 14, № 2. – P. 195-202.
- [10]. Renault F., Sancy B., Badot P., Crini G. Chitosan for coagulation/flocculation processes – an eco-friendly approach // *Eur. Polym. J.* – 2009. – Vol. 45, № 5. – P. 1337-1348.
- [11]. Chen X., Si C., Fatehi P. Cationic xylan-(2-methacryloyloxyethyl trimethyl ammonium chloride) polymer as a flocculant for pulping wastewater // *Carbohydr. Polym.* – 2018. – Vol. 186. – P. 358-366.
- [12]. LuL., PanZ., HaonN., PengW. A novel acrylamide-free flocculant and its application for sludge dewatering // *Water Res.* – 2008. – Vol. 57. – P. 304-312.
- [13]. Song J.H., Murphy R.J., Narayan R., et al. Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics// *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* – 2009. – Vol. 364, No. 1526. – P. 2127-2139.
- [14]. Yates M.R., Barlow C.Y. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers – a critical review // *Resour. Conserv. Recycl.* – 2013. – Vol. 78. – P. 54-66.
- [15]. Maćczak P., Kaczmarek H., Ziegler-Borowska M. Recent achievements in polymer bio-based flocculants for water treatment // *Mater.* – 2020. – Vol. 13. – P. 3951.
- [16]. Sun Y., Zhou Sh., Shah K.J. New class of flocculants and coagulants // *Adv. Wastewater Treat. I, Mater. Res. Found.* – 2021. – Vol. 91. – P. 219-252.
- [17]. Ogbonna Ch.N., Emeka G.N. Bio-based flocculants for sustainable harvesting of microalgae for biofuel production: a review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2021. – Vol. 139. – P. 110690.
- [18]. Fan W., Lv B., Jiao Y., et al. Preparation and application of composite magnetic flocculants for wastewater treatment: a review // *J. Environ. Manag.* – 2025. – Vol. 377. – P. 124626.
- [19]. Биолайт (веб-страница). Флокулянт анионный Kemira Superfloc A-120HMW. <https://biolight.ru/product/0018085>.
- [20]. Ингибитор.spb (веб-страница). Анионный флокулянт Кемира Суперфлок А-120 (мешок/25 кг). <https://inhibitors.ru/product/superfloc-a120>.
- [21]. Chong M. F. Direct flocculation process for wastewater treatment // In: Sharma S., Sanghi R. (eds.) *Adv. Water Treat. Pollut. Prev.* – Dordrecht: Springer, 2012.
- [22]. Khazaie A., Mazarji M., Samali B., Osborne D., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Soldatov A. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry // *Water.* – 2022. – Vol. 14. – P. 6918.
- [23]. Ковзalenko В. А., Сарсенбай Г., Садыков Н.М.К., Имангалиева Л. М. Каолины – некондиционное алюмосиликатное сырье // Комплекс. использ. минер. сырья. – 2015. – № 3 (294). – С. 32-37.
- [24]. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // *Clean Water.* – 2021. – Vol. 4. – P. 36.

References

- [1]. A. Padilla-Rivera, J.M. Morgan-Sagastume, L.P. Güereca-Hernández, et al. Sustainability assessment of wastewater systems: an environmental and economic approach, *J. Environ. Prot.*, 10 (2019) 241-259. <https://doi.org/10.4236/jep.2019.102014>.
- [2]. R. Dutta, S. Dhar, K. Baruah, et al. Removal of organic solvents and oils from wastewater by absorption with crosslinked poly(ethylene-co-vinyl acetate) modified by cetyl alcohol, *J. Water Process Eng.*, 49 (2022) 103073. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103073>.
- [3]. F. Ricceri, M. Giagnorio, G. Farinelli, et al. Desalination of produced water by membrane distillation: effect of the feed components and of a pre-treatment by Fenton oxidation, *Sci. Rep.*, 9 (2019) 51167. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51167-z>.
- [4]. S. Jimenez, M.M. Mico, M. Arnaldos, et al. State of the art of produced water treatment,

