

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

диссертационного совета 24.2.312.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, по диссертации на соискание учёной степени доктора наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 23.09.2025, протокол №7

О присуждении Хейн Тху Аунг, гражданину Республики Союз Мьянма, ученой степени доктора технических наук.

Диссертационная работа «Комплексный подход к очистке водных сред Республики Союз Мьянма от ионов тяжелых металлов и алюминия» по специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ принята к защите 24.04.2025, протокол заседания №4, диссертационным советом 24.2.312.04, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России), 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д.68, приказ о создании диссертационного совета от 18.01.2008 № 1-51 (приказом Минобрнауки России от 02.11.2012 № 714/нк признан отвечающим действующим требованиям «Положения о совете...»; приказом Минобрнауки от 03.06.2021 № 561/нк приложение № 1, совету предоставлено право приема диссертаций для защиты на срок действия номенклатуры научных специальностей).

Соискатель, Хейн Тху Аунг, 09.05.1985 года рождения, в 2006 году окончил Янгонский технологический университет в Республике Союз Мьянма и в том же году поступил в магистратуру Института материалов современной энергетики и нанотехнологии ИМСЭН-ИФХ Российского

химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, которую окончил в 2009 году с присвоением степени магистра техники и технологий по направлению: «Химическая технология и биотехнология».

В период 2009 – 2013 гг. обучался в очной аспирантуре в Институте материалов современной энергетики и нанотехнологии ИМСЭН-ИФХ Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. В 2013 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Разработка мембраны и технологии очистки воды от микропримесей мышьяка термомембранным методом» по специальности 05.17.18. Мембраны и мембранная технология в ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева».

С апреля 2017 г. по июнь 2025 г. года являлся докторантом в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева». В настоящий момент трудовую деятельность на территории РФ не осуществляет.

Диссертация выполнена на кафедре технологии неорганических веществ и электрохимических процессов ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Минобрнауки России.

Научный консультант – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры логистики и экономической информатики ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева» Челноков Виталий Вячеславович.

Официальные оппоненты:

– Ксенофонтов Борис Семенович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры экологии и промышленной безопасности;

– Натареев Сергей Валентинович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», профессор кафедры технологических машин и оборудования;

– Глушанкова Ирина Самуиловна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры охраны окружающей среды;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), в своем положительном отзыве, подписанном доктором технических наук, заведующим кафедрой механики и инженерной графики, профессором Лазаревым Сергеем Ивановичем; доктором технических наук, заведующим кафедрой технологии и оборудования пищевых и химических производств Дворецким Дмитрием Станиславовичем, указала, что диссертация Хейн Тху Аунг «Комплексный подход к очистке водных сред Республики Союз Мьянма от ионов тяжелых металлов и алюминия» позволяет дополнить и расширить информацию о составе сточных вод предприятий в Республике Союз Мьянма, представлена информация об источниках эмиссии тяжелых металлов, алюминия и железа в окружающую среду, из чего хорошо видно, что для республики чрезвычайно актуальной задачей является очистка сточных вод от катионов (II и III), а также направление организации вторичного использования водных ресурсов (возврат оборотной воды).

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвященную решению важной, актуальной проблеме очистки сточных вод Республики Союз Мьянма от токсикантов и

канцерогенов. Результаты исследований позволят не только эффективно проводить удаление катионов различных металлов, что немаловажно для обеспечения экологической безопасности, но и заложить научную и практическую основу для организации цикла оборотного водоснабжения. Кроме того, при дальнейшем развитии темы возможна разработка методик утилизации образующихся отходов с получением ценных продуктов.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ по направлению исследований:

п.4. Способы и последовательность технологических операций и процессов переработки сырья, промежуточных и побочных продуктов, вторичных материальных ресурсов (отходов производства и потребления) в неорганические продукты.

п.5. Экологические проблемы создания неорганических материалов и изделий на их основе. Способы и последовательность технологических операций и процессов защиты окружающей среды от выбросов неорганических веществ.

