



Министерство науки и  
высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тамбовский государственный  
технический университет»  
(ФГБОУ ВО «ТГТУ»)  
392000, Тамбов, Советская, 106/5,  
помещение 2

Лицензия на осуществление образовательной  
деятельности бессрочная  
выдана Федеральной службой по надзору в сфере  
образования и науки 21.06.2022  
за № ЛО35-00115-77/00613649  
Телефон (4752) 63-10-19  
Факс (4752) 63-06-43  
E-mail: [tstu@tstu.ru](mailto:tstu@tstu.ru)  
ОГРН 1026801156557  
ИНН 6831006362, ОКПО 02069289

№ 01.01-17/112/5  
« 23 » 06 2025 г.  
На № \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202  г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «Тамбовский  
государственный технический  
университет», д.т.н., профессор  
Муромцев Д.Ю.  
2025 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет» на  
диссертационную работу Хейн Тху Аунг на тему: «Комплексный  
подход к очистке водных сред Республики Союз Мьянма от ионов  
тяжелых металлов и алюминия», представленной на соискание  
ученой степени доктора технических наук по специальности  
2.6.7. Технология неорганических веществ

### Актуальность работы.

Рецензируемая работа посвящена актуальной и важной проблеме  
современного экологического менеджмента – повышению эффективности  
очистки сточных вод с целью снижения негативного воздействия на  
окружающую среду и здоровье человека.

Загрязнения водной среды соединениями тяжелых металлов является глобальной проблемой. Состав сточных вод предприятий в Мьянме изобилует тяжелыми металлами, щелочноземельными элементами, алюминием, следовательно, для республики чрезвычайно важной проблемой является очистка сточных вод от катионов (II и III) с целью вторичного использования водных ресурсов. Существующие подходы к очистке водных сред в Мьянме, зачастую, не соответствуют масштабу проблемы. Комплексная очистка, осуществляемая чередованием физических, химических или биологических методов, сточных вод является процессом, позволяющим поэтапно избавляться от грубых твердых частиц, растворенных и взвешенных органических и неорганических веществ.

### **Структура и содержание диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 263 страницах, содержит 95 рисунков, 105 таблиц, 275 ссылок на литературные источники.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, что позволило сформулировать цель, задачи исследования, научную новизну работы, практическую значимость и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен литературный обзор по способам извлечения и сорбции тяжелых, цветных металлов из сточных вод, проблемы сточных вод Республики Мьянма.

**Во второй главе** работы содержатся данные об объектах исследования, используемых реагентах и реактивах, методах, применяемых в работе, а также о составе сточных вод.

**Третья глава** работы посвящена седиментации труднорастворимых соединений катионов (II и III). Проведены лабораторные эксперименты по определению оптимальных условий при осаждении как одиночных катионов металлов, так и при их совместном присутствии, с применением различных флокулянтов и ПАВ, варьируя значениями концентраций аналитов, времени процесса, величины pH. В качестве фоновых электролитов использовали растворы NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (концентрация 1 г/л). Подобранные оптимальные условия ведения процесса позволяют максимально эффективно отделить труднорастворимые соединения изучаемых катионов.

**Четвертая глава** включает данные об электрофлотации (ЭФ) с активными анодами при извлечении трехзарядных катионов металлов и активированного угля марки ОУ-Б, применяемого в Республике Союз Мьянма для предварительной сорбции катионов из водных сред. Это эффективный метод извлечения труднорастворимых соединений,

характеризуемый экспрессностью, быстрым переходом дисперсной фазы в пену с образованием флотошлама. Степень удаления катионов прямо пропорциональна устойчивости образующейся пены, которая определяется параметром  $\Delta\alpha$ , рассчитываемый как разность степени извлечения дисперсной фазы по истечении 5 и 30 минут ведения процесса.

**В пятой главе** изложена электрофлотация труднорастворимых соединений (гидроксидов) железа (III), алюминия (III) и хрома (III) с пассивными анодами в присутствии ионов щелочноземельных металлов (побочные компоненты сточных вод). Фоновыми электролитами служили нитрат и сульфат натрия, рН среды варьировался от 7 до 10. Степень извлечения аналитов составляет 95-98%.

**В шестой главе** изложены исследования попарного и совместного извлечения из водных многокомпонентных сред катионов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) без добавок и с применением ПАВ, флокулянтов. Рассмотрены системы с анионными и неионогенными добавками, используемыми для извлечения двухкомпонентных смесей катионов из водных сред с добавлением сульфатного фонового электролита.

**В седьмой главе** приведена оценка влияния промышленных флотореагентов на эффективность ЭФ мультикомпонентной смеси катионов металлов (медь, никель, цинк, кобальт, железо) в среде хлоридного фонового электролита (1 г/л). Исследования проводились в интервале рН 8-11. Катионы извлекаются в виде гидроксидов с максимальной эффективностью до 99 %.

**Восьмая глава** содержит сведения о доочистке вод от катионов (II и III) сорбцией ионообменным волокном после первых двух стадий (седиментация и электрофлотация) комплексной обработки сточных вод. В целях понимания основополагающих механизмов, регулирующих сорбцию металлов с использованием ионообменного волокна, учтены свойства и особенности воды во время ионного обмена. Изучены факторы, влияющие на процесс адсорбции волокном катионов.

