



Научная статья

## Получение и применение комплексного титансодержащего коагулянта из кварц-лейкоксового концентрата

Е.Н.Кузин

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

**Как цитировать эту статью:** Кузин Е.Н. Получение и применение комплексного титансодержащего коагулянта из кварц-лейкоксового концентрата // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 413-420. EDN LQQWFL

**Аннотация.** Поиск новых высокоэффективных реагентов для процессов очистки сточных вод – сложная и актуальная задача. Титансодержащие коагулянты представляют новое направление водоочистки и по своей эффективности существенно превосходят традиционные алюминий- и железосодержащие коагулянты. Высокая стоимость реагентов существенно тормозит их внедрение. Комплексные титансодержащие реагенты – коагулянты, полученные модификацией традиционных коагулянтов добавкой 2,5-10,0 мас.% соединений титана. В данной работе тетрагидроксид титана, полученный из кварц-лейкоксового концентрата, прегидролизован с последующим обменным разложением серной кислотой. Полученную смесь соляной и серной кислот нейтрализовали гидроксидом/оксидом алюминия с образованием самотвердеющей смеси (химическая дегидратация). Образец комплексного сульфатно-хлоридного титансодержащего коагулянта представлял из себя смесь  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 5-20 мас.%,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  – 70-90 мас.% и  $\text{TiOSO}_4$  – 2,5-10,0 мас.%. Доказано, что изменяя соотношение оксида/гидроксида алюминия и тетрагидроксида титана на стадии прегидролиза и обменного разложения, возможно получать образцы комплексного коагулянта с различным содержанием модифицирующей добавки соединений титана. Оценка коагуляционных свойств комплексного реагента продемонстрировала его повышенную эффективность в холодной воде в сравнении с сульфатом алюминия. Исследования использования комплексного титансодержащего коагулянта в процессе очистки сточных вод от фосфат-анионов и взвешенных веществ продемонстрировали его повышенную эффективность в сравнении с традиционными реагентами. Преимущества полученного реагента – снижение эффективной дозы реагента, минимизация остаточных концентраций загрязняющих веществ в очищенной воде, интенсификация процессов седиментации и фильтрации коагуляционных шламов. Очищенная вода может быть использована повторно в системе оборотного водоснабжения. Использование в качестве исходного сырья кварц-лейкоксового концентрата и получаемого на его основе тетрагидроксида титана позволит не только минимизировать стоимость получаемого комплексного коагулянта, но и сделать шаг к реализации концепции Zero Waste.

**Ключевые слова:** комплексный титансодержащий коагулянт; кварц-лейкоксовый концентрат; химическая дегидратация; очистка воды; дефосфатизация

Поступила: 30.03.2024

Принята: 03.06.2024

Онлайн: 04.07.2024

Опубликована: 04.07.2024

**Введение.** Вопросам поиска новых высокоэффективных реагентов для процессов водоочистки и водоподготовки уделяется значительное внимание. Наибольшее распространение в процессах очистки воды получил процесс коагуляции и ее частный случай – флокуляция. Введение в дисперсную систему солей алюминия, железа, титана, кремния и др. приводит к гидролизу с образованием труднорастворимых гидроксидов соответствующих металлов, способных за счет нейтрализации поверхностного заряда агрегатировать вокруг себя дисперсные частицы. В зависимости от типа применяемого реагента помимо процессов нейтрализации также возможны процессы адсорбции и флокуляции.

Несмотря на относительно высокую эффективность, традиционные коагулянты на основе солей алюминия и железа уже не способны оптимально выполнять поставленные перед ними задачи, а также имеют ряд существенных недостатков. Жесткий остаточный норматив ПДК, узкий диапазон pH и невысокая эффективность в холодной воде – основные минусы солей алюминия, при этом соли железа обладают сильными абразивными свойствами и могут образовывать хорошо растворимые соединения с органическими лигандами [1-3]. Соли титана, несмотря на практически полное отсутствие недостатков и высочайшую эффективность, не нашли повсеместного распространения из-за высокой стоимости [4-6].



