

ТИТАНСОДЕРЖАЩИЕ КОАГУЛЯНТЫ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Кузин Е. Н.

TITANIUM-BASED COAGULANTS IN DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT

Kuzin E. N.

Аннотация

Введение. Доочистка сточных вод, прошедших стадию глубокой очистки от биогенных элементов, — актуальная и до конца не решенная задача. Традиционные реагенты на основе солей алюминия, используемые для удаления соединений фосфора, имеют ряд существенных недостатков и не всегда позволяют добиться нормативов, установленных для сброса очищенной воды в водоемы рыбохозяйственного назначения. Титансодержащие коагулянты — перспективные и высокоэффективные реагенты, показавшие высокую эффективность в процессах очистки сточных вод различного происхождения. Комплексные титансодержащие коагулянты — это бинарные коагулянты, полученные введением в состав традиционных алюминийсодержащих коагулянтов продуктов гидролиза соединений титана в количестве до 10 % масс. **Методы.** Пробную коагуляцию проводили на лабораторном флокуляторе VЕLP, для оценки эффективности очистки использовали спектрофотометрию, турбидиметрию и атомно-эмиссионный спектральный анализ. **Результаты.** Установлено, что применение соединений титана и комплексных титансодержащих коагулянтов позволяет повысить эффективность очистки, а также снизить остаточное содержание фосфат-иона до нормативов ПДК. Определены основные закономерности использования комплексных титансодержащих реагентов, доказано влияние дозы и рН среды на эффективность удаления фосфат-иона. Установлено, что остаточные концентрации фосфат-иона в очищенной воде при использовании титансодержащих коагулянтов существенно ниже, чем при использовании традиционных реагентов. Титансодержащие коагулянты работают в более широком диапазоне рН, при этом требования к остаточной концентрации ионов титана в очищенной воде значительно мягче, чем к алюминию. Доказано, что применение комплексных титансодержащих реагентов позволяет значительно интенсифицировать процессы седиментации и фильтрации осадков, образующихся в процессе коагуляционной очистки воды. **Заключение.** В рамках работы подтверждена перспективность применения титансодержащих коагулянтов в процессах очистки сточных вод хозяйственно-бытового происхождения.

Ключевые слова: водоочистка, титансодержащие комплексные коагулянты, фосфаты, седиментация.

Abstract

Introduction. Post-treatment of wastewater that has passed the stage of deep purification from biogenic elements is a pressing issue that has not been fully solved yet. Traditional reagents based on aluminum salts used to remove phosphorus compounds have a few significant drawbacks and do not always make it possible to achieve the standards established for the discharge of treated water into fishery reservoirs. Titanium-based coagulants are promising and highly effective reagents that have shown high efficiency in treating wastewater of various origins. Complex titanium-based coagulants are binary coagulants obtained by introducing hydrolysis products of titanium compounds in an amount of up to 10 % wt into the composition of traditional aluminum-based coagulants. **Methods.** Trial coagulation was carried out using a VЕLP laboratory flocculator; spectrophotometry, turbidimetry, and atomic emission spectral analysis were used to assess the purification efficiency. **Results.** It has been found that the use of titanium compounds and complex titanium-based coagulants can improve the efficiency of purification, as well as reduce the residual content of phosphate ion to the MPC standards. We have determined the main regularities in the use of complex titanium-based reagents and established the effect of the dose and pH of the medium on the efficiency of phosphate ion removal. It has also been found that the residual concentration of phosphate ion in treated water using titanium-based coagulants is significantly lower than when using traditional reagents. Titanium-based coagulants operate in a wider pH range, while the requirements for the residual concentration of titanium ions in treated water are much softer than for that of aluminum. It has been proved that the use of complex titanium-based reagents makes it possible to significantly intensify the processes of sedimentation and filtration of sludge formed during coagulation water treatment. **Conclusion.** In the course of the study, we have confirmed the prospects of using titanium-based coagulants in domestic wastewater treatment.

Keywords: water treatment, complex titanium-based coagulants, phosphates, sedimentation.

Введение

Очистка сточных вод хозяйственно-бытового происхождения – актуальная проблема для большинства населенных пунктов. Несмотря на высокую эффективность очистки сточных вод методом глубокой биологической очистки, не всегда удается достичь необходимой степени очистки воды.

Одной из основных трудностей, связанных с эксплуатацией биологических очистных сооружений, является вынос активного ила из вторичного отстойника из-за недостаточного времени нахождения в нем воды или конструкционных дефектов оборудования [8].

