

УДК 628.31

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

Шифр специальности ВАК: 2.6.7

Получение комплексных титансодержащих коагулянтов из крупнотоннажных минеральных концентратов и их использование при очистке сточных вод

Е.Н. Кузин[✉], А.Б. Фадеев

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, г. Москва

[✉]Kuzin.e.n@muctr.ru

Аннотация. Актуальность. Разработка новых, высокоэффективных реагентов для очистки сточных вод различного происхождения – сложная и крайне важная задача. Не менее актуальным остается вопрос проектирования технологий переработки крупнотоннажных минеральных продуктов, получивших статус «отходы» и не имеющих в настоящее время экономически и экологически обоснованных и рациональных способов утилизации. Разработка технологии получения реагентов с использованием в качестве сырья промышленных отходов будет не только иметь экономический эффект, но и позволит существенно минимизировать уровень негативного воздействия на окружающую среду и сделать шаг к реализации концепции Zero Waste. **Цель:** разработка технологии переработки крупнотоннажного титансодержащего сырья для получения комплексных титансодержащих реагентов и исследование их эффективности в процессах очистки сточных вод различных производств. **Методы.** Для исследования фазового состава образцов применяли метод рентгеновской дифракции, а определение содержания металлов в кислых растворах и сточных водах проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии. **Результаты и выводы.** Предложена технология получения комплексных титансодержащих коагулянтов, включающая гидрометаллургическую технологию сернокислотной переработки крупнотоннажного минерального сырья титанита. В полученные растворы для корректировки химического состава и нейтрализации свободной серной кислоты вводили гидроксид алюминия. Образующийся сульфат алюминия переходит в наиболее стабильную форму 18-водного кристаллогидрата и поглощает влагу из раствора, тем самым реализуя процесс химической дегидратации. Исследование состава твердых образцов коагулянтов показало, что преобладающей фазой в составе комплексного коагулянта является сульфат алюминия, а содержание соединений титана колеблется в диапазоне 1–14 % мас. Установлено, что при варьировании соотношения минерального сырья и серной кислоты можно направленно менять количество модифицирующей добавки соединений титана в составе комплексного реагента. Доказано, что применение комплексных титансодержащих реагентов в процессах очистки сточных вод позволяет на 25–35 % снизить расход коагулянтов, повысить эффективность очистки воды, минимизировать остаточные концентрации загрязняющих веществ, а также существенно повысить скорость седиментации коагуляционных шламов в сравнении с традиционным сульфатом алюминия.

Ключевые слова: химическая дегидратация, комплексные титансодержащие коагулянты, сточные воды, титанит, минеральное сырье, седиментация, выщелачивание

Благодарности: Авторы выражают благодарность научному консультанту, доктору технических наук, профессору Наталии Евгеньевне Кручининой.

Для цитирования: Кузин Е.Н., Фадеев А.Б. Получение комплексных титансодержащих коагулянтов из крупнотоннажных минеральных концентратов и их использование при очистке сточных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 34–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

UDC 628.31

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

Preparation of complex titanium-containing coagulants from large-scale mineral concentrates and their use in wastewater treatment

E.N. Kuzin[✉], A.B. Fadeev

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

[✉]Kuzin.e.n@muctr.ru

Abstract. Relevance. Development of new, highly effective reagents for treatment of wastewater of various origins is a complex and extremely important task. An equally pressing issue remains the development of technologies for processing large-scale mineral products, which currently have not found an economically feasible technology for their processing and have received the status of “waste”. The development of a technology for producing reagents using waste as a raw material will not only have an economic effect but will also significantly minimize the level of negative impact on the environment and take a step towards the implementation of the Zero Waste concept. **Aim.** Development of technology for processing large-scale titanium-containing raw materials to obtain complex titanium-containing reagents and study of their effectiveness in wastewater treatment from various industries. **Methods.** To study the phase composition of the samples, the X-ray diffraction method was used, and the determination of metal content in acidic solutions and wastewater was carried out by atomic emission spectroscopy. **Results and conclusions.** The authors have proposed the technology for production of complex titanium-containing coagulants, which includes hydrometallurgical technology for sulfuric acid processing of large-capacity mineral raw materials – titanite. Aluminum hydroxide was introduced into the resulting solutions to adjust the chemical composition and neutralize free sulfuric acid. The resulting aluminum sulfate transforms into the most stable form of 18-aqueous crystalline hydrate, absorbing moisture from the solution, realizing chemical dehydration. The study of the composition of solid samples of coagulants showed that the predominant phase in the composition of the complex coagulant is aluminum sulfate, and the content of titanium compounds ranges from 1 to 14 wt %. It was established that by varying the ratio of mineral raw materials:sulfuric acid it is possible to vary the amount of modifying additive titanium compounds in the complex reagent. It was proven that the use of complex titanium-containing coagulants in wastewater treatment allows reducing the consumption of coagulants by 25–35%, increasing the efficiency of water purification, minimizing residual concentrations of pollutants, and also significantly increasing the rate of sedimentation of coagulation sludge in comparison with traditional sulfate aluminum.