Выходом из сложившейся ситуации может стать применение комплексных титаносодержащих реагентов – солей алюминия или железа, модифицированных добавкой соединений титана в количестве 2,5-10 мас.%. Ключевым преимуществом подобных реагентов является возможность их получения из различного минерального сырья и техногенных отходов, что позволит в значительной мере снизить себестоимость [7, 8]. В качестве потенциального сырья для производства комплексных титаносодержащих коагулянтов могут быть использованы титанитовый (сфеновый), ильменитовый и другие концентраты. Данное сырье используют для получения диоксида титана из ильменита, а также дубителей, сорбентов и других продуктов из титанита.

Кварц-лейкоксен – побочный крупнотоннажный продукт разработки Ярегского нефтетитанового месторождения с содержанием соединений титана 7-11 мас.%. В процессе флотационного обогащения получают кварц-лейкоксеновый концентрат с содержанием диоксида титана до 45-50 мас.%. Запасы кварц-лейкоксена, согласно различным оценкам, составляют примерно 260 млн т [9].

Химическая природа минерала (тесное взаимное прорастванье диоксидов кремния и титана) обуславливает высокую химическую стойкость и делает невозможным применение традиционного сернокислотного метода переработки [10, 11].

В настоящее время разработан ряд технологий обогащения или переработки кварц-лейкоксенового концентрата с получением рутилового концентрата:

- Автоклавное выщелачивание [9].
- Магнитная сепарация и восстановительный обжиг [9, 12].
- Плазмотермическое восстановление [13].
- Гидрофторидное выщелачивание [14, 15].
- Силикотермическое восстановление [16].

Наиболее успешным направлением переработки кварц-лейкоксенового концентрата без сомнения является комплексное решение, разработанное коллективом авторов под руководством проф. Г.Б.Садыхова в Институте металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН. Предлагаемая технология включает в себя стадии магнетизирующего обогащения и автоклавного выщелачивания кварц-лейкоксенового концентрата с получением рутилового концентрата и игольчатого воластонита [9, 11, 12].

Рутиловый концентрат направляют на стадию селективного хлорирования с получением смеси хлоридов титана, кремния, алюминия и пр. Получаемый  $TiCl_4$  после ректификационной очистки может быть использован для производства технической двуокиси титана [17, 18]. К сожалению, многостадийная система очистки существенно удорожает процесс.

В качестве альтернативного направления переработки необходимо упомянуть пирометаллургическую переработку кварц-лейкоксенового концентрата с получением титанатов для нужд различных отраслей промышленности [19].

Для повышения экономической привлекательности процесса хлорирования/ректификации наиболее целесообразным представляется создание альтернативной технологии получения инновационных реагентов с повышенной стоимостью и спросом на рынке.

Основной целью данной работы является разработка технологии синтеза комплексного титаносодержащего коагулянта с использованием в качестве сырья тетрахлорида титана, полученного селективным хлорированием кварц-лейкоксенового концентрата. В качестве дополнительной цели стоит обозначить проверку эффективности комплексного реагента в процессах очистки сточных вод и сравнение его активности с традиционными алюминийсодержащими коагулянтами.

**Методы.** В качестве исходного прекурсора для синтеза комплексного реагента использовали образец тетрахлорида титана с содержанием примеси тетрахлорида кремния в количестве до 0,4 мас.%, полученный селективным хлорированием кварц-лейкоксенового концентрата Ярегского нефтетитанового месторождения.

В экспериментах использовали образцы оксида и гидроксида алюминия производства Sigma-Aldrich (Германия), серную кислоту производства «Компонент-реактив» (Россия). В качестве образца сравнения коагулянтов выбран сульфат и оксихлорид алюминия производства Kemira (Финляндия).

Идентификацию фазового состава твердых образцов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН 3 Н производства НПО «Буревестник» (Россия) (медный анод  $K\alpha$ -1.5418 Å).



Определение металлов в кислых растворах и сточных водах проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с магнитной плазмой на приборе «Спектроскай» производства ГК «Скайград» (Россия) [20].

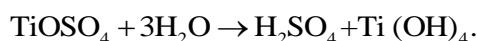
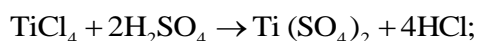
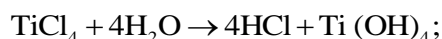
Пробную коагуляцию (Яг-тесты не менее трех повторов для каждой воды) проводили на лабораторном флокуляторе JLT4 Velp Scientifica (Италия). Время смешения коагулянта и сточной воды – 2 мин, фаза хлопьеобразования (медленная коагуляция) – 8 мин, седиментация – 30 мин.