Эта проблема особенно актуальна для локальных сооружений очистки маленькой производительности (до 200 м³/сут), когда недостаточно места для размещения полноценных вторичных отстойников. В целях повышения эффективности очистки подобные сооружения оборудуют установками тонкослойного отстаивания, флотации или механической фильтрации выносимого ила.

Для решения приведенных проблем справочник наилучших доступных технологий рекомендует применение коагулянтов [1]. Их использование также рекомендовано для удаления фосфатов и повышения эффективности доочистки от нефтепродуктов.

В литературных данных [2, 3] встречается информация об эффективности использования коагулянтов на основе соединений алюминия и железа в процессах доочистки сточных вод хозяйственно-бытового назначения. Несмотря на высокую эффективность, указанным реагентам присущи определенные недостатки. Соли алюминия практически малоэффективны при низкой температуре воды, а также при pH ниже 6,0 или более 8,0. Соединения железа могут образовывать комплексы с органическими кислотами, а также приводить к образованию значительных количеств труднофильтруемых осадков, ввиду чего практически не используются для доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений фосфора [1].

Альтернативой традиционным коагулянтам могут выступать комплексные реагенты (например, алюмокремниевый флокулянт-коагулянт), доказавшие свою эффективность в процессах

очистки сточных вод различного происхождения. Несмотря на высокую эффективность и низкую стоимость, данный реагент имеет ряд недостатков: содержание активного компонента менее 2 %масс., низкое значение pH раствора (коррозионная активность) и гелирование в процессе хранения, из-за чего реагент не нашел широкого спроса [6].

В последнее время все чаще появляется информация о перспективности использования комплексных титансодержащих реагентов при очистке сточных вод различного происхождения [10, 11, 17, 20, 22]. Титансодержащие коагулянты показали высокую эффективность в процессах очистки стоков полигона твердых коммунальных отходов [4, 16], очистки поверхностных маломутных вод для нужд питьевого водоснабжения [14], а также в процессах очистки промышленных сточных вод от растворенных органических соединений [19], взвешенных веществ и тяжелых металлов [5]. Кроме того, существуют данные о высокой эффективности солей титана во время удаления фосфат-иона из воды [12, 13, 15].

Методы и материалы

Основная цель данной работы – оценка возможности использования титансодержащих реагентов в процессах доочистки сточных вод хозяйственно-бытового происхождения от соединений фосфора.

Основным объектом исследования является сточная вода реабилитационного центра, прошедшая стадию глубокой биологической очистки, отобранная перед поступлением во вторичный отстойник. Образцы воды предварительно отстаивали в течение 10 минут для удаления крупной быстрооседающей фракции.

Образец комплексного коагулянта (далее КК) был получен модификацией сульфата алюминия продуктами гидролиза соединений титана (тетрахлорид/оксисульфат титана). Согласно литературным данным [17] содержание модифицирующей добавки соединений титана должно находиться в диапазоне 10–20 %масс., однако с учетом экономической составляющей было выбрано минимальное значение, равное 10 %масс. (по TiO₂). В качестве контрольного образца коагулянтов был использован чистый сульфат алюминия [1, 2, 3] как наиболее распространенный традиционный реагент. Применение коагулянтов

на основе соединений железа в данном случае нецелесообразно ввиду неподходящего значения рН обрабатываемой воды, высокой коррозионной активности и вероятности образования комплексных соединений железа с органическими кислотами.

Суммарное содержание металлов в воде до и после обработки измеряли на атомно-эмиссионном спектрометре «СпектроСкай» (г. Королев, Россия) [7].

Содержание взвешенных веществ определяли гравиметрическим методом, а также при использовании портативного турбидиметра-мутномера HANNA (HI 98703-02). Полученные данные пересчитывали в содержание взвешенных веществ по каолину.

Содержание фосфатов определяли на спектрофотометре DR 2800 (HACH USA).

Реагентную обработку проводили на лабораторном флокуляторе JLT 4 фирмы (VELP). Быстрая коагуляция — 2 минуты, хлопьеобразование — 8 минут, седиментация — 30 минут.

Скорость оседания осадка измеряли в мерном цилиндре, скорость фильтрации оценивали по объему фильтрата при пропускании обработанной воды через фильтр «белая лента» в течение 60 секунд в соответствии с ГОСТ¹.

Результаты исследования и обсуждение

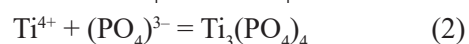
На первом этапе экспериментов был проведен анализ исходной воды непосредственно после биологической очистки, после отстойника вторичного ила и после фильтрации. Данные по химическому составу представлены в табл. 1.