п.6. Свойства сырья и материалов, закономерности технологических процессов для разработки, технологических расчетов, проектирования и управления химико-технологическими процессами и производствами.

По актуальности научной проблемы, научной новизне, теоретической и практической значимости, объему проведенных исследований, уровню обсуждения полученных результатов диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в действующей редакции).

На основании изложенного можно заключить, что Хейн Тху Аунг заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ.

Соискатель имеет 37 опубликованных работ, все по теме диссертации, из них 13 – в изданиях, индексируемых в международных научных базах Scopus и Chemical Abstracts, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 патента на изобретение, 26 тезисов докладов на международных и всероссийских научных конференциях. В диссертационной работе отсутствуют недостоверные материалы без ссылки на автора/соавтора и/или источник заимствования.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Konkova T.V. Effect of the medium composition on the extraction of chromium, aluminium and iron hydroxides from wastewater by electroflotation / T.V. Konkova, Z.H. Than, **T.A. Hein**, A.D. Stoyanova // *TsvetnyeMetally*. – 2022. – № 5. – P. 25-30. – DOI: 10.17580/tsm.2022.05.02 (Chemical Abstracts, Scopus)
2. **Хейн Тху Аунг**. Снижение эмиссии тяжелых металлов в водные объекты Республики Союз Мьянма методом электрофлотации / Хейн Тху Аунг // *Химическая промышленность сегодня*. – 2025. – № 2. – С. 77-82. (Chemical Abstracts)
3. **Hein Thu Aung**. Electroflotation extraction of a heavy metal hydroxide mixture from a multi-component solution / H. T. Aung, A.V. Kolesnikov, Yu. M. Averina, V.V. Chelnokov // *CIS Iron and Steel Review*. – 2024. – Vol. 28. – P. 99-103. (Scopus)
4. Аунг Пьяе. Электрофлотационное извлечение смеси ионов меди и цинка из водных растворов в присутствии NH_3 / П. Аунг, О.Ю. Колесникова, **Т.А. Хейн**, В.А. Колесников // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. – 2021. – Т. 64. – № 10. – С. 119-124. – DOI: org/10.6060/ivkkt.20216410.6322 (Chemical Abstracts, Scopus)

На автореферат диссертации поступили отзывы от: д.т.н., главного конструктора, заместителя генерального директора ГНЦ РФ АО «Государственный Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений» Ширина Латифовича Гусейнова; д.т.н., профессора,

заведующего кафедрой химии и химической технологии материалов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» Рудакова Олега Борисовича; д.т.н., профессора кафедры промышленной экологии «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» Мещерякова Станислава Васильевича; д.т.н., доцента, ведущего научного сотрудника «Лаборатории 4.2 «Комплексная переработка нетрадиционного минерального сырья», «Институт проблем комплексного освоения недр им. Академика Н.В. Мельникова РАН» Гольберга Григория Юрьевича; д.т.н., профессора, заведующего кафедрой фундаментальной и медицинской химии ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова» Аббаева Владимира Таймуразовича; д.т.н., ведущего эксперта-отдела развития научных знаний и наставничества Курчатовский комплекс физико-химических технологий ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Убаськиной Юлии Александровны; д.т.н., доцента, заведующего кафедрой промышленной экологии учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» Штепы Владимира Николаевича;

Все отзывы положительные. В качестве замечаний указано:

- В разделе, посвящённом электрофлотационной обработке водных растворов, не дано резюме по влиянию природы флокулянтов и поверхностно-активных веществ на физико-химические характеристики (размер и электрокинетический потенциал) дисперсной фазы малорастворимых соединений тяжёлых металлов и алюминия. Из текста автореферата не ясно, по какой причине в технологических схемах для снижения общего солесодержания растворов выбран обратный осмос, а не ионный обмен с анионитовыми и катионитовыми смолами, либо выпарка. В автореферате имеется неточность: на стр. 33 указано «очистка сточных вод горнодобывающей компании (рис.35)». В автореферате отсутствует рисунок с таким номером. Данному описанию соответствует рисунок 29