- Chemosphere, 192 (2018) 186-208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>.
- [5]. V.H. Dao, N.R. Cameron, K. Saito. Synthesis, properties and performance of organic polymers employed in flocculation applications, *Polym. Chem.*, 7 (2016) 11-25. <https://doi.org/10.1039/C5PY01572C>.
- [6]. R. Yang, H. Li, M. Huang, et al. A review on chitosan based flocculants and their applications in water treatment, *Water Res.*, 95 (2016) 59-89. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.068>.
- [7]. H. Salehizadeh, N. Yan, R. Farnood. Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants, *Biotechnol. Adv.*, 36 (2018) 92-119. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.10.002>.
- [8]. Y. Liao, H. Zheng, L. Dai, et al. Hydrophobically modified polyacrylamide synthesis and application in water treatment, *Asian J. Chem.*, 26 (2014) 5923-5927. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2014.16860>.
- [9]. B.R. Sharma, N.C. Dhuldhoya, U.C. Merchant. Flocculants – an ecofriendly approach, *J. Polym. Environ.*, 14 (2006) 195-202. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0011-x>.
- [10]. F. Renault, B. Sancey, P. Badot, et al. Chitosan for coagulation/flocculation processes – an eco-friendly approach, *Eur. Polym. J.*, 45 (2009) 1337-1348. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.12.027>.
- [11]. X. Chen, C. Si, P. Fatehi. Cationic xylan-(2-methacryloyloxyethyl trimethyl ammonium chloride) polymer as a flocculant for pulping wastewater, *Carbohydr. Polym.*, 186 (2018) 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.068>.
- [12]. L. Lu, Z. Pan, N. Hao, et al. A novel acrylamide-free flocculant and its application for sludge dewatering, *Water Res.*, 57 (2008) 304-312. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.047>.
- [13]. J.H. Song, R.J. Murphy, R. Narayan, et al. Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics, *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.*, 364 (2009) 2127-2139. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>.
- [14]. M.R. Yates, C.Y. Barlow. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—a critical review, *Resour. Conserv. Recycl.*, 78 (2013) 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.010>.
- [15]. P. Ma'cczak, H. Kaczmarek, M. Ziegler-Borowska. Recent achievements in polymer bio-based flocculants for water treatment, *Mater.*, 13 (2020) 3951. <https://doi.org/10.3390/ma13183951>.
- [16]. Y. Sun, Sh. Zhou, K.J. Shah. New class of flocculants and coagulants, *Adv. Wastewater Treat. I, Mater. Res. Found.*, 91 (2021) 219-252. <https://doi.org/10.21741/9781644901144-7>.
- [17]. Ch.N. Ogbonna, G.N. Emeka. Bio-based flocculants for sustainable harvesting of microalgae for biofuel production: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 139 (2021) 110690. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110690>.
- [18]. W. Fan, B. Lv, Y. Jiao, et al. Preparation and application of composite magnetic flocculants for wastewater treatment: a review, *J. Environ. Manag.*, 377 (2025) 124626. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124626>.
- [19]. Biolight (Web Page). Flocculant anionic Kemira Superfloc A-120HMW. < a href="https://biolight.ru/product/0018085">URL (In Russian).
- [20]. Inhibitor.spb (Web Page). Anionic flocculant Kemira Superfloc A-120 (bag/25 kg). < a href="https://inhibitors.ru/product/superfloc-a120">URL (In Russian).
- [21]. M.F. Chong. Direct flocculation process for wastewater treatment, in: S. Sharma, R. Sanghi (Eds.), *Adv. Water Treat. Pollut. Prev.*, Springer, Dordrecht, 2012. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4204-8_8.
- [22]. A. Khazaie, M. Mazarji, B. Samali, et al. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry, *Water*, 14 (2022) 6918. <https://doi.org/10.3390/w14060918>.
- [23]. V.A. Kovzalenko, G. Sarsenbai, N.M.K. Sadykov, L.M. Imangalieva. Kaolins – unconventional aluminosilicate raw materials, *Kompleks. Ispolz. Miner. Syr'ya*, 3 (2015) 32-37. (In Russian).
- [24]. N.A.A. Qasem, R.H. Mohammed, D.U. Lawal. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review, *Clean Water*, 4 (2021) 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>.