Определение концентрации взвешенных веществ проводили гравиметрическим методом, а также на портативном турбидиметре-мутномере Hanna HI 98 703 HANNA Instruments (Венгрия).

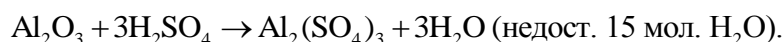
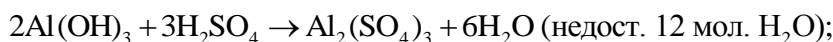
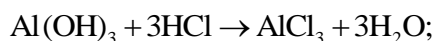
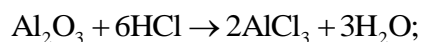
Скорость фильтрации определяли путем пропускания заданного объема обработанной коагулянтами сточной воды через фильтр «Белая лента» (15 мкм) в течение 60 с. Время седиментации осадков оценивали при помощи фотоколориметра ЗОМС-КФК-3-01 (Россия).

Для оценки коагуляционной эффективности комплексных и традиционных коагулянтов использовали образец речной воды, отобранной в теплый и холодный сезоны, сточную воду установки газоочистки формовочного и сталеплавильного участка машиностроительного предприятия, а также хозяйственно-бытовой сток, прошедший глубокою биологическую очистку и направленный на стадию реагентной дефосфатизации.

**Обсуждение результатов.** Для получения твердого образца комплексного титансодержащего коагулянта была использована инновационная технология синтеза (рис.1), включающая в себя прегидролиз тетрахлорида титана, обменное разложение и гидролиз оксисульфата титана:



Тетрахлорид титана, гидролизная соляная или серная кислота будут взаимодействовать с гидроксидом/оксидом алюминия с образованием сульфата и хлорида алюминия:



Нейтрализация серной кислоты гидроксидом или оксидом алюминия приводит к образованию сульфата алюминия, при этом учитывая тот факт, что стабильной формой является только 18-водный кристаллогидрат, недостаток молекулярной влаги будет поглощаться из реакционной смеси, при этом становится возможным получение твердых продуктов (химическая дегидратация).

Ключевой особенностью предлагаемой технологии является возможность отказа от процессов сушки и получение реагента, состоящего из двух водорастворимых катионов металлов с зарядом 3+ и 4+ для алюминия и титана соответственно.

Фазовый состав полученного образца комплексного титансодержащего коагулянта представлен на дифрактограмме (рис.2).

Данные о химическом составе образцов коагулянтов (совокупность результатов рентгенофазового, атомно-эмиссионного анализов), полученных из оксида и гидроксида алюминия при различных соотношениях соединения алюминия и серной кислоты, представлены в табл.1.

Сопоставляя данные табл.1 и рис.2, можно сделать вывод, что вне зависимости от типа применяемых соединений основной фазой в составе комплексного реагента является сульфат алюминия – 70-90 мас.%, при этом в продукте присутствует хлорид алюминия – 5-20 мас.% и водорастворимого оксисульфата титана – 2,5-10 мас.%. Наличие в составе реагента соединений алюминия в форме сульфата и хлорида, вероятно, позволит повысить эффективность коагуляции за счет синергетического действия.

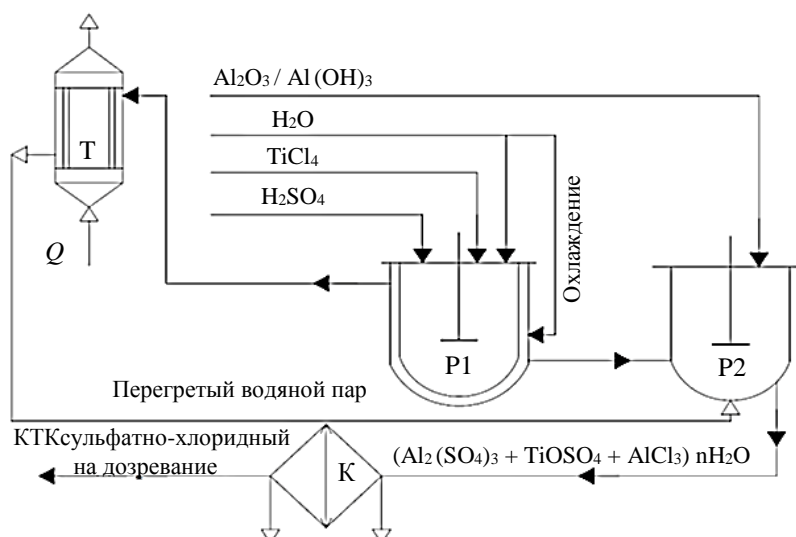


Рис.1. Схема синтеза комплексного титансодержащего коагулянта

P1 – реактор обменного разложения; P2 – реактор нейтрализатор (химическая дегидратация); Т – теплообменник; К – кристаллизатор