Keywords: chemical dehydration, complex titanium-containing coagulants, wastewater, titanite, mineral raw materials, sedimentation, leaching

Acknowledgments: The authors express gratitude to the scientific consultant, Dr. Sc., Professor Nataliya E. Kruchinina.

For citation: Kuzin E.N., Fadeev A.B. Preparation of complex titanium-containing coagulants from large-scale mineral concentrates and their use in wastewater treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 34–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

Введение

Рост промышленного производства ведет к неизбежному увеличению уровня негативного воздействия на окружающую природную среду. Наибольшему влиянию, несомненно, подвергается гидросфера. Огромные объемы пресной воды, изымаемой из поверхностного и подземного источника, а также сброс недостаточно очищенных сточных вод различных отраслей промышленности приводит к существенному снижению качества воды в поверхностных и подземных источниках.

Еще одним негативным последствием развития промышленности является увеличение объемов

накопления относительно не востребуемых крупнотоннажных минеральных концентратов, не нашедших в настоящее время широкого практического применения и имеющих статус «отходы» [1, 2]. Наиболее яркими примерами подобных «отходов» являются нефелиновый, сфеновый (титанитовый) и кварц-лейкоксеновые концентраты, ежегодные объемы образования и размещения на шлаковалы которых исчисляются миллионами тонн.

Подобные объекты хранения отходов не только отчуждают значительные территории, но и оказывают серьезное негативное воздействие на окружающую среду. В отдельных случаях подобные объекты накопления отходов могут стать эпицент-

трами техногенных, экологических катастроф. В 2010 г. в Венгрии прорыв шламохранилища привел к загрязнению огромных площадей и уничтожению нескольких деревень [3].

Наиболее эффективным методом очистки сточных вод различного происхождения является коагуляция, или ее частный случай – флокуляция. Данный метод достаточно давно используется как на станциях водоподготовки речной воды, так и на локальных очистных сооружениях различных промышленных производств. Традиционно в качестве реагентов-коагулянтов используют соли алюминия или железа. Данные реагенты хорошо зарекомендовали себя, однако уже давно морально устарели и недостаточно успешно справляются с поставленными перед ними задачами. Помимо этого, соединения алюминия работают в узком диапазоне pH, малоэффективны в холодной воде и имеют жесткий остаточный норматив ПДК. Соединения железа, в свою очередь, могут образовывать устойчивые комплексы с органическими лигандами, а также обладают ярко выраженными коррозионными и абразивными свойствами [4, 5].

В последнее время все чаще исследователями отмечается перспективность применения комплексных или бинарных реагентов. Смеси солей алюминия и железа, а также алюмокремниевый флокулянт-коагулянт являются эффективными аналогами традиционных реагентов. К сожалению, ряд технологических особенностей (низкий pH, гелирование и пр.) не позволяют применять данные реагенты повсеместно [5, 6].

Сегодня значительное количество зарубежных коллективов называют титансодержащие коагулянты новым поколением коагулянтов, способных выполнять недостижимые для традиционных реагентов задачи. К сожалению, данные реагенты дорогие, что существенно замедляет их повсеместное внедрение [7–13].

Выходом из сложившейся ситуации может стать использование комплексных титансодержащих коагулянтов, получаемых модификацией традиционных алюмо- или железосодержащих коагулянтов соединениями титана в количестве 2,5–10,0 % мас. [14]. Комплексные реагенты показали высокую эффективность в процессах очистки сточных вод различных производств [15–17], однако до сих пор не существует технологии их производства, и локальные потребители просто смешивают соли алюминия и титана, что негативно сказывается на стоимости процесса очистки.

Целью данного исследования является разработка технологии переработки получения комплексных титансодержащих реагентов из крупнотоннажного титансодержащего сырья и изучение

эффективности полученного реагента при очистке сточных вод различных производств.

Объекты и методы исследования

В качестве основного объекта исследования выбран титанитовый (сфеновый) концентрат – побочный продукт добычи апатита на Кольском полуострове. Несмотря на значительные успехи в направлении переработки титанита в пигментный диоксид титана, дубители и сорбенты, объемы его образования существенно превышают производственные мощности, а значит, вопрос поиска новых направлений его применения остается актуальным [18–21].

Сульфатизацию сырья проводили 50–80%-ми растворами серной кислоты при температуре кипения раствора (1). Непрореагировавшую руду удаляли отстаиванием, а свободную серную кислоту нейтрализовали гидроксидом алюминия.