¹ ГОСТ 7584-89. Бумага лабораторная фильтровальная. Методы определения фильтрующей и разделительной способности.

Из табл. 1 видно, что биологическая очистка, включающая стадию глубокой доочистки на фильтрах, не позволяет добиться нормативов ПДК_{р-х} по показателям БПК₅, фосфат-иона и алюминия.

В целях доочистки сточных вод от соединений фосфора обычно применяют реагентное осаждение, используя в качестве коагулянтов соединения алюминия или железа, которые достаточно хорошо зарекомендовали себя. Применение коагулянтов также позволяет значительно повысить эффективность очистки и снизить время отстаивания.

Оценка эффективности различных реагентов в процессе удаления фосфат-иона была проведена на модельной воде. На рис. 1 представлены данные по эффективности удаления соединений фосфора в зависимости от дозы различных коагулянтов, рассчитанных по реакциям (1)–(2), а на рис. 2 проиллюстрировано влияние рН обрабатываемой воды на эффективность удаления фосфат-иона.



Из данных рис. 1 можно сделать вывод, что коагулянты на основе соединений титана, а также образцы комплексных титансодержащих реагентов по своей эффективности (удаления фосфат-иона) превосходят традиционный сульфат алюминия примерно на 3–5 %.

Помимо этого, из данных, представленных на рис. 2, видно, что добавка соединений титана к традиционным реагентам позволяет расширить эффективный диапазон рН, а также повысить

Таблица 1

Химический состав образцов исследуемой воды

Показатель	Исх. вода	Выход из биоочистки	Отстойник (2 часа)	После фильтрации	ПДК* _{р-х}
рН	7,2	7,1	7,0	7,0	6,5–9,0
БПК ₅ , мг(О)/л	322	98	24	3,1	2,1
Взв. вещ, мг/л	285	89	12	0,9	17,75
PO ₄ ³⁻ , мг/л	10,3	4,3	2,1	1,9	0,2
NO ₃ ⁻ , мг/л	2,3	7,3	4,2	4,0	9,0
Al, мг/л	0,1	0,1	0,1	0,1	0,04
Ti, мг/л	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,06
Жиры, мг/л	9,6	0,3	0,24	0,14	Н/н.

*ПДК_{р-х} — предельно допустимая концентрация вещества для водоемов рыбохозяйственного назначения.