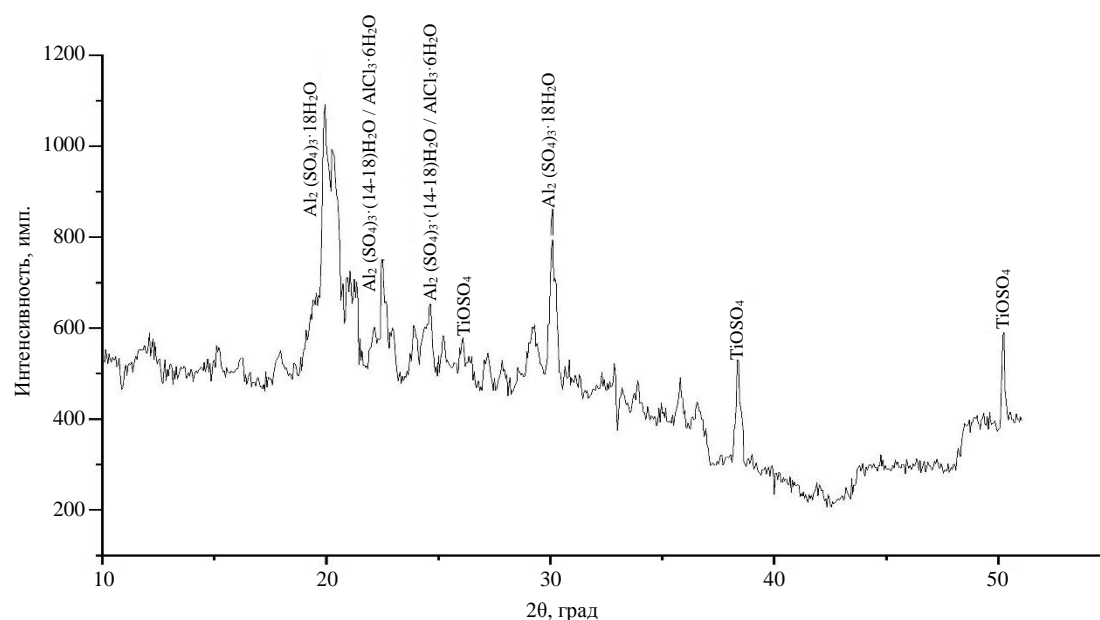


Рис.2. Дифрактограмма образца коагулянта

Таблица 1

Фазовый состав образцов комплексных титансодержащих коагулянтов

Al-содержащий компонент	Массовое соотношение (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al(OH) <sub>3</sub> )/TiCl <sub>4</sub>	Содержание основных компонентов, мас. %			
		AlCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·18H <sub>2</sub> O	Ti-компоненты	Нерастворимая часть
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3/1	5,5±0,35	91,7±5,78	2,6±0,22	0,2±0,04
	2/1	10,1±0,64	84,6±5,33	5,0±0,42	0,3±0,06
	1,1/1	15,1±0,95	76,8±4,84	7,6±0,64	0,5±0,10
	0,6/1	19,8±1,25	69,4±4,37	10,1±0,85	0,7±0,14
Al(OH) <sub>3</sub>	7/1	5,7±0,36	91,7±5,78	2,5±0,21	0,1±0,02
	3/1	10,5±0,66	84,6±5,33	4,8±0,40	0,1±0,02
	1,6/1	16,1±1,01	76,2±4,80	7,5±0,63	0,2±0,04
	1,1	21,7±1,37	67,7±4,27	10,4±0,87	0,2±0,04

Заключительным этапом экспериментов стала оценка эффективности полученных образцов комплексных титансодержащих реагентов в процессах очистки воды.

Первым объектом исследования была выбрана вода источника поверхностного водозабора, отобранная в теплый и холодный сезон. Исходное содержание взвешенных веществ – 6,9 мг/дм<sup>3</sup> (осень), рН – 6,54 и 12,3 мг/дм<sup>3</sup>, рН – 6,71 (лето).