«Технологическая схема очистки многокомпонентных сточных вод горнодобывающего предприятия Республики Союз Мьянма». (Гусейнов Ш.Л.);

- Не конкретизированы характеристики аналитического контроля содержания катионов тяжелых металлов и алюминия в водных средах (какие методы, погрешность, число повторных измерений). Не совсем ясно, есть ли ограничения предложенных технологий очистки конкретных сточных вод (например, влияние органики, высоких концентраций). (Рудаков О. Б.);

- В автореферате недостаточно подробно представлены методики аналитического контроля: требуется указать пределы обнаружения и точность используемых методов, процедуры калибровки и оценки случайных/систематических погрешностей. При описании применённых сорбентов и реагентов полезно привести их основные физико-химические характеристики (площадь поверхности, химическая природа функциональных групп, молекулярная масса полимеров и т.п.), что повысит воспроизводимость и позволит сопоставлять результаты с данными других авторов. (Мещеряков С. В.);

- В автореферате не вполне раскрыто обоснование выбора реагента, образующего нерастворимые соединения с катионами металлов. Есть ли другие эффективные реагенты того же класса? В связи с этим было бы желательно привести значения произведения растворимости соединений металлов и указанного реагента. (Гольберг Г. Ю.);

- В автореферате отсутствует информация о процессах обезвреживания флотошлама. На графиках отсутствуют доверительные интервалы и пределы погрешностей. Автореферат содержит ряд опечаток и перегружен по объёму (38 стр.). (Абаев В. Т.);

- В автореферате диссертации замечены некоторые неточности и опечатки. (Убаськина Ю. А.);

- В п. 4 научной новизны (страница 5) декларируется «подбор оптимальных условий ... удаления активированного угля», при этом в

автореферате не представлен математический аппарат, на основе использования которого сделан вывод, что полученные значения являются оптимальными, как этого требует теория оптимальности. В п. 9 научной новизны (страница 6) возникает вопрос относительно отнесения к ней (научной новизне) «эффективных технических решений»? Почему «техническое решение» не отнесено к практической значимости диссертационного исследования? (Штепа В. Н.)

В целом диссертация соответствует паспорту заявленной научной специальности.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их богатым, многолетним опытом исследований и практической деятельности в сфере технологии неорганических веществ, промышленной экологии и безопасности, процессах и аппаратах химических технологий, а также процессах очистки сточных вод.

Приобретенные ими опыт и знания позволяют в полной мере определить научную и практическую значимость диссертации. Ведущая организация известна исследованиями, посвященными различным способам очистки сточных вод от тяжелых металлов (промывные воды гальванических и электрохимических производств).

Официальные оппоненты и ведущая организация не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что наиболее существенные научные результаты, полученные соискателем, и их научная новизна заключаются в следующем:

1. 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.

2. Определено, что при седиментации труднорастворимых соединений (гидроксидов) Fe^{+2} , Ni^{+2} , Zn^{+2} , Co^{+2} , Cu^{+2} , Fe^{3+} и Al^{3+} при совместном присутствии в среде ПАВ различной природы 95% двухзарядных катионов выпадают в осадок в системах с неионогенным ПАВ Синтанол и препаратом ОС-20 с фоновым электролитом Na_2SO_4 в щелочной среде. Трехзарядные катионы осаждаются максимально (96 % Fe^{3+} и 79 % Al^{3+}) в среде NaCl при $\text{pH}=7$ без добавок.

3. Для электрофлотационного удаления из водных сред катионов Fe^{3+} , Al^{3+} в отсутствии/присутствии щелочноземельных металлов впервые использованы активные (железный/алюминиевый) аноды. 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 $\text{pH}=7$ в хлоридном и сульфатном фонах (97 %), а добавление в систему анионного (натрия додецилсульфат - NaDDS) и катионного (СептаПАВ) ПАВ позволяет достичь показателя 99 %.

