Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

На правах рукописи

АНДРЕЕВА СОФЬЯ ИННОКЕНТЬЕВНА

Сорбция скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания

2.6.8 Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена на кафедре технологии редких элементов и наноматериалов на их основе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» и в Научно-исследовательском отделе комплексной переработки сырья Акционерного общества «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Трошкина Ирина Дмитриевна,** профессор кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»
Научный консультант:	кандидат технических наук **Соловьев Алексей Александрович,** главный технолог управления по развитию технологий добычи и переработки полезных ископаемых Акционерного общества «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор **Блохин Александр Андреевич,** заведующий кафедрой химической технологии редких элементов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»
	кандидат химических наук **Пасечник Лилия Александровна,** ведущий научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

Защита состоится «03» декабря 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета РХТУ 2.6.04 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» по адресу: 125480 г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, корп. 1, конференц-зал имени академика В.А. Легасова ИМСЭН-ИФХ.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре и на официальном сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат диссертации разослан «__ __»_____2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
РХТУ.2.6.04, кандидат технических наук М.А. Вартанян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью повышения степени комплексности переработки российского уранового сырья, добываемого с применением метода скважинного подземного выщелачивания (СПВ), поскольку растворы СПВ характеризуются наличием сопутствующих ценных компонентов. К числу таких элементов относятся редкие и рассеянные металлы – скандий, рений, а также различные редкоземельные элементы (РЗЭ), представляющие значительный промышленный и стратегический интерес. Их совместное извлечение в рамках существующих технологических схем переработки уранового сырья существенно повышает эффективность использования минерально-сырьевой базы, что особенно актуально в условиях перехода к ресурсосберегающим технологиям.

Экономическая целесообразность вовлечения этих ценных компонентов в переработку обеспечивается тем, что основная часть производственных затрат уже покрывается за счет извлечения из недр основного целевого продукта – урана. В результате, получение редких и дорогостоящих элементов становится рентабельным при относительно небольших дополнительных инвестициях в технологическое оборудование и химические реагенты. Такой подход формирует предпосылки для создания производств комплексной переработки, способных максимально полно использовать потенциал природных ресурсов.

Особое внимание уделяется скандию – одному из сопутствующих ценных элементов, присутствующих в урановых рудах. Он используется для получения алюмо-скандиевых лигатур, которые значительно улучшают механические, коррозионные и эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов. Эти сплавы применяются в авиационной, космической, автомобильной промышленности, а также в производстве высокотехнологичного оборудования.

Однако, попутная добыча скандия из продуктов переработки продуктивных растворов выщелачивания урана, отличающихся его низким содержанием и наличием депрессирующих сорбцию примесей, представляет собой многостадийный технологический процесс по очистке и доведению его качества до товарных продуктов – оксида или фторида скандия. Альтернативный существующим осадительным методам – способ очистки скандия сорбцией с прямым осаждением целевого продукта из полученного десорбата может быть использован для этой цели.

Развитие технологий комплексного освоения уранового сырья с одновременным извлечением урана и сопутствующих редких элементов, в том числе скандия, соответствует приоритетному направлению современной минерально-сырьевой политики России. Это не только способствует повышению экономической эффективности отрасли, но и способствует рациональному природопользованию, укреплению ресурсной независимости страны и расширению её экспортного потенциала на мировом рынке редких металлов.

Степень разработанности темы.

Действующая в настоящее время на одном из российских предприятий подземного выщелачивания урановых руд, разработанная в УРФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, технология получения скандия из возвратных растворов сорбции урана включает сорбцию скандия ТВЭКС, десорбцию скандия из ТВЭКС раствором плавиковой кислоты и ряд гидрометаллургических операций осаждения и растворения чернового скандиевого

концентрата, сопровождающихся безвозвратными потерями скандия с фильтрационными и промывными растворами, нерастворимыми остатками и при последующей экстракции.

В открытых источниках отсутствуют сведения о разработке альтернативных эффективных сорбционных технологий извлечения скандия из плавиковокислых десорбатов, получаемых при десорбции насыщенного скандием ТВЭКС. В связи с этим разработка альтернативных подходов к извлечению скандия из указанных растворов является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы – разработка эффективной сорбционной технологии извлечения скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания.