Из данных табл.2 видно, что применение образца комплексного титансодержащего коагулянта позволяет нивелировать влияние температуры воды и существенно повысить эффективность базового реагента – сульфата алюминия (70-90 % от состава комплексного реагента). Данное явление можно объяснить расширением спектра продуктов гидролиза коагулянта, процессами поликонденсации (флокуляции), а также явлениями нейтрализации (зародышеобразования) [21-23].

Таблица 2

Эффективность очистки природной воды от взвешенных веществ, %					
Коагулянт	Доза коагулянта, мг (Me <sub>x</sub> O <sub>y</sub> )/дм <sup>3</sup>	Эффективность очистки, %	Концентрация взвешенного вещества, мг/дм <sup>3</sup>	Скорость фильтрации, мл/мин	Время седиментации, мин
Холодный период (температура воды 8-9 °С)					
Сульфат алюминия	15	65,8	2,36	35	8
Оксихлорид алюминия	12	84,3	1,08	46	5
КТКсульфатно-хлоридный	10	93,8	0,43	55	4
Теплый период (температура воды 18 °С)					
Сульфат алюминия	12	94,2	0,71	43	5
Оксихлорид алюминия	9,5	98,3	0,21	54	4
КТКсульфатно-хлоридный	8	98,4	0,20	60	3

Данные по эффективности дефосфатизации хозяйственно-бытовых сточных вод, прошедших глубокую биологическую очистку, представлены на рис.3.

На рис.3 видно, что применение комплексного титансодержащего коагулянта позволяет минимизировать остаточное содержание фосфат-иона, что в первую очередь обусловлено пониженной растворимостью фосфата титана в сравнении с фосфатом алюминия. Помимо повышения эффективности, применение комплексного реагента позволяет также на 10-25 % сократить дозу коагулянта, необходимую для достижения норматива ПДК<sub>рыб-хоз</sub>.