Элементный состав твердых образцов исследовали на рентгенофлуоресцентном электронном микроскопе JEOL1610LV с энергодисперсионной приставкой SSD X-MaxIncaEnergy (JEOL, Япония; Oxford Instruments, Великобритания).

Исследование фазового состава твердых образцов проводили на приборе рентгенофазового анализа ДРОН 3 Н (Россия).

Содержание металлов в кислых растворах и сточных водах определяли при помощи атомно-эмиссионного спектрометра с магнитной плазмой «Спектроскай» (г. Королев, Россия) [22].

Содержание взвешенных веществ в воде определяли гравиметрическим методом в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.4.254-09, а также при помощи турбидиметра-мутномера HANNA HI 98703 (Italia).

Пробную коагуляцию (Jar-Test) проводили на лабораторном флокуляторе JLT 4 Velp Scientifica (Italia). Время смешения фаз коагулянта исходной воды – 2 минуты, хлопьеобразования – 8 минут, седиментации – 30 минут.

Скорость седиментации коагуляционных шламов определяли путем измерения время стабилизации оптической плотности обработанной коагулянтами сточной воды.

В качестве образца сравнения использовали сульфат алюминия производства Kemira (Финляндия).

В качестве тест-объектов сточной воды были выбраны:

- сточные воды установки газоочистки обогатительного участка;
- сточные воды участка отмывки и нейтрализации фосфогипса;
- атмосферные стоки с промышленной площадки предприятия.

Результаты исследования и их обсуждение

Добываемый титанит и получаемый из него титанитовый (сфеновый) концентрат, как было отмечено ранее, в настоящее время не перерабатывается в промышленных масштабах и приобретает статус «отхода». Обычно в составе направляемого на длительное хранение титаните содержится 95–97 % основного вещества (титанита) и до 3–5 % примесей нефелина, апатита, кварца, оксидов алюминия, железа, кальция, натрия и пр. Данные по элементному составу образца, использованного в экспериментах, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав титанита, мас. %

Table 1. Titanite elemental composition, wt %

| Элемент/Element | O | Ca | Si | Ti | Fe | Al | Mg, Na, K, Y, Sc etc. |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|
| Содержание/Content | 40,1 | 20,8 | 14,3 | 24,1 | 0,22 | 0,11 | 0,37 |

Образец титанитового (сфенового) концентрата обрабатывали растворами серной кислоты различной концентрации. Данные по эффективности извлечения титановой фазы представлены на графике (рис. 1).

Из данных графика (рис. 1) видно, что наибольшая степень извлечения титана наблюдается при концентрации серной кислоты 60–70 % мас. и времени процесса 210 и 150 минут соответственно. Важно отметить, что переход в раствор ионов кальция в процессе сульфатизации сырья сопровождался образованием сульфата (гипса), который выпадал в виде нерастворимого осадка.

Образующийся осадок после нейтрализации свободной (непрореагировавшей) серной кислоты и отмывки водорастворимых компонентов представлял собой смесь дигидрата сульфата кальция, диоксида кремния и примесей оксидов железа и алюминия в процентном соотношении 72/27/1 %. Согласно данным элементного и фазового анализа и с учетом тестов на фитотоксичность данный осадок относится к 5 классу опасности и может быть использован в качестве компонента строительных смесей.

Снижение эффективности извлечения соединений титана при концентрации кислоты 80 % и более можно объяснить процессами термогидролиза высоко концентрированных растворов оксисульфата титана и выпадением гидроксида титана в осадок вместе с частицами гипса и непрореагировавшей руды. Пониженная эффективность извлечений титана 50 %-ной серной кислотой обусловлено наличием в составе минерала химически неактивных соединений титана, приоритетно в форме диоксида титана рутильной модификации.

При варьировании соотношения титанита и кислоты можно контролировать количество свободной серной кислоты, а значит, и количество образующегося по реакции (2) сульфата алюминия. Данный технологический ход позволит регулировать процентное содержание модифицирующей добавки соединений титана в составе комплексного коагулянта. Согласно данным различных источников, содержание добавки должно находиться в диапазоне 2,5–20 % мас.