Задачи работы:

1. Определение сорбционных характеристик слабоосновных анионообменных ионитов при извлечении скандия из плавиковокислых растворов (фтористоводородных десорбатов) комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания.
2. Установление основных закономерностей сорбции скандия и примесных элементов из плавиковокислых растворов на слабоосновном аниоките с первичными аминогруппами.
3. Определение условий промывки насыщенного анионита для очистки от примесных элементов и условий десорбции скандия из фазы насыщенного анионита с первичными аминогруппами.
4. Определение условий выделения скандия из фазы товарного десорбата, полученного при десорбции насыщенного скандием слабоосновного анионита.
5. На основании установленных закономерностей разработать блок-схему сорбционного извлечения скандия из плавиковокислых растворов с получением оксида и фторида скандия.
6. Проведение полупромышленных испытаний по извлечению скандия из плавиковокислых растворов, получаемых при его извлечении из растворов скважинного подземного выщелачивания урана с получением кондиционных оксида и фторида скандия.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Впервые изучены сорбционно-десорбционные характеристики слабоосновного анионита, содержащего первичные функциональные аминогруппы при извлечении скандия из плавиковокислых растворов, получаемых при извлечении скандия из растворов скважинного подземного выщелачивания урана.
2. Определены кинетические характеристики сорбции скандия слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами из плавиковокислых растворов, получаемых при извлечении скандия из растворов скважинного подземного выщелачивания урана: время полусорбции – 62,3 мин, константа скорости – $3{,}4 \cdot 10^{-2}$ г·мг$^{-1}$·мин$^{-1}$.
3. Определены динамические характеристики сорбции скандия слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами из плавиковокислых растворов, получаемых при извлечении скандия из растворов скважинного подземного выщелачивания урана: кинетический коэффициент сорбции – 0,14 ч, коэффициент концентрирования – 70,3, полная динамическая обменная емкость – 34,7 г/дм^3.
4. Определены оптимальные параметры кислотной промывки (4 н. р-р серной

кислоты при пропускании 3-4 колоночных объемов со скоростью – 1 К.О./ч) и карбонатной десорбции (для получения ScF_3 – раствор карбонат аммония 150 г/дм^3, соотношение 3–4:1; для получения Sc_2O_3 – раствор карбонат калия 300 г/дм^3, соотношение 5–6:1, при скорости – 1 К.О./ч), обеспечивающие высокую очистку от примесей и прямое получение кондиционных продуктов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Установлены закономерности и определены параметры сорбции скандия и примесных элементов из плавиковокислых растворов на слабоосновном аниоките с первичными аминогруппами.

2. Установлены закономерности и определены параметры десорбции скандия и примесных элементов из фазы насыщенного анионита с первичными аминогруппами.

3. Определены условия выделения скандия из карбонатного десорбата, полученного при десорбции насыщенного слабоосновного анионита.

4. Предложена блок-схема сорбционного извлечения скандия из плавиковокислых растворов с получением оксида и фторида скандия.

5. Проведены полупромышленные испытания по извлечению скандия из плавиковокислых растворов, получаемых при извлечении скандия из растворов скважинного подземного выщелачивания урана с получением кондиционных оксида и фторида скандия. Показана возможность многократного оборота плавиковокислого раствора без критического накопления примесей.

Новизна технического решения по выбору сорбционного материала с определенными функциональными аминогруппами подтверждена выдачей патента РФ № 2854951 с приоритетом от 26 июня 2024 г.

Методология и методы исследований. Методологическая основа диссертации представлена анализом современной научной литературы и общепринятыми методами проведения лабораторных экспериментов. В работе для анализа растворов применяли методы титриметрии, атомно-эмиссионной спектрометрии; для изучения свойств сорбентов – ИК-Фурье спектрометрию.

Положения, выносимые на защиту:

1. Сорбционные характеристики ионитов при извлечении скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки растворов скважинного подземного выщелачивания урана, содержащих примесные элементы.

2. Результаты математической обработки равновесных, кинетических и динамических данных по сорбции скандия слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами из плавиковокислых растворов, полученных при комплексной переработке урановых руд методом подземного выщелачивания.

3. Результаты полупромышленных испытаний и блок-схем по извлечению скандия из плавиковокислых растворов с получением кондиционных оксида и фторида скандия.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на III Международной научно-практической конференции «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение (РЕДМЕТ-2024)» (Москва, 2024 г.); XXIX Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», проводимой в рамках XXII Уральской горнопромышленной декады (Екатеринбург, 2024 г.); XI

Международной научно-практической конференции «Развитие урановой и редкометалльной промышленности» (Алматы, 2024); XII Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы – 2024» (Красноярск, 2024 г.); VI Международном симпозиуме «Фундаментальные вопросы геологии, добычи, разделения редких, редкоземельных, благородных металлов и создания современных материалов на их основе» (Якутск, 2024); в Открытом конкурсе на лучший научно-технический доклад среди молодых работников и студентов ключевых вузов Росатома (Москва, 2024); на XXX Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», проводимой в рамках XXIII Уральской горнопромышленной декады (Екатеринбург, 2025 г.); VI Международном симпозиуме материалам и технологиям здравоохранения, энерго- и биобезопасности, рациональному природопользованию (Южно-Сахалинск, 2025); Международном конгрессе по редким металлам, материалам и технологиям «РЕДМЕТ-2026» (Москва, 2026 г.).