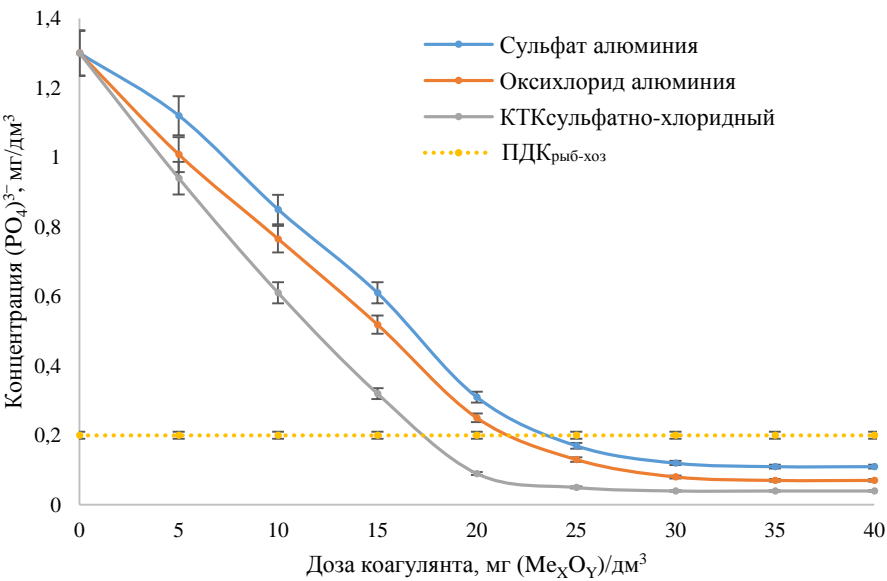


Рис.3. Реагентная дефосфатизация сточных вод



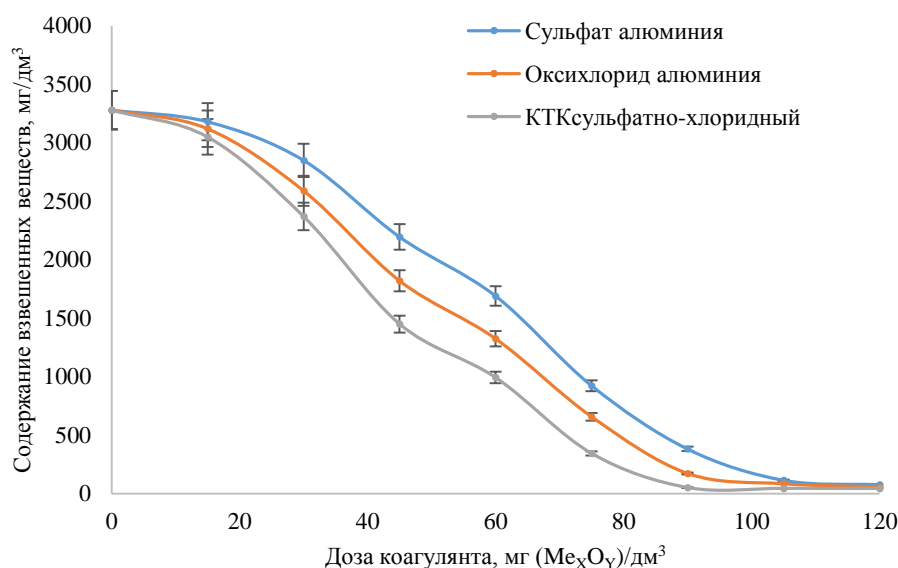


Рис.4. Остаточные концентрации взвешенных веществ

Следующим этапом стала оценка эффективности комплексного коагулянта на образце сточной воды участка приготовления формовочно-стержневой смеси и электродуговой выплавки стали машиностроительного предприятия Московской обл. Исходное содержание взвешенных веществ, представленных оксидами железа, кремния, алюминия и кальция в воде системы мокрой газоочистки, составляло 3280 мг/дм<sup>3</sup>. Данные по остаточным концентрациям взвешенных веществ в сточной воде в зависимости от типа и дозы применяемого коагулянта представлены на рис.4.

Из графика на рис.4 хорошо видно, что применение комплексного коагулянта позволяет не только сократить расход реагентов, но и минимизировать остаточное содержание взвешенных веществ в воде. Очищенная вода может быть направлена на повторное использование в систему газоочистки, при этом, ввиду наиболее низкой остаточной концентрации взвешенных веществ в рециркуляционной воде, абразивный износ оборудования будет существенно снижен [24, 25]. Образующиеся при использовании комплексного реагента коагуляционные шламы в среднем оседали на 10-15 % быстрее, что в перспективе позволит существенно повысить производительность очистных сооружений. Скорость фильтрации коагуляционных шламов при использовании нового реагента была в среднем на 20 % выше, чем при использовании традиционных реагентов.

Состав коагуляционных шламов, получаемых при использовании комплексного реагента, будет практически идентичен коагуляционным шламам от применения сульфата алюминия, за исключением добавки диоксида титана в количестве 5-10 мас.%, при этом оба шлама имеют 4-й класс опасности и могут быть размещены на постоянное хранение на полигонах. Кроме того, шлам, полученный при использовании комплексного титансодержащего коагулянта, можно использовать в качестве прекурсора для термохимического синтеза алюминатов титана (компонент керамики, катализатора) [19].

**Закключение.** В рамках проделанной работы предложена технология получения инновационных комплексных титансодержащих коагулянтов с использованием в качестве сырья тетрахлорида титана, полученного из кварц-лейкосенового концентрата – крупнотоннажного минерального отхода процесса добычи сланцевой нефти на Ярегском нефтетитановом месторождении. Использование кварц-лейкоксенового концентрата позволит сделать шаг к реализации концепции Zero Waste в рамках экономики замкнутого цикла [26, 27].

Установлена возможность получения твердого образца комплексного коагулянта, включающего процессы прегидролиза тетрахлорида титана и его обменное разложение в сочетании с химической дегидратацией. Доказано, что состав комплексного реагента практически не изменяется как при использовании гидроксида, так и оксида алюминия. Доказано, что основной фазой в составе комплексного реагента является сульфат алюминия (70-90 мас.%), при этом в продукте присутствует хлорид алюминия и 2,5-10,0 мас.% водорастворимого оксисульфата титана.



Исследования коагуляционной способности комплексного титансодержащего коагулянта показали, что по эффективности удаления взвешенных веществ комплексный реагент существенно превосходит традиционные коагулянты на основе сульфата или оксихлорида алюминия. Установлено, что титансодержащие реагенты менее чувствительны к низкой температуре воды в сравнении с базовым сульфатом алюминия.