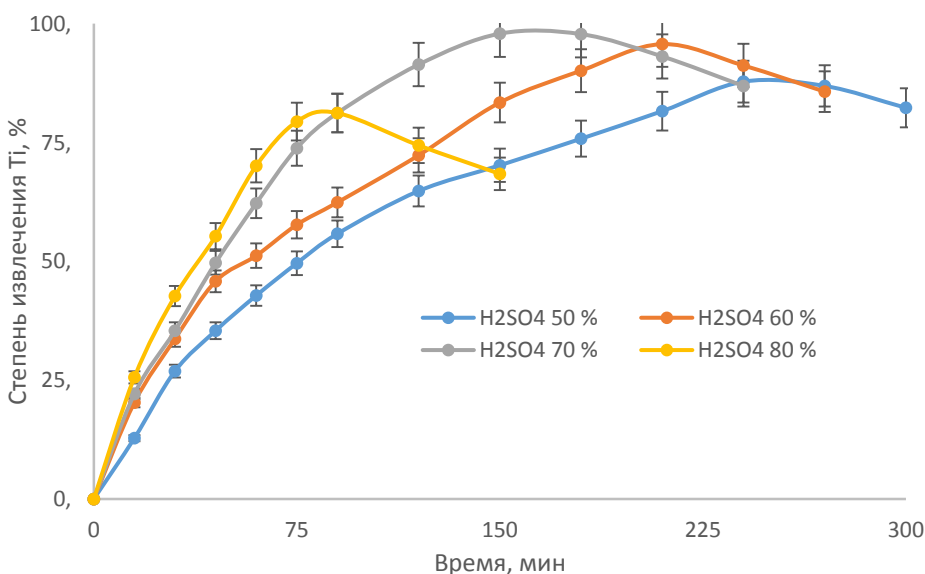
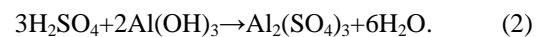


Рис. 1. Степень извлечения Ti при сульфатизации титанита 50–80%-й H₂SO₄

Fig. 1. Degree of Ti extraction during titanite sulfatization with 50–80% H₂SO₄

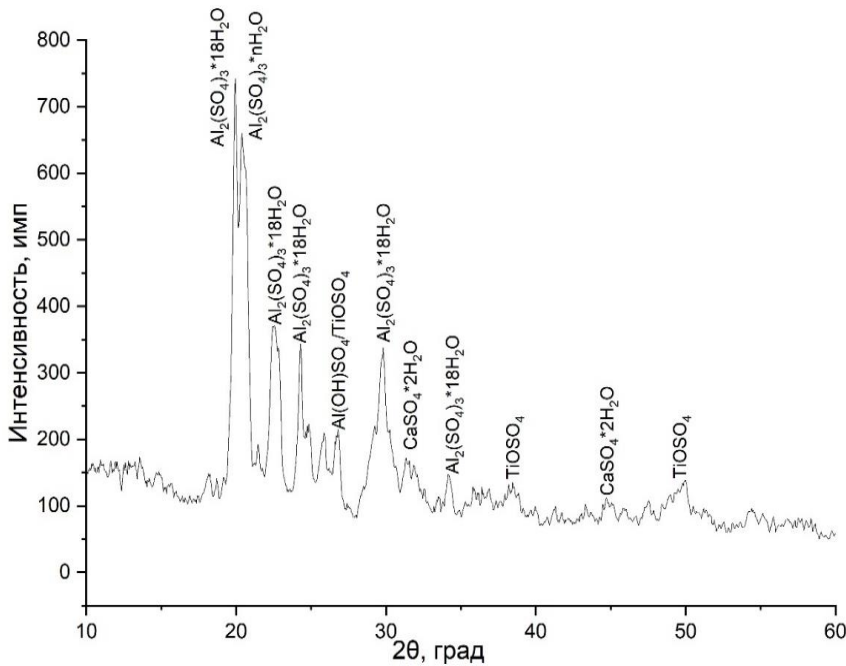


Рис. 2. Дифрактограмма образца комплексного титансодержащего коагулянта
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of a complex titanium-containing coagulant sample

Принимая во внимание тот факт, что наиболее стабильная форма сульфата алюминия – 18-водный кристаллогидрат, образовавшийся ангидрид сульфата алюминия будет поглощать необходимую влагу из раствора. Так, количество поглощаемой из раствора влаги колеблется от 0,8 до 1,5 граммов на 1 грамм образующегося ангидрида сульфата алюминия.

Фазовый состав коагулянта, полученного методом химической дегидратации, представлен на рис. 2.

На основании данных дифрактограммы (рис. 2) можно сделать вывод, что преобладающей фазой в составе комплексного титансодержащего коагулянта является сульфат алюминия в форме 14–18-водного кристаллогидрата. Соединения титана присутствуют в форме оксисульфата титана, а значит, растворимы в воде и способны к реакциям гидролиза и коагуляции. Данные по влиянию исходного соотношения титаниста и серной кислоты на содержание активной добавки оксисульфата титана в составе комплексного коагулянта представлены в табл. 2.