4. 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 $\text{pH}=7$. Максимальные характеристики извлечения достигаются при единовременном добавлении ПАВ и коагулянта, что обусловлено потерей агрегативной устойчивости дисперсной системы в результате взаимодействия компонентов, дисмеризма или сцепления частиц.

5. Установлены закономерности флотирования трехзарядных катионов (Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+}) с переменными характеристиками системы (ПАВ, pH, время, фоновый электролит) в присутствии солей жесткости водных сред. Определено, что ионы s-элементов отличаются от противоионов исходного двойного электрического слоя и при сжатии диффузного слоя происходит вытеснение противоионов из адсорбционного и диффузного слоев в объем раствора с последующей адсорбцией s-ионов, следовательно, увеличение значений α коррелирует с размерами ионов щелочноземельных металлов ($\text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$).

6. При исследовании процесса попарного и полного удаления катионов из двух- и трехкомпонентной водной систем (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}), путем совмещения флотации и постфлотационной фильтрации, с использованием Na_2SO_4 (электролит), катионных (КатаПАВ, СептаПАВ), анионных (додецилбензолсульфонат натрия - NaDBS) и неионогенных (ПЭО-1500) ПАВ, катионных (Zetag 8160) и анионных (ПЭО-1500) флокулянтов в широком интервале pH (8-11) и времени (5, 10, 20 минут) установлено, что Ni-Zn практически полностью переходят в дисперсную фазу (99 %) в системе без добавок (pH=9), Cu-Ni – соответственно 47 и 97 % (отсутствие добавок и pH=10), Cu-Zn (97 и 99 %) с СептаПАВ. Применение фильтрации позволяет извлечь 98-99 % катионов в каждом образце. Из всех изученных в идентичных условиях фоновых электролитов (Na_3PO_4 , NaNO_3 , NH_4OH , Na_2SO_4) наиболее эффективным является сульфатный: с Zetag 8160 при pH=11 и 20 минутах флотирования одновременно удаляются 98-99 % гидроксидов Cu, Ni и Zn.

7. Показана возможность очистки водных растворов от многокомпонентной системы (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+}) с добавкой различного количества Decorrda 40-80-2 с сульфатным фоновым электролитом в щелочной среде. Увеличение концентрации агента подавляет процесс электрофлотации: степень извлечения без добавок (94-98 %) намного выше, чем с Decorrda (41-61 %) при его максимальном содержании.

Введение катионного ПАВ (КатаПАВ) приводит к увеличению величин α (65-78 %). Сочетание фильтрации и флотации более эффективно – в водном растворе остаются не более 1-3 % ионов. Выбраны оптимальные условия электрофлотационного удаления с применением промышленных флотореагентов различного генезиса смеси двухзарядных катионов (Cu, Ni, Zn, Co, Fe) из водных сред с натрийсодержащими фоновыми электролитами (Na_2SO_4 , NaNO_3 , NaCl , Na_3PO_4 , Na_2CO_3) в интервале pH 8-11. В среде NaCl наиболее эффективными ПАВ являются анионные СТМх, обеспечивающий 99 % извлечение всех ионов, кроме Fe (73 %) и СТМл – 93-95 %, кроме Zn (85 %) при pH=11. Из органических добавок максимальная эффективность характерна для лака ФЛ-5111 с концентрацией 10 мг/л – в сульфатном фоне при pH=9 и 20 мин флотации удаляется 99 % гидроксидов металлов.

8. Впервые предложена ионообменная доочистка вод, прошедших первые две стадии (седиментация, электрофлотация), полимерным волокном. Определены его основные характеристики: изотермы сорбции, термодинамические параметры гидратации для двух- и трехзарядных катионов. Установлен механизм распределения кинетически неоднородной воды в ионных формах сорбента, выявлены доли связанных форм воды. Оптимизированы условия сорбции (температура, время, pH) аналитов. Предложен механизм взаимодействия катионов металлов и карбоксильных групп сорбента, подобрано оптимальное соотношение «объем раствора-масса навески волокна».