Доказано, что применение титансодержащего реагента позволяет минимизировать остаточные концентрации фосфат-аниона при доочистке воды, прошедшей стадию глубокой биологической очистки. Полученные коагуляционные шламы быстрее оседали на дно и имели повышенную скорость фильтрации, что позволит существенно повысить эффективность работы очистных сооружений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dayarathne H.N.P., Angove M.J., Aryal R. *et al.* Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms // *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 40. № 101820. DOI: [10.1016/j.jwpe.2020.101820](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820)
2. Seung woo Han, Lim seok Kang. Comparison of Al(III) and Fe(III) Coagulants for Improving Coagulation Effectiveness in Water Treatment // *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2015. Vol. 37. № 6. P. 325-331. DOI: [10.4491/KSEE.2015.37.6.325](https://doi.org/10.4491/KSEE.2015.37.6.325)
3. Jie Xu, Yanxia Zhao, Baoyu Gao, Qian Zhao. Enhanced algae removal by Ti-based coagulant: comparison with conventional Al- and Fe-based coagulants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. Iss. 13. P. 13147-13158. DOI: [10.1007/s11356-018-1482-8](https://doi.org/10.1007/s11356-018-1482-8)
4. Yonghai Gan, Jingbiao Li, Li Zhang *et al.* Potential of titanium coagulants for water and wastewater treatment: Current status and future perspectives // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 406. № 126837. DOI: [10.1016/j.cej.2020.126837](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126837)
5. Thomas M., Bqk 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. DOI: [10.5004/dwt.2020.26689](https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26689)
6. Kyeong-Jun Jeon, Jong-Ho Kim, Johng-Hwa Ahn. Phosphorus Removal Characteristics of Titanium Salts Compared with Aluminum Salt // *Water Environment Research*. 2017. Vol. 89. Iss. 8. P. 739-743. DOI: [10.2175/106143017X14839994522902](https://doi.org/10.2175/106143017X14839994522902)
7. Kuzin E., Averina Y., Kurbatov A. *et al.* Titanium-Containing Coagulants in Wastewater Treatment Processes in the Alcohol Industry // *Processes*. 2022. Vol. 10. Iss. 3. № 440. DOI: [10.3390/pr10030440](https://doi.org/10.3390/pr10030440)
8. Измайлова Н.Л., Лоренцсон А.В., Чернобережский Ю.М. Композиционный коагулянт на основе титанилсульфата и сульфата алюминия // *Журнал прикладной химии*. 2015. Т. 88. № 3. С. 453-457.
9. Садыхов Г.Б., Заблочкина Ю.В., Анисонян К.Г. и др. Получение высококачественного титанового сырья из лейкоксеновых концентратов Ярегского месторождения // *Металлы*. 2018. № 6. С. 3-8.
10. Котова О.Б., Ожогина Е.Г., Понарядов А.В. Технологическая минералогия: развитие комплексной оценки титановых руд (на примере Пижемского месторождения) // *Записки Горного института*. 2022. Т. 256. С. 632-641. DOI: [10.31897/PMI.2022.78](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.78)
11. Федосеев С.В., Саннерис Джада, Точило М.В. Анализ и классификация ресурсосберегающих технологий воспроизводства минерально-сырьевой базы титановой промышленности // *Записки Горного института*. 2016. Т. 221. С. 756-760. DOI: [10.18454/PMI.2016.5.756](https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.756)
12. Копьёв Д.Ю., Анисонян К.Г., Олюнина Т.В., Садыхов Г.Б. Влияние условий восстановительного обжига лейкоксенового концентрата на его вскрываемость при сернокислотном разложении // *Цветные металлы*. 2018. № 11. С. 56-61. DOI: [10.17580/tsm.2018.11.08](https://doi.org/10.17580/tsm.2018.11.08)
13. Николаев А.А., Кирпичёв Д.Е., Николаев А.В. Исследование теплофизических параметров анодной области плазменной дуги при восстановительной плавке кварц-лейкоксена в металлографитовом реакторе // *Физика и химия обработки материалов*. 2019. № 2. С. 14-20. DOI: [10.30791/0015-3214-2019-2-14-20](https://doi.org/10.30791/0015-3214-2019-2-14-20)
14. Смороков А.А., Кантаев А.С., Брянкин Д.В., Миклашевич А.А. Разработка способа низкотемпературного обескремнивания лейкоксенового концентрата Ярегского месторождения раствором гидрофторида аммония // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2022. Т. 65. Вып. 2. С. 127-133. DOI: [10.6060/ivkkt.20226502.6551](https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226502.6551)
15. Perovskiy I.A., Burtsev I.N., Ponaryadov A.V., Smorokov A.A. Ammonium fluoride roasting and water leaching of leucoxene concentrates to produce a high grade titanium dioxide resource (of the Yaregskoye deposit, Timan, Russia) // *Hydrometallurgy*. 2022. Vol. 210. № 105858. DOI: [10.1016/j.hydromet.2022.105858](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105858)
16. Истомина Е.И., Истомин П.В., Надуткин А.В., Грасс В.Э. Обескремнивание лейкоксенового концентрата при вакуумной силикотермической обработке // *Новые огнеупоры*. 2020. № 3. С. 5-9. DOI: [10.17073/1683-4518-2020-3-5-9](https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-3-5-9)
17. Zanaevskiy K.L., Meshalkin V.P. Chlorination of Quartz-Leucoxene Concentrate of Yarega Field // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 51. Iss. 3. P. 906-915. DOI: [10.1007/s11663-020-01810-2](https://doi.org/10.1007/s11663-020-01810-2)
18. Rodriguez M.H., Rosales G.D., Pinna E.G. *et al.* Extraction of Titanium from Low-Grade Ore with Different Leaching Agents in Autoclave // *Metals*. 2020. Vol. 10. Iss. 4. № 497. DOI: [10.3390/met10040497](https://doi.org/10.3390/met10040497)
19. Кузин Е.Н., Мокрушин И.Г., Кручинина Н.Е. Оценка возможности использования лейкоксен-кварцевого концентрата в качестве сырья для получения титанатов алюминия и магния // *Записки Горного института*. 2023. Т. 264. С. 886-894. DOI: [10.31897/PMI.2023.15](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.15)
20. 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. DOI: [10.17580/chm.2022.10.13](https://doi.org/10.17580/chm.2022.10.13)
21. Qianjun Le, Shengfei Yu, Wusheng Luo. Particle Formation Mechanism of TiCl<sub>4</sub> Hydrolysis to Prepare Nano TiO<sub>2</sub> // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 22. № 12213. DOI: [10.3390/app132212213](https://doi.org/10.3390/app132212213)