Исходя из анализа данных табл. 2 было выяснено, что варьирование соотношения Т:Ж позволяет получать образцы комплексных коагулянтов с оптимальным содержанием добавки соединений титана. В качестве оптимального соотношения Т:Ж было выбрано 1:4, а полученный продукт содержал 5 % водорастворимого оксисульфата титана.

Заключительным этапом экспериментов стала оценка коагуляционной эффективности полученного образца комплексного титансодержащего реа-

гента (КТК) в процессах очистки сточных вод. Данные по остаточным концентрациям взвешенных веществ в сточной воде до и после очистки представлены табл. 3.

Таблица 2. Фазовый состав образцов комплексных титансодержащих коагулянтов при различных значениях Т:Ж

Table 2. Phase composition of samples of complex titanium-containing coagulants at different S:V values

| Титанит: H ₂ SO ₄ Titanite: Sulfur acid | Состав комплексного коагулянта Complex coagulant composition, % | | |
|--|---|--|----------------------|
| | Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O | TiOSO ₄ (TiO ₂) | CaO/SiO ₂ |
| 1:3 | 83,2 | 13,9 (6,95) | 2,9 |
| 1:4 | 88,3 | 9,7 (4,85) | 2,0 |
| 1:5 | 90,9 | 7,5 (3,75) | 1,6 |
| 1:6 | 92,6 | 6,1 (3,05) | 1,3 |
| 1:7 | 93,8 | 5,1 (2,55) | 1,1 |
| 1:8 | 94,7 | 4,4 (2,2) | 0,9 |
| 1:9 | 95,3 | 3,9 (1,95) | 0,8 |
| 1:10 | 95,8 | 3,5 (1,75) | 0,7 |
| 1:11 | 96,2 | 3,1 (1,55) | 0,7 |

Приведенные данные (табл. 3) демонстрируют, что применение комплексного коагулянта позволяет не только сократить его расход на 25–35 %, но и добиться минимальных остаточных концентраций взвешенных веществ в очищенной воде. Для всех исследуемых систем комплексный титансодержащий реагент показал высокую эффективность и превзошел традиционный реагент – сульфат алюминия.

Таблица 3. Концентрации взвешенных веществ до и после очистки воды

Table 3. Concentrations of pollutants before and after water treatment

| Реагент Reagent | Доза коагулянта, мг(МехОу)/дм ³ Coagulant dose, mg(МехОу)/dm ³ | | | | | | | Время седиментации шлама, сек Sedimentation time, sec |
|--|---|------|------|------|-----|------|------|--|
| | Исходная вода Wastewater | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | |
| Сточная вода с установок газоочистки обогатительного участка Wastewater from gas purification units of the enrichment area | | | | | | | | |
| КТК Complex coagulant | 1890 | 1170 | 360 | 42 | 5,6 | 5,5 | 5,5 | 360 |
| Сульфат алюминия Aluminum sulfate | 1890 | 1480 | 950 | 420 | 116 | 59 | 23 | 540 |
| Атмосферные стоки с промышленной площадки предприятия Atmospheric effluents from the industrial site of the enterprise | | | | | | | | |
| КТК Complex coagulant | 148 | 34 | 5,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 120 |
| Сульфат алюминия Aluminum sulfate | 148 | 69 | 37,5 | 14,8 | 6,1 | 5,8 | 5,7 | 180 |
| Сточные воды с участка отмывки и нейтрализации фосфогипса Wastewater from the phosphogypsum washing and neutralization area | | | | | | | | |
| КТК Complex coagulant | 1360 | 980 | 684 | 326 | 54 | 10,2 | 10,1 | 600 |
| Сульфат алюминия Aluminum sulfate | 1360 | 1140 | 759 | 387 | 145 | 52 | 29,6 | 780 |

Помимо снижения содержания взвешенных веществ в процессе очистки сточной воды участка нейтрализации и отмывки фосфогипса, было зафиксировано значительное снижение концентрации фосфат-аниона, при этом комплексный реагент был в среднем на 10–15 % эффективнее сульфата алюминия [9].

Важно отметить, что применение комплексного титаносодержащего реагента также позволило существенно сократить время седиментации коагуляционных шламов (20–30%-е ускорение седиментации), что в свою очередь обеспечит увеличение эффективности очистного оборудования и сокращение его габаритов.

Повышенную эффективность комплексных титаносодержащих коагулянтов можно объяснить протекающими процессами поликонденсации (полимеризации) продуктов гидролиза соединений титана, оказывающими флокулирующее действие. Не менее весомый вклад вносит процесс нейтрализации положительно заряженных частиц гидроксида алюминия отрицательно заряженными соединениями титана (зародышеобразование), что приводит к потере агрегативной и седиментативной устойчивости дисперсной системы, образованию первичных мицелл и интенсивной коагуляции [23, 24]. Также необходимо отметить, что соединения титана способны к адсорбции загрязняющих веществ на своей поверхности [24].