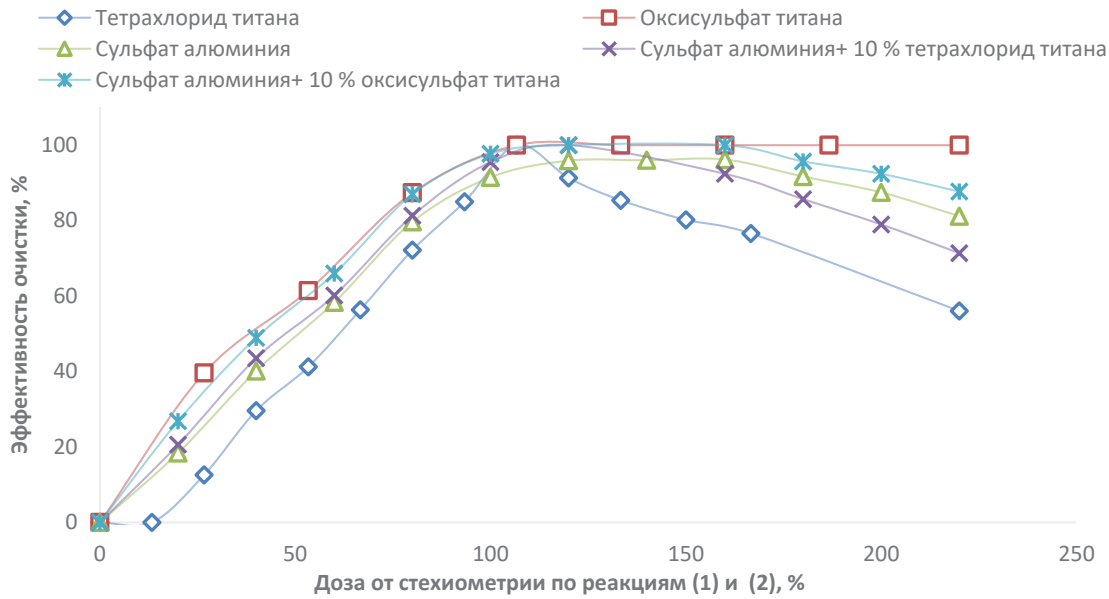


Рис. 1. Влияние дозы коагулянта на эффективность удаления фосфат-иона

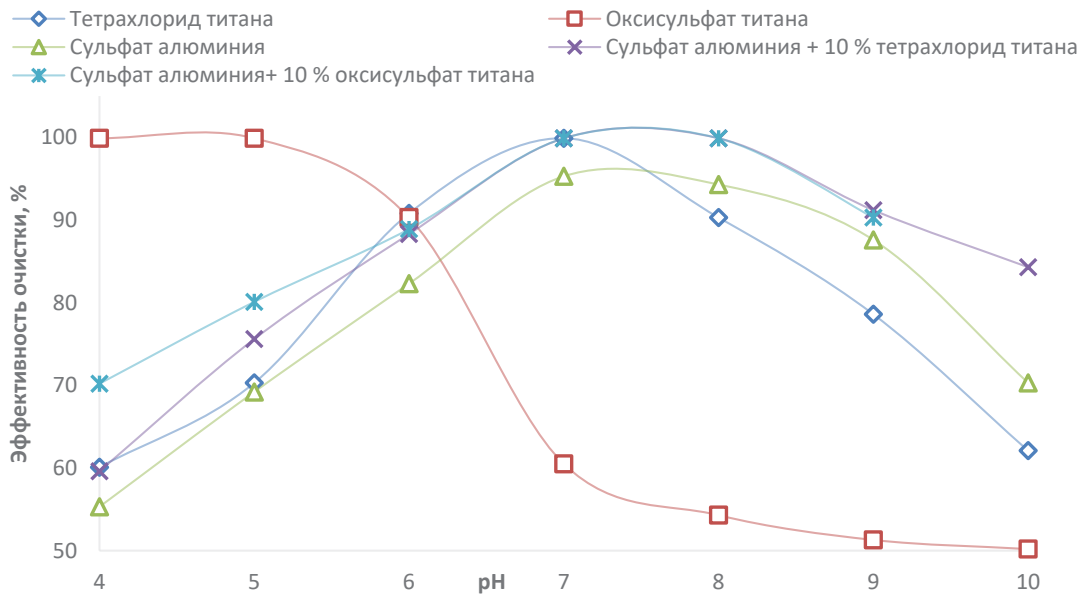


Рис. 2. Влияние pH воды на эффективность удаления фосфат-иона

эффективность очистки. Так, при снижении pH воды до 6,5 эффективность очистки сульфатом алюминия составит 87 %, а остаточная концентрация фосфат-иона составит 0,273 мг/л, а при аналогичных условиях использования титан-содержащего коагулянта (сульфат алюминия + + 10 % оксисульфат/тетрахлорид титана) эффективность очистки составит 94 %, остаточное

содержание фосфат-иона — 0,125 мг/л (норматив ПДК).

Заключительным этапом экспериментов стала оценка эффективности всех используемых реагентов в процессах доочистки реальных сточных вод, прошедших стадию глубокой биологической очистки. Оптимальную дозу реагентов подбирали по максимальному снижению содержания взвешенных веществ на выходе из вторичного

Таблица 2

Остаточные концентрации загрязняющих веществ в очищенной воде

Показатель	Тетрахлорид титана	Оксисульфат титана	Сульфат алюминия	Сульфат алюминия + 10 % тетрахлорид титана	Сульфат алюминия + 10 % оксисульфат титана	ПДК
Доза коагулянта, мг(Me_xO_y)/л	10,0	13,0	34	26,0	30,0	
рН	6,5	6,5	6,7	6,7	6,7	6,5–8,5
БПК ₅ , мг(О)/л	2,0	2,1	2,4	2,2	2,2	2,1
Взв. вещ, мг/л	0,78	0,62	1,15	0,6	0,5	17,75
PO ₄ ³⁻ , мг/л	0,01	0,01	0,1	0,04	0,03	0,2
NO ₃ ⁻ , мг/л	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	9,0
Al, мг/л	0,06	0,05	0,12	0,07	0,06	0,04
Ti, мг/л	0,07	0,05	<0,001	0,04	0,03	0,06
Жиры, мг/л	0,1	0,08	0,2	0,12	0,1	Н/н

отстойника. Данные по остаточным содержаниям загрязняющих веществ в сточной воде представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что применение солей титана в качестве коагулянтов, а также комплексных титансодержащих коагулянтов позволяет максимально удалить из воды соединения фосфора и взвешенные вещества. Кроме того, только применение титансодержащих реагентов позволило достигнуть остаточных концентраций загрязняющих веществ, соответствующих нормативу ПДКр-х.