22. Orlach J.-M., Darabiha N., Candel S. *et al.* Accounting for hydrolysis in the modeling of titanium dioxide nanoparticle synthesis in laminar  $\text{TiCl}_4$ -seeded flames // *Combustion and Flame*. 2023. Vol. 247. № 112458. DOI: [10.1016/j.combustflame.2022.112458](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112458)
23. Пойлов В.З., Казанцев А.Л. Формирование частиц диоксида титана при гидролизе и термогидролизе водно-спиртовых растворов тетрахлорида титана // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 6. С. 58-65.
24. Averina J.M., Kaliakina G.E., Zhukov D.Y. *et al.* Development and design of a closed water use cycle / 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019: Conference proceedings, 30 June – 06 July 2019, Albena, Bulgaria. Sophia: STEF92 Technology, 2019. Vol. 19. № 3.1. P. 145-152. DOI: [10.5593/sgem2019/3.1/S12.019](https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.1/S12.019)
25. Курбатов А.Ю., Фадеев А.Б., Аверина Ю.М., Ветрова М.А. Оценка возможности использования атмосферных осадков для нужд оборотного водоснабжения машиностроительного предприятия // *Цветные металлы*. 2021. № 10. С. 55-61. DOI: [10.17580/tsm.2021.10.08](https://doi.org/10.17580/tsm.2021.10.08)
26. 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*. 2022. Vol. 29. Iss. 1. P. 349-370. DOI: [10.1007/s11356-021-16615-2](https://doi.org/10.1007/s11356-021-16615-2)
27. Fet A.M., Deshpande P.C. Closing the Loop: Industrial Ecology, Circular Economy and Material Flow Analysis // *Business Transitions: A Path to Sustainability*. Cham: Springer, 2023. P. 113-125. DOI: [10.1007/978-3-031-22245-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22245-0_11)

**Автор Е.Н.Кузин**, канд. техн. наук, доцент, [kuzin.e.n@muctr.ru](mailto:kuzin.e.n@muctr.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900> (Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, Москва, Россия).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.