Очищенная вода может быть использована для обеспечения оборотного водоснабжения предприятия, что будет иметь выраженный экономический эффект [25]. Образующийся коагуляционный шлам, с учетом типа удаляемых загрязняющих веществ (нерастворимые малоопасные оксиды крем-

ния, алюминия, железа или кальция), может быть эффективно переработан с получением чистых соединений диоксида титана или вовлечен в промышленное применение в качестве компонента строительных смесей [14, 24]. Вопрос промышленного применения коагуляционных шламов в строительной промышленности будет актуальным при очистке больших объемов сточных вод, загрязненных преимущественно диоксидом кремния (цементная, строительная промышленность, водоподготовка речной воды и пр.).

Заключение

На основании экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Переработка титанитового (сфенового) концентрата гидрометаллургическим способом позволяет получать сернокислые титаносодержащие растворы, которые могут быть использованы в качестве прекурсора для синтеза комплексных титаносодержащих коагулянтов. Установлено, что степень извлечения соединений титана достигает 90–95 % при сульфатизации титанита 60–70 % серной кислотой.
2. Доказано, что введение в сернокислые растворы гидроксида алюминия позволяет получать ангидрид сульфата алюминия, который поглощает влагу из раствора для образования наиболее стабильной формы 18-водного кристаллогидрата. Предложенный процесс химической дегидратации позволяет получать твердый продукт, исключая процесс сушки, что позволит снизить себестоимость получаемого комплексного титаносодержащего коагулянта

3. Установлено, что основной фазой в составе комплексного титансодержащего коагулянта являются кристаллогидраты сульфата алюминия, а модифицирующая добавка соединений титана находится в форме оксисульфата титана.
4. Установлено, что, варьируя соотношение титаниа и серной кислоты на стадии вскрытия сырья, возможно получение образцов комплексных титансодержащих коагулянтов с различным содержанием модифицирующей добавки соединений титана (1–14 мас. %). Оптимальным соотношением Т:Ж было выбрано 1:4, при этом содержание модифицирующей добавки соединений титана составило около 5 мас. %.
5. Подтверждена повышенная эффективность комплексного титансодержащего реагента в процессах очистки сточных вод от взвешенных веществ. Применение инновационного реагента в сравнении с традиционным сульфатом алюминия позволяет на 25–35 % снизить расход коагулянтов, повысить эффективность очистки воды, минимизировать остаточные концентрации загрязняющих веществ, а также увеличить скорость седиментации коагуляционных шламов. Полученный осадок может быть использован в качестве компонента строительных смесей или переработан в титансодержащее сырье.
6. Разработка технологии вовлечения техногенного сырья в процессы получения новых, высокоэффективных реагентов для процессов инженерной защиты окружающей среды позволит не только снизить уровень негативного воздействия на окружающую среду, но и сделать шаг к реализации концепции Zero Waste в рамках экономики замкнутого цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Towards a green industry through cleaner production development / V.H. de Mello Santos, T.L.R. Campos, M. Espuny, O.J. de Oliveira // *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*. – 2022. – Vol. 29. – P. 349–370.
2. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices // *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* – 2018. – Vol. 118. – № 8. – P. 825–844.
3. Radiological aspects of red mud disaster in Hungary / T. Kovács, Z. Sas, V. Jobbágy, A. Csordás, G. Szeiler, J. Somlai // *Acta Geophysica*. – 2013. – Vol. 61 (4). – P. 1026–1037.
4. Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурина Л.В. Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. – М.: «АСВ», 2008. – 271 с.
5. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. – М.: Науч. изд., 2005. – 576 с.
6. Оптимизация процесса получения отвержденных форм алюмокремниевого флокулянта-коагулянта для применения в очистке сточных вод / М.Г. Гордиенко, Н.Е. Кручинина, Е.Н. Кузин, А.А. Войновский // *Безопасность в техносфере*. – 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 21–25.
7. Gan Y., Zhang L., Zhang S. The suitability of titanium salts in coagulation removal of micropollutants and in alleviation of membrane fouling // *Water Research*. – 2021. – Vol. 205. – № 117692.
8. Coagulation performance of titanium tetrachloride for Alor Pongsu wastewater treatment / T.Y. Wern, R. Ardani, S.F. Ramil et al. // *AIP Conf Proceeding*. – 2020. – Vol. 2267. – № 020073.
9. Jeon K.J., Kim J.H., Ahn J.H. Phosphorus removal characteristics of titanium salts compared with aluminum salt // *Water environment research*. – 2017. – Vol. 89. – № 8. – P. 739–743.
10. Enhanced algae removal by Ti-based coagulant: comparison with conventional Al- and Fe-based coagulants / J. Xu, Y. Zhao, B. Gao, Q. Zhao // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – Vol. 25. – № 13. – P. 13147–13158.
11. Surface water treatment benefits from the presence of algae: influence of algae on the coagulation behavior of polytitanium chloride / Y. Zhao, H. Lian, C. Tian et al. // *Front. Environ. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 15. – № 58. – P. 1–13
12. Potential of titanium coagulants for water and wastewater treatment: current status and future perspectives. / Y. Gan, J. Li, Z. Li et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – № 126837. – P. 1–17
13. Thomas M., Bağ J., Królikowska J. Efficiency of titanium salts as alternative coagulants in water and wastewater treatment: Short review // *Desalination and Water Treatment*. – 2020. – Vol. 208. – P. 261–272.
14. 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 / H. Shon, S. Vigneswaran, J. Kandasamy et al. // *Sep. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. 44. – P. 1525–1543.
15. Кузин Е.Н. Титансодержащие коагулянты в процессах очистки хозяйственно-бытовых сточных вод // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2020. – № 4 (84). – С. 16–23.
16. Izmailova N.L., Lorentson A.V., Chernoberezhskii Y.N. Composite coagulant based on titanyl sulfate and aluminum sulfate // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2015. – Vol. 88. – P. 458–462.
17. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry / E. Kuzin, Y. Averina, A. Kurbatov, N. Kruchinina, V. Boldyrev // *Processes*. – 2022. – Vol. 10. – № 440. – P. 1–10.
18. Получение титаносиликатного ионообменника, технические свойства, сорбция двухзарядных катионов / Л.Г. Герасимова, Е.С. Щукина, М.В. Маслова, В.В. Семущин // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2021. – Т. 64. – № 8. – С. 115–122.
19. Gerasimova L.G., Maslova M.V., Shchukina E.S. Synthesis of sorption materials from low grade titanium raw materials // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – № 5. – P. 1–21.