**В девятой главе** представлены разработанные технологические схемы по комплексной очистке сточных вод от катионов (II и III) двух предприятий: машиностроительной компании «24 Hour Mining & Industry Co., Ltd» и горнодобывающего предприятия «Locrian Precious Metals Co., Limited» (Республика союз Мьянма).

**В заключении** диссертации сформулированы основные выводы и обобщены результаты выполненного исследования.

**Научная новизна полученных результатов** заключается в следующих положениях:

- теоретически обоснованы и экспериментально доказаны физико-химические основы комплексной очистки водных сред от двух-, трехзарядных катионов, состав которых идентичен сточным водам горнодобывающего и машиностроительного предприятий Республики Мьянма, поэтапной обработкой и оптимизацией условий ведения процесса с целью повышения эффективности извлечения ионов металлов на уровне 0,1-0,01 ПДК;

- разработан комплексный подход по извлечению двух- и трехзарядных катионов из водных многокомпонентных систем с последовательным применением механической фильтрации (грубая очистка от механических примесей), седиментации (осаждение органических и части неорганических поллютантов), электрофлотации с использованием флотоагентов различной природы (извлечение большей части соединений металлов) и ионного обмена с полимерным волокном (окончательная доочистка вод), позволяющий использовать повторно сточные воды;

- впервые использованы активные (железный/алюминиевый) аноды для электрофлотационного удаления из водных сред катионов  $Fe^{3+}$  и  $Al^{3+}$  в отсутствие/присутствии щелочноземельных металлов;

- установлено, что при электрофлотации с хлоридным фоновым электролитом в нейтральной среде можно извлечь из водных сред до 84 %  $Fe^{3+}$  без присутствия щелочноземельных металлов и до 58 % при совместном присутствии одного из катионов  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ , из-за роста отрицательного электрокинетического потенциала. Удаление  $Al^{3+}$  с алюминиевым анодом более полно протекает при  $pH=7$  в хлоридном и сульфатном фонах (97 %), а добавление в систему анионного (натрия додецилсульфат - NaDDS) и катионного (СептаПАВ) ПАВ позволяет достичь показателя 99 %;

- экспериментально подобраны оптимальные условия наиболее эффективного удаления активированного угля (96 %), как сопутствующего компонента сточных вод после предварительной очистки от ионов тяжелых металлов, при совместном добавлении анионного ПАВ (NaDDS) и коагулянта ( $AlCl_3$ ) после 5 минут флотации в среде 1 г/л NaCl при  $pH=7$ . Максимальные характеристики извлечения достигаются при одновременном добавлении ПАВ и коагулянта, что обусловлено потерей агрегативной устойчивости дисперсной системы в результате взаимодействия компонентов, дисмеризма или сцепления частиц;

- установлены закономерности флотирования трехзарядных катионов ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ) с переменными характеристиками системы (ПАВ, pH, время, фоновый электролит) в присутствии солей жесткости водных сред;

- экспериментально установлена и предложена ионообменная доочистка вод, прошедших первые две стадии (седиментация, электрофлотация), полимерным волокном. Определены его основные характеристики: изотермы сорбции, термодинамические параметры гидратации ( $\Delta_{\text{deh}}H$ ,  $-\Delta_{\text{h}}G^{\circ}$ ,  $n_{\infty}$ ) для двух- и трехзарядных катионов;

- установлен механизм распределения кинетически неоднородной воды в ионных формах сорбента, выявлены доли связанных форм воды;

- предложен механизм взаимодействия катионов металлов и карбоксильных групп сорбента, подобрано оптимальное соотношение «объем раствора-масса навески волокна».

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в следующем:

- теоретически обоснованы и экспериментально доказаны физико-химические основы комплексной очистки водных сред от двух-, трехзарядных катионов, состав которых идентичен сточным водам горнодобывающего и машиностроительного предприятий Республики Мьянма, поэтапной обработкой и оптимизацией условий ведения процесса с целью повышения эффективности извлечения ионов металлов на уровне 0,1-0,01 ПДК;

- разработан алгоритм поэтапного удаления тяжелых и цветного металлов из водных растворов, включающий механическую фильтрацию, седиментацию, электрофлотацию (растворимые/не растворимые аноды) и финишную доочистку ионообменным волокном, с возвратом воды в технологический цикл, и последующего извлечения катионов из флотошлама и десорбированного материала;

- предложена и апробирована методика седиментации нерастворимых соединений тяжелых металлов из водной системы с катионами (II и III) в присутствии мультикомпонентного ПАВ, позволяющая селективно извлекать поллютанты, которую можно использовать для предварительной очистки загрязненных вод;

- доказано преимущество электрофлотации (как с пассивным, так и с активным анодом), как второго основного этапа доочистки после седиментации, для двух и трехзарядных катионов, эффективность которого зависит от pH, времени ведения процесса, природы фонового электролита,

ПАВов, коагулянтов, промышленных флотореагентов, их содержания в анализируемом растворе;