В процессе наблюдения за формированием и седиментацией коагуляционных шламов было установлено, что осадки, полученные при ис-

пользовании титансодержащих реагентов, существенно отличаются от осадков, полученных с использованием традиционных реагентов. Это явление ранее было отмечено и для других сточных вод, для чего были проведены исследования, позволяющие оценить скорости седиментации и фильтрации осадка в зависимости от используемого реагента. Данные по изменению характеристик процесса отделения осадка представлены на диаграмме (рис. 3).

На диаграмме видно, что добавка соединений титана к традиционному реагенту позволяет не только повысить эффективность очистки (см. табл. 2), но и существенно интенсифицировать процессы удаления осадка (седиментация и филь-

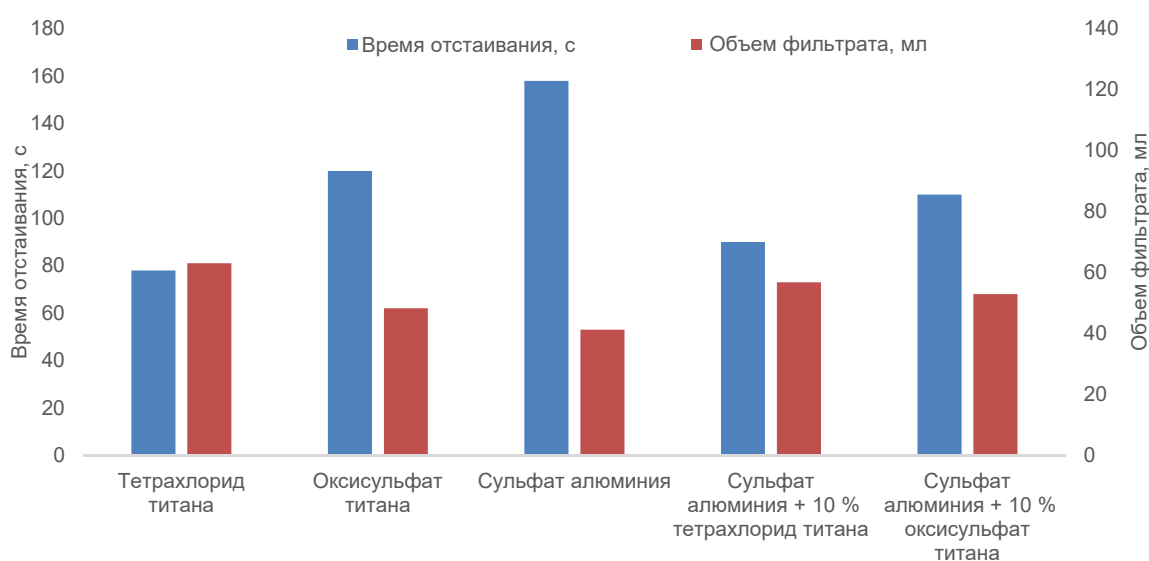


Рис. 3. Динамика удаления осадка при использовании различных коагулянтов

трация). Данное явление обусловлено в первую очередь поликонденсацией соединений титана (что особенно ярко выражено для оксихлорида и тетраоксида титана) [9, 18, 21], а также зародышеобразованием (нейтрализация поверхностного заряда) при использовании комплексного титансодержащего коагулянта [1, 2, 3]. Конечная расчетная стоимость комплексного титансодержащего реагента возрастет не более чем на 10 %.

Заключение

На основании проведенных экспериментов было доказано, что коагулянты на основе соединений титана обладают высокой эффективностью в процессах удаления фосфат-иона из воды. Установлено, что для более кислых сточных вод целесообразно применять оксисульфат титана, в то время как для нейтральных сточных вод более эффективен тетраоксид титана. С учетом высокой стоимости индивидуальных соединений титана были получены образцы комплексных титансодержащих реагентов (сульфат алюминия, модифицированный солями титана в количестве до 10 % масс.), которые показали высокую эффективность. Применение комплексных титансодержащих реагентов позволяет значительно повысить эффективность очистки сульфатом алюминия и расширить диапазон рН, ввиду чего станет возможным достижение нормативов ПДК по фосфат-иону в случае поступления на очистку воды с относительно пониженными значениями рН. Добавка соединений титана позволяет значительно интенсифицировать процессы удаления осадка за счет поликонденсации продуктов гидролиза соединений титана и процессов зародышеобразования. Данное преимущество позволит сократить габариты очистных сооружений, что положительно скажется на капитальных затратах. Расчетное увеличение стоимости комплексных титансодержащих коагулянтов в сравнении с чистым сульфатом алюминия не превысит 10 %, при этом разница в стоимости будет нивелироваться указанными выше преимуществами.