20. Gerasimova L.G., Shchukina E.S., Kiselev Yu.G. Preparation of functional materials from raw materials with a low amount of titanium // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 56. – № 5. – P. 908–914.
21. The effect of heavy metal ions hydration on their sorption by a mesoporous titanium phosphate ion-exchanger / M. Maslova, V. Ivanenko, N. Yanicheva, L. Gerasimova // *Journal of Water Process Engineering*. – 2020. – Vol. 35. – P. 101233.
22. Кузин Е.Н. Применение метода атомно-эмиссионной спектроскопии с СВЧ (магнитной) плазмой в процессах идентификации химического состава отходов сталеплавильного производства // *Черные металлы*. – 2022. – № 10. – С. 79–82.
23. Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 309 с.
24. Shon H., Vigneswaran S., Kim I.S. Preparation of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by titanium tetrachloride (TiCl₄) flocculation of wastewater // *Environ. Sci. Technol.* – 2007. – Vol. 41. – P. 1372–1377.
25. Development and design of a closed water use cycle / J.M. Averina, G.E. Kaliakina, D.Y. Zhukov, A.Y. Kurbatov, V.S. Shumova // 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019). – Varna, Bulgaria, 2019. – Vol. 19. – № 3.1. – P. 145–152.

Информация об авторах

Евгений Николаевич Кузин, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1. kuzin.e.n@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>

Андрей Борисович Фадеев, аспирант кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1. fadeev89@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8188-5079>