9. На основе полученных результатов предложены эффективные технические решения очистки сточных вод предприятий машиностроения и горнодобывающей промышленности Республики Союз Мьянма от ионов тяжелых металлов и алюминия.

Теоретическая и практическая значимость полученных соискателем результатов исследования подтверждается тем, что:

Теоретическая значимость работы связана с обоснованием физико-химических основ процессов комплексной очистки водных сред от двух-, трехзарядных катионов, состав которых идентичен сточным водам горнодобывающего и машиностроительного предприятий Республики союз Мьянма, поэтапной обработкой и оптимизацией условий ведения процесса с целью повышения эффективности извлечения ионов металлов на уровне 0,1-0,01 ПДК.

Практическая значимость работы обусловлена разработкой алгоритма поэтапного удаления тяжелых и цветных металлов из водных растворов, включающего 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.

Оценка достоверности результатов исследования показала, что обоснованность выводов основывается на применении современных физико-химических методов анализа, высокоточного оборудования и сертифицированных методик, множеством экспериментальных данных с высокой степенью их воспроизводимости. Установленные закономерности и описанные процессы не противоречат современным научным представлениям.

Личный вклад соискателя. В диссертации изложены результаты исследований, в которых автор принимал активное участие или выполнял самостоятельно. Авторская работа состоит в постановке цели и задач исследования, проведении литературного обзора, в обработке систематизации экспериментальных данных, формулировании основных выводов, положений и участии в подготовке публикаций.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» на кафедре

«Логистики и экономической информатики». По своему содержанию диссертация Хейн Тху Аунг отвечает паспорту специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ.

Направления исследований:

п.4. Способы и последовательность технологических операций и процессов переработки сырья, промежуточных и побочных продуктов, вторичных материальных ресурсов (отходов производства и потребления) в неорганические продукты;

п.5. Экологические проблемы создания неорганических материалов и изделий на их основе. Способы и последовательность технологических операций и процессов защиты окружающей среды от выбросов неорганических веществ;

п.6. Свойства сырья и материалов, закономерности технологических процессов для разработки, технологических расчетов, проектирования и управления химико-технологическими процессами и производствами.

Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для выполнения научных исследований и организации учебного процесса в научных и образовательных организациях различного уровня (РХТУ им Д.И. Менделеева, в курсах лекций по дисциплинам: «Основы процессов водоподготовки и очистки сточных вод», «Энергоресурсосбережение и экология электрохимических производств», «Водоочистка и регенерация технологических растворов на промышленных объектах», Военной Академии (DefenceServicesAcademy) г. Пьин У Лвин Республики Союз Мьянма и других научных организациях, занимающихся проблемами очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов).

В ходе защиты диссертации не было высказано критических замечаний, соискатель исчерпывающе ответил на вопросы, задаваемые ему в ходе заседания.

Диссертационным советом сделан вывод, что рассматриваемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая

соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013, (в действующей редакции).

На заседании 23.09.2025 диссертационный совет 24.2.312.04 принял решение присудить Хейн Тху Аунг ученую степень доктора технических наук по специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ за цикл исследований по разработке научно-обоснованных технических и технологических решений по комплексам физико-химических методов очистки сточных вод от катионов металлов, а разработанная технология позволяет эффективно очищать сточные воды предприятий машиностроения и горнодобывающей промышленности Республики Союз Мьянма от ионов тяжелых металлов и алюминия.

При проведении тайного голосования диссертационный совет 24.2.312.04 в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.6.7. Технология неорганических веществ (технические науки), участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовал: за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета,
д.х.н., профессор

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.х.н., доцент


А.Ф. Дресвянников
В. Межевич

24 сентября 2025г.