Благодарности

Работа выполнена в рамках программы поддержки молодых ученых-преподавателей РХТУ им. Д. И. Менделеева (заявка 3-2020-013.)

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Кручининой Наталии Евгеньевне!

Литература

1. Бабенков, Е. Д. (1977). Очистка воды коагулянтами. М.: Наука, 356 с.
2. Гетманцев, С. В., Нечаев, И. А. и Гандурина, Л. В. (2008). Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. М.: Издательство АСВ, 271 с.
3. Драгинский, В. Л., Алексеева, Л. П. и Гетманцев, С. В. (2005). Коагуляция в технологии очистки природных вод. М.: Научное издание, 576 с.
4. Кручинина, Н. Е., Кузин, Е. Н. и Азопков, С. В. (2017). Использование коагулянтов на основе хлоридов титана и кремния в процессах очистки фильтрата полигона твердых коммунальных отходов. Химическая промышленность сегодня, № 8, сс. 36–40.
5. Кузин, Е. Н., Аверина, Ю. М., Курбатов, А. Ю. и Сахаров, П. А. (2019). Очистка сточных вод гальванического производства с использованием комплексных коагулянтов-восстановителей. Цветные металлы, № 10, сс. 91–96. DOI: 10.17580/tsm.2019.10.15.
6. Кузин, Е. Н. и Кручинина, Н. Е. (2016). Получение отвержденных форм алюмокремниевых коагулянтов и их использование в процессах водоочистки и водоподготовки. Цветные металлы, № 10, сс. 6–13. DOI: 10.17580/tsm.2016.10.01.
7. Кучумов, В. А. и Шумкин, С. С. (2017). Анализ химического состава исходного сплава при производстве постоянных магнитов из сплавов системы Sm-Co. Научно-технические ведомости СПбГПУ, Т. 23, № 1, сс. 219–225. DOI: 10.18721/JEST.230122.
8. Харьковина, О. В. (2015). Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. Волгоград: Панорама, 433 с.
9. Шабанова, Н. А., Попов, В. В. и Саркисов, П. Д. (2007). Химия и технология нанодисперсных оксидов. М.: ИКЦ «Академкнига», 309 с.
10. Atikah, W. S., Djamaluddin, O. and Manggala, R. (2016). The potential use of titanium tetrachloride (TiCl₄) as an alternative for coagulant in textile wastewater treatment. In: *The 4th International Conference on Sustainable Built Environment "Sustainable Building and Environment for Sophisticated Life"*, Yogyakarta, October 12–14, 2016, pp. 238–243.
11. Galloux, J., Chekli, L., Phuntsho, S., Tijing, L. D., Jeong, S., Zhao, Y. X., Gao, B. Y., Park, S. H. and Shon, H. K. (2015). Coagulation performance and floc characteristics of polytitanium tetrachloride and titanium tetrachloride compared with ferric chloride for coal mining wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, Vol. 152, pp. 94–100. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.08.009.
12. Jeon, K.-J. and Ahn, J.-H. (2018). Evaluation of titanium tetrachloride and polytitanium tetrachloride to remove phosphorus from wastewater. *Separation and Purification Technology*, Vol. 197, pp. 197–201. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.01.016.
13. Jeon, K.-J., Kim, J.-H. and Ahn, J.-H. (2017). Phosphorus removal characteristics of titanium salts compared with aluminum salt. *Water Environment Research*, Vol. 89, No. 8, pp. 739–743. DOI: 10.2175/106143017X14839994522902.
14. Liao, L. and Zhang, P. (2018). Preparation and characterization of polyaluminum titanium silicate and its performance in the treatment of low-turbidity water. *Processes*, Vol. 6, Issue 8, Paper 125. DOI: 10.3390/pr6080125.
15. Mashia, M., Taguchi, Y., Ohizumi, M., Koyanagi, S. and Harigai, T. (1985). Removal of phosphates from wastewater by

titanium (IV) sulfate with precipitation method. *Japan Journal of Water Pollution Research*, Vol. 8, Issue 10, pp. 668–675. DOI: 10.2965/jswel1978.8.668.

16. Pushpalatha, T. N. and Lokeshappa, B. (2015). The use of alum, ferric chloride and titanium tetrachloride as coagulants in treating landfill leachate. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, Vol. 4, Issue 6, pp. 2093–2096.