Поступила в редакцию: 28.02.2024

Поступила после рецензирования: 07.03.2024

Принята к публикации: 14.03.2024

REFERENCES

1. De Mello Santos V.H., Campos T.L.R., Espuny M., De Oliveira O.J. Towards a green industry through cleaner production development. *Environmental science and pollution research international*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 349–370.
2. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, vol. 118, no. 8, pp. 825–844.
3. Kovács T., Sas Z., Jobbágy V. Radiological aspects of red mud disaster in Hungary. *Acta Geophysica*, 2013, vol. 61, pp. 1026–1037.
4. Draginsky V.L., Alekseeva L.P., Getmantsev S.V. *Coagulation in the natural water treatment technology*. Moscow, Nauchnoe Izdatelstvo Publ., 2005. 576 p. (In Russ.).
5. Getmantsev S.V., Nechaev I.A., Gandurina L.V. *Purification of industrial wastewater with coagulants and flocculants*. Moscow, ASV Publ. House, 2008. 271 p. (In Russ.).
6. Gordienko M.G., Kruchinina N.E., Kuzin E.N., Voynovsky A.A. Process optimization of obtaining solidified forms of aluminosilicic flocculant-coagulant for application in wastewater treatment. *Environmental safety*, 2012, vol. 1, no. 4, pp. 21–25. (In Russ.).
7. Gan Y., Zhang L., Zhang S. The suitability of titanium salts in coagulation removal of micropollutants and in alleviation of membrane fouling. *Water research*, 2021, vol. 205, no. 117692.
8. Wern T.Y., Ardani M.R., Ramli S.F., Rezan S.A., Aziz H.A., Ibrahim I. Coagulation performance of titanium tetrachloride for Alor Pongsu wastewater treatment. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2267, no. 020073.
9. Jeon K.J., Kim J.H., Ahn J.H. Phosphorus removal characteristics of titanium salts compared with aluminum salt. *Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation*, 2017, vol. 89, no. 8, pp. 739–743.
10. Xu J., Zhao Y., Gao B., Zhao Q. Enhanced algae removal by Ti-based coagulant: comparison with conventional Al- and Fe-based coagulants. *Environmental science and pollution research international*, 2018, vol. 25, no. 13, pp. 13147–13158.
11. Zhao Y., Lian H., Tian C., Li H., Xu W., Phuntsho S., Shih K. Surface water treatment benefits from the presence of algae: Influence of algae on the coagulation behavior of polytitanium chloride. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, vol. 15, no. 58, pp. 1–13.
12. Gan Y., Li J., Zhang L., Wu B., Huang W., Li H., Zhang S. Potential of titanium coagulants for water and wastewater treatment: current status and future perspectives. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 406, no. 126837, pp. 1–17.
13. Thomas M., Bak J., Królikowska J. Efficiency of titanium salts as alternative coagulants in water and wastewater treatment: short review. *Desalination and Water Treatment*, 2020, vol. 208, pp. 261–272.
14. Shon H.K., Vigneswaran S., Kandasamy J., Zareie M., Kim J.B., Cho D., Kim J. 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*, 2009, vol. 44, pp. 1525–1543.
15. Kuzin E.N. Titanium-based coagulants in domestic wastewater treatment. *Water and Ecology*, 2020, vol. 4, no. 84, pp. 16–23. (In Russ.).
16. Izmailova N.L., Lorentson A.V., Chernoberezhskii Y.N. Composite coagulant based on titanyl sulfate and aluminum sulfate. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2015, vol. 88, pp. 458–462.
17. Kuzin E., Averina Y., Kurbatov A., Kruchinina N., Boldyrev V. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 440, pp. 1–10.

18. Gerasimova L.G., Shchukina E.S., Maslova M.V., Semushin V.V. Obtaining titanosilicate ion-exchanger, technical properties, sorption of doubly charged cations. *ChemChemTech*, 2021, vol. 64, no. 8, pp. 115–122. (In Russ.).
19. Gerasimova L.G., Maslova M.V., Shchukina E.S. synthesis of sorption materials from low grade titanium raw materials. *Materials*, 2022, vol. 15 (5), no. 1922, pp. 1–21.
20. Gerasimova L.G., Shchukina E.S., Kiselev Y.G. Preparation of functional materials from raw materials with a low amount of titanium. *Theor Found Chem Eng*, 2022, vol. 56, pp. 908–914.
21. Maslova M., Ivanenko V., Yanicheva N., Gerasimova L. The effect of heavy metal ions hydration on their sorption by a mesoporous titanium phosphate ion-exchanger. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, vol. 35, no. 101233.
22. Kuzin E.N. Application of the method of atomic emission spectroscopy with microwave (magnetic) plasma in the processes of identifying the chemical composition of steelmaking waste. *Cher nye Metally*, 2022, vol. 10, pp. 79–82. (In Russ.).
23. Shabanova N.A., Popov V.V., Sarkisov P.D. *Chemistry and technology of nanodispersed oxides*. Moscow, IKTs Akademkniga Publ., 2007. 309 p. (In Russ.).
24. Shon H.K., Vigneswaran S., Kim I.S., Cho J., Kim G.J., Kim J.B., Kim J.H. Preparation of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by titanium tetrachloride (TiCl₄) flocculation of wastewater. *Environmental science & technology*, 2007, vol. 4, no. 4, pp. 1372–1377.
25. Averina J.M., Kaliakina G.E., Zhukov D.Y., Kurbatov A.Y., Shumova V.S. Development and design of a closed water use cycle. *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019)*. Varna, Bulgaria, 2019. Vol. 19, no. 3.1, pp. 145–152.

Information about the authors

Evgenii N. Kuzin, Cand. Sc., Associate Professor, D. Mendeleev University of Chemical Technology, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. kuzin.e.n@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>;

Andrey B. Fadeev, Postgraduate Student, D. Mendeleev University of Chemical Technology, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. fadeev89@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8188-5079>

Received: 28.02.2024

Revised: 07.03.2024

Accepted: 14.03.2024