Сведения об авторах

М.Т. Турсынбетов – докторант, кафедра аналитической, коллоидной химии и технологии редких элементов, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: tursynbetov.mirzhan@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5366-1422>

А.К. Тыныбекова – магистрант, кафедра аналитической, коллоидной химии и технологии редких элементов, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: aiaru.battalova@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7891-5212>

Ж.А. Таттибаева – PhD, кафедра аналитической, коллоидной химии и технологии редких элементов, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: zhadra.tattibayeva@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9164-4220>

С.М. Тажибаева – д.х.н., профессор, кафедра аналитической, коллоидной химии и технологии редких элементов, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: Sagdat.Tazhibaeva@kaznu.edu.kz
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3300-3235>

Д.М-К. Ибраимова – к.х.н., кафедра аналитической, коллоидной химии и технологии редких элементов, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: Dana.Ibraimova@kaznu.edu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-9745>

Ж.А. Лахбаева – PhD, постдокторант, кафедра химии, Алматы, Казахстан
E-mail: zhansaya.lakhbayeva@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1900-6619>

К.Б. Мусабеков – д.х.н., профессор, кафедра аналитической, коллоидной химии и технологии редких элементов, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: kuanышbek.musabekov@kaznu.kz
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1114-1901>

Flocculation Treatment of Water Using Industrial Flocculants

М.Т. Tursynbetov, A.K. Tyntybekova, Zh.A. Tattibayeva, S.M. Tazhibayeva*, D.M-K. Ibraimova, Zh.A. Lakhbayeva, K.B. Musabekov

Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi avenue, 71, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

Water purification is one of the most pressing issues of modern times. In this regard, the possibility of flocculation treatment of kaolin suspension with a high content of heavy metal ions was investigated using industrial flocculants: "Kemira Superfloc A-120", "Rusfloc 506", and the coagulant "Kemira Ferix-3". It was shown that the highest degree of suspension clarification is achieved at a flocculant concentration of 0.16 g/L. Increasing the concentration to 0.24 g/L leads to system stabilization due to the recharging of the clay particle surfaces. The electrokinetic potential of kaolin particles is -21.8 mV, which shifts to -30.4 mV when treated with the anionic flocculant "Superfloc A-120". In the presence of the cationic flocculant "Rusfloc 506" and the coagulant "Kemira Ferix-3", charge inversion occurs, and the ζ -potential increases to +6.5 mV and +5.5 mV, respectively. Flocculation treatment of the kaolin suspension is accompanied by a decrease in the concentration of metal ions.

Keywords: flocculation, coagulation, industrial flocculants, kaolin, zeta-potential.

Суды өнеркәсіптік флокулянттармен флокуляциялық тазарту

М.Т. Тұрсынбетов, А.Қ. Тынтыбекова, Ж.А. Тәттібаева, С.М. Тәжібаева*, Д.М-К. Ибраимова, Ж.А. Лахбаева, К.Б. Мұсабеков

әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби д., 71, Алматы, Қазақстан

АНДАТПА

Суды тазарту мәселесі қазіргі заманың өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Осыған байланысты құрамында ауыр металл иондары бар жоғары каолин суспензиясын өнеркәсіптік флокулянттар: "Kemira Superfloc A-120", "Русфлок 506" және коагулянт "Kemira Ferix-3" көмегімен флокуляциялық жолмен тазарту мүмкіндігі зерттелді. Зерттеу нәтижесінде, ең жоғары мөлдірлену деңгейі флокулянттардың концентрациясы 0,16 г/л болғанда байқалды. Ал бұл концентрацияны 0,24 г/л-ге дейін арттыру саз бөлшектерінің беткі зарядтарының қайта зарядталуына байланысты жүйенің тұрақтанып кетуіне әкеледі. Каолин бөлшектерінің электрокинетикалық потенциалы -21,8 мВ құрайды және аниондық флокулянт "Superfloc A-120" қосылған кезде -30,4 мВ-ге дейін төмендейді. Ал катиондық флокулянт "Русфлок 506" және коагулянт "Kemira Ferix-3" әсерінен зарядтардың кері өзгерісі жүреді, және ζ -потенциалдың мәні сәйкесінше +6,5 мВ және +5,5 мВ-ге дейін артады. Каолин суспензиясын флокуляциялық тазарту барысында ауыр металл иондарының концентрациясы төмендейді.

Түйін сөздер: флокуляция, коагуляция, өнеркәсіптік флокулянттар, каолин, дзета-потенциал.