17. Shon, H. K., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Zareie, M. H., Kim, J. B., Cho, D. L., and Kim, J.-H. (2009). Preparation and characterization of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by TiCl₄ flocculation with FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ and Ca(OH)₂ coagulant aids in wastewater. *Separation Science and Technology*, Vol. 44, Issue 7, pp. 1525–1543. DOI: 10.1080/01496390902775810.

18. Wang, T.-H., Navarrete-López, A. M., Li, S., Dixon, D. A. and Gole, J. L. (2010). Hydrolysis of TiCl₄: Initial steps in the production of TiO₂. *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 114, Issue 28, pp. 7561–7570. DOI: 10.1021/jp102020h.

19. Zhao, Y. X., Gao, B. Y., Shon, H. K., Qi, Q. B., Phuntsho, S., Wang, Y., Yue, Q. Y., Li, Q. and Kim, J.-H. (2013). Characterization of coagulation behavior of titanium tetrachloride coagulant for high and low molecule weight natural organic matter removal: The effect of second dosing. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 228, pp. 516–525. DOI: 10.1016/j.cej.2013.05.042.

20. Zhao, Y. X., Gao, B. Y., Zhang, G. Z., Qi, Q. B., Wang, Y., Phuntsho, S., Kim, J.-H., Shon, H. K., Yue, Q. Y. and Li, Q. (2014). Coagulation and sludge recovery using titanium tetrachloride as coagulant for real water treatment: A comparison against traditional aluminum and iron salts. *Separation and Purification Technology*, Vol. 130, pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.seppur.2014.04.015.

21. Zhao, Y. X., Phuntsho, S., Gao, B., Huang, X., Qi, Q. B., Yue, Q. Y., Wang, Y., Kim, J.-H. and Shon, H. K. (2013). Preparation and characterization of novel polytitanium tetrachloride coagulant for water purification. *Environmental Science & Technology*, Vol. 47, Issue 22, pp. 12966–12975. DOI: 10.1021/es402708v.

22. Zhao, Y., Phuntsho, S., Gao, B. and Shon, H. (2017). Polytitanium sulfate (PTS): Coagulation application and Ti species detection. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 52, pp. 250–258. DOI: 10.1016/j.jes.2016.04.008.

References

1. Babenkov, Ye. D. (1977). *Water treatment with coagulants*. Moscow: Nauka, 356 p.

2. Getmantsev, S. V., Nechayev, I. A. and Gandurina, L. V. (2008). *Industrial wastewater treatment with coagulants and flocculants*. Moscow: ASV Publishing House, 271 p.

3. Draginsky, V. L., Alekseyeva, L. P. and Getmantsev, S. V. (2005). *Coagulation in natural water purification technology*. Moscow: Nauchnoye Izdaniye, 576 p.

4. Krutchinina, N. E., Kuzin, E. N. and Azopkov, S. V. (2017). The use of coagulants based on titanium and silicon chlorides in the purification of the filtrate of the solid municipal waste landfill. *Chemical Industry Today*, No. 8, pp. 36–40.

5. Kuzin, E. N., Averina, Yu. M., Kurbatov, A. Yu. and Sakharov, P. A. (2019). Wastewater treatment in the electroplating industry using composite coagulants-reducers. *Tsvetnye Metally*, No. 10, pp. 91–96. DOI: 10.17580/tsm.2019.10.15.

6. Kuzin, E. N. and Kruchinina, N. E. (2016). Obtaining of hardened forms of aluminium-silicate coagulants and their

use in water-purification and water treatment. *Tsvetnye Metally*, No. 10, pp. 6–13. DOI: 10.17580/tsm.2016.10.01.

7. Kuchumov, V. A. and Shoomkin, S. S. (2017). Analysis of the chemical composition of the bearing alloy used in the production of Sm-Co-based permanent magnets. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 219–225. DOI: 10.18721/JEST.230122.

8. Kharkina, O. V. (2015). *Effective operation and analysis of biological wastewater treatment plants*. Volgograd: Panorama, 433 p.

9. Shabanova, N. A., Popov, V. V. and Sarkisov, P. D. (2007). *Chemistry and technology of nanodispersed oxides*. Moscow: Akademkniga Publishing and Bookselling Center, 309 p.

10. Atikah, W. S., Djamaluddin, O. and Manggala, R. (2016). The potential use of titanium tetrachloride (TiCl₄) as an alternative for coagulant in textile wastewater treatment. In: *The 4th International Conference on Sustainable Built Environment “Sustainable Building and Environment for Sophisticated Life”*, Yogyakarta, October 12–14, 2016, pp. 238–243.