- рекомендован способ ионообменной финишной доочистки вод, прошедших седиментацию и электрофлотацию, с применением полимерного волокна, преимуществом которого является уменьшение концентрации ионов металлов до уровня 0,01-0,1 ПДК, позволяющая вернуть фильтрат в технологический цикл, характеризующего возможностью выдержать многочисленный цикл «сорбции-десорбции» без ухудшения сорбционных характеристик;

- разработаны две технологические схемы удаления ионов тяжелых металлов и алюминия из сточных вод различного происхождения, сочетающий последовательное применение методов фильтрации, осаждения, флотации, сорбции, прошедшие успешную апробацию на реальных объектах Российской Федерации и Республики Мьянма;

- решения апробированы на предприятиях горнодобывающей компании «24 Hour Mining & Industry Co., Ltd» и машиностроительного предприятия «Locrian Precious Metals Co., Limited», Республика Союз Мьянма, получены акты о внедрении;

- результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры технологии и неорганических веществ и электрохимических процессов РХТУ им. Д. И. Менделеева, в курсах лекций по дисциплинам: основа процессов водоподготовки и очистки сточных вод, энергоресурсосбережения и экология электрохимических производств, водоочистка и регенерация технологических растворов на промышленных объектах.

**Результаты диссертационной работы** опубликованы 37 работ, в том числе 13 статей в изданиях, индексируемых в международных научных базах Scopus и Chemical Abstracts. Получены 2 патента Российской Федерации.

**Рекомендации по использованию результатов.** Результаты диссертационного исследования Хейн Тху Аунг могут быть использованы предприятиями в Мьянме («24 Hour Mining & Industry Co., Ltd», «Locrian Precious Metals Company Limited» и др.) в процессах очистки сточных вод (горнодобывающий сектор, машиностроение, перерабатывающие и текстильные предприятия, сельское хозяйство). Внедрение предложенных методов может значительно повысить качество очистки сточных вод и снизить экологический риск.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы.

По работе имеются следующие вопросы и **замечания:**

1. Первая глава диссертации посвящена литературному обзору, где не уделено внимание технологическому оформлению процесса электрофлотации. Не приведены их существующие конструкции и технологические схемы очистки сточных вод, где они применяются.

2. Литературный обзор диссертации заканчивается выводами, хотя, обычно, приводятся вытекающие из него формулировка цели работы и задач исследования.

3. В работе соискатель привел большой экспериментальный материал, но почему-то не остановился на методах статистической обработки экспериментальных данных. Как определялась ошибка экспериментальных исследований?

4. В диссертации нет математического описания процесса электрофлотации.

5. Диссертантом запатентована технология разделения растворов методом электрофлотации, но отсутствует методика расчета технологических параметров электрофлотаторов.

6. В девятой главе приведены разработанные технологические схемы очистки сточных вод конкретных производств, но нет оценки их экономической эффективности.

Отмеченные замечания носят дискуссионный характер и не влияют на общую ценность диссертационной работы.

#### **Заключение.**


Диссертационная работа Хейн Тху Аунг «Комплексный подход к очистке водных сред Республики Союз Мьянма от ионов тяжелых металлов и алюминия» является законченной научно-квалификационной работой, посвященной решению важной, актуальной проблемы очистки сточных вод Республики Союз Мьянма, испытывающей острую нужду в водных ресурсах без токсикантов и канцерогенов.


Результаты исследований позволяют не только эффективно провести удаление катионов тяжелых металлов, алюминия, что немаловажно для обеспечения экологической безопасности, но и вернуть в технологический цикл очищенную воду. Кроме того, при дальнейшей проработке возможна разработка методик утилизации образующихся отходов с получением чистых химических веществ.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в актуальной редакции), предъявляемых к докторским диссертациям, а ее

автор, Хейн Гху Аунг, заслуживает присуждения искомой ученой степени – доктора технических наук по специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ.

Отзыв обсужден и одобрен на совместном заседании кафедр «Технологии и оборудование химических и пищевых производств» и «Механика и инженерная графика», протокол № 9 от 17 июня 2025 года.

  
Дворецкий Дмитрий Станиславович  
профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудование химических и пищевых производств ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (ТГТУ), доктор технических наук (05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий), (05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (химическая промышленность))  
E-mail: [dvoretzky@tambov.ru](mailto:dvoretzky@tambov.ru)  
Раб. тел.: +7 (4752) 63-10-19

  
Лазарев Сергей Иванович  
профессор, заведующий кафедрой механика и инженерная графика ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (ТГТУ), доктор технических наук (05.17.03 - Технология электрохимических процессов и защита от коррозии)  
E-mail: [sergey.lazarev.1962@mail.ru](mailto:sergey.lazarev.1962@mail.ru)  
Раб. тел.: +7 (4752) 63-10-19

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

392000, Тамбовская область, город Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2.

Тел. +7 (4752) 63-10-19

E-mail: [tstu@admin.tstu.ru](mailto:tstu@admin.tstu.ru)

<https://www.tstu.ru/>



Вход. № 05-8516  
« 08 » 09 2025 г.  
подпись 