11. Galloux, J., Chekli, L., Phuntsho, S., Tijing, L. D., Jeong, S., Zhao, Y. X., Gao, B. Y., Park, S. H. and Shon, H. K. (2015). Coagulation performance and floc characteristics of polytitanium tetrachloride and titanium tetrachloride compared with ferric chloride for coal mining wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, Vol. 152, pp. 94–100. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.08.009.

12. Jeon, K.-J. and Ahn, J.-H. (2018). Evaluation of titanium tetrachloride and polytitanium tetrachloride to remove phosphorus from wastewater. *Separation and Purification Technology*, Vol. 197, pp. 197–201. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.01.016.

13. Jeon, K.-J., Kim, J.-H. and Ahn, J.-H. (2017). Phosphorus removal characteristics of titanium salts compared with aluminum salt. *Water Environment Research*, Vol. 89, No. 8, pp. 739–743. DOI: 10.2175/106143017X14839994522902.

14. Liao, L. and Zhang, P. (2018). Preparation and characterization of polyaluminum titanium silicate and its performance in the treatment of low-turbidity water. *Processes*, Vol. 6, Issue 8, Paper 125. DOI: 10.3390/pr6080125.

15. Mashia, M., Taguchi, Y., Ohizumi, M., Koyanagi, S. and Harigai, T. (1985). Removal of phosphates from wastewater by titanium (IV) sulfate with precipitation method. *Japan Journal of Water Pollution Research*, Vol. 8, Issue 10, pp. 668–675. DOI: 10.2965/jswel1978.8.668.

16. Pushpalatha, T. N. and Lokeshappa, B. (2015). The use of alum, ferric chloride and titanium tetrachloride as coagulants in treating landfill leachate. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, Vol. 4, Issue 6, pp. 2093–2096.

17. Shon, H. K., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Zareie, M. H., Kim, J. B., Cho, D. L., and Kim, J.-H. (2009). Preparation and characterization of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by TiCl₄ flocculation with FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ and Ca(OH)₂ coagulant aids in wastewater. *Separation Science and Technology*, Vol. 44, Issue 7, pp. 1525–1543. DOI: 10.1080/01496390902775810.

18. Wang, T.-H., Navarrete-López, A. M., Li, S., Dixon, D. A. and Gole, J. L. (2010). Hydrolysis of TiCl₄: Initial steps in the production of TiO₂. *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 114, Issue 28, pp. 7561–7570. DOI: 10.1021/jp102020h.

19. Zhao, Y. X., Gao, B. Y., Shon, H. K., Qi, Q. B., Phuntsho, S., Wang, Y., Yue, Q. Y., Li, Q. and Kim, J.-H. (2013). Characterization of coagulation behavior of titanium

tetrachloride coagulant for high and low molecule weight natural organic matter removal: The effect of second dosing. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 228, pp. 516–525. DOI: 10.1016/j.cej.2013.05.042.

20. Zhao, Y. X., Gao, B. Y., Zhang, G. Z., Qi, Q. B., Wang, Y., Phuntsho, S., Kim, J.-H., Shon, H. K., Yue, Q. Y. and Li, Q. (2014). Coagulation and sludge recovery using titanium tetrachloride as coagulant for real water treatment: A comparison against traditional aluminum and iron salts. *Separation and Purification Technology*, Vol. 130, pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.seppur.2014.04.015.

21. Zhao, Y. X., Phuntsho, S., Gao, B., Huang, X., Qi, Q. B., Yue, Q. Y., Wang, Y., Kim, J.-H. and Shon, H. K. (2013). Preparation and characterization of novel polytitanium tetrachloride coagulant for water purification. *Environmental Science & Technology*, Vol. 47, Issue 22, pp. 12966–12975. DOI: 10.1021/es402708v.

22. Zhao, Y., Phuntsho, S., Gao, B. and Shon, H. (2017). Polytitanium sulfate (PTS): Coagulation application and Ti species detection. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 52, pp. 250–258. DOI: 10.1016/j.jes.2016.04.008.

Автор

Кузин Евгений Николаевич, канд. техн. наук
Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия
E-mail: E.n.kuzin@mail.ru

Author

Kuzin Evgenii Nikolaevich, PhD in Engineering
D. Mendeleev University of Chemical Technology
of Russia, Moscow, Russia
E-mail: E.n.kuzin@mail.ru