Личный вклад автора. Автор работы принимал непосредственное участие в планировании, постановке методик эксперимента, аналитическом контроле содержания скандия и сопутствующих примесных элементов, выборе ионообменных материалов, изучении их характеристик и проведении лабораторных и полупромышленных испытаний сорбционного извлечения скандия, подготовке и оформлении материалов исследований для публикации в научных изданиях и представлении результатов исследований в виде докладов на конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе в изданиях из перечня ВАК – 1 статья, в журналах, входящих в базы данных научного цитирования Scopus – 2 статьи, в материалах и тезисах конференций – 9. Получен 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 45 таблиц, 30 рисунков, три приложения. Список литературы включает 172 работы отечественных и зарубежных авторов.

Автор выражает благодарность сотрудникам Акционерного общества «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» и работникам Акционерного общества «Далур» за помощь в организации и проведении испытаний по сорбции скандия из плавиковокислых скандийсодержащих растворов (фтористоводородных десорбатов) участка комплексной переработки растворов подземного выщелачивания урана.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации работы.

В литературном обзоре (глава 1) осуществлен анализ данных, характеризующих текущее состояние исследований, направленных на освоение и переработку скандийсодержащего сырья. Установлено, что для извлечения скандия из различных скандийсодержащих сырьевых источников применяется комплекс гидрометаллургических технологий, включающий сорбционный, экстракционный, осадительный и другие методы выделения и концентрирования. Сведения, касающиеся сорбционного извлечения скандия из

плавиковокислых растворов, в доступных источниках крайне ограничены и требуют дальнейшего изучения.

В методической части (глава 2) дана характеристика используемых материалов и реактивов, описаны основные методы проведения анализов и исследований, приведены уравнения для математической обработки экспериментальных данных по сорбции. Анализ скандия и примесных элементов в растворах осуществляли методом ICP-AES (Спектрометр атомно-эмисионный с индуктивно-связанной плазмой Vista Pro, Varian Optical Spectroskopy Instrument, Австралия). Концентрацию кислоты определяли с помощью потенциометра pH-метра «SevenEasy pH» (компания «Mettler Toledo»). ИК-спектры сорбентов снимали с использованием ИК-Фурье спектрометра Nicolet 380 (Thermo Scientific, США).

Характеристики исходных материалов. В работе использовали производственные плавиковокислые растворы (фтористоводородные десорбаты), полученные при извлечении скандия из растворов скважинного подземного выщелачивания урана после десорбции ТВЭКС следующего усредненного элементного состава, мг/дм^3: 492 Sc; 0,35 Th; 72,5 U; 287 Si; 2200 Fe; 364 Ti; 478 Mo; 52,3 Al; 755 Na; 83 000 F. Для сорбции скандия из плавиковокислых растворов (фтористоводородных десорбатов) применяли слабоосновные аниониты различной функциональности, основные характеристики некоторых из них представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики слабоосновных анионитов

Анионит	Структура	Матрица	Функциональная группа	Полная обменная емкость (ПОЕ), мг·экв/см^3
Seplite CT20	Пористая	Стирол-дивинилбензол	Первичный амин	2,4
Purolite A110				2,2
Purolite S984		Акрилатная	Полиаминная	2,6
Россион 25				2,5
Purolite A100		Полистирол	Третичный амин (преимущественно)	1,3
Purolite A170		Стирол-дивинилбензол	Вторичный амин	1,1

В главе 3 представлены результаты по сорбционному извлечению скандия из плавиковокислого раствора с использованием различных аминных слабоосновных анионитов. В работе использовали аниониты Россион 25 (далее – Р-25), Purolite S984 (далее – S984) и анионит Purolite A110 (далее – A110).

Интегральные выходные кривые сорбции скандия слабоосновными анионитами из плавиковокислого раствора при скорости пропускания 2 К.О./ч ((V/V_0)/ч) для анионитов Россион 25 и Purolite S984 и 1,6 К.О./ч для анионита Purolite A110 в пересчете на рабочий объем анионита в растворе фтористоводородной кислоты представлены на рисунке 1.

Динамические емкостные характеристики по скандию и примесным элементам слабоосновных анионитов представлены в таблице 2. Дополнительно при аналогичных условиях сорбции без снятия выходной кривой приведены емкостные характеристики анионитов Purolite A170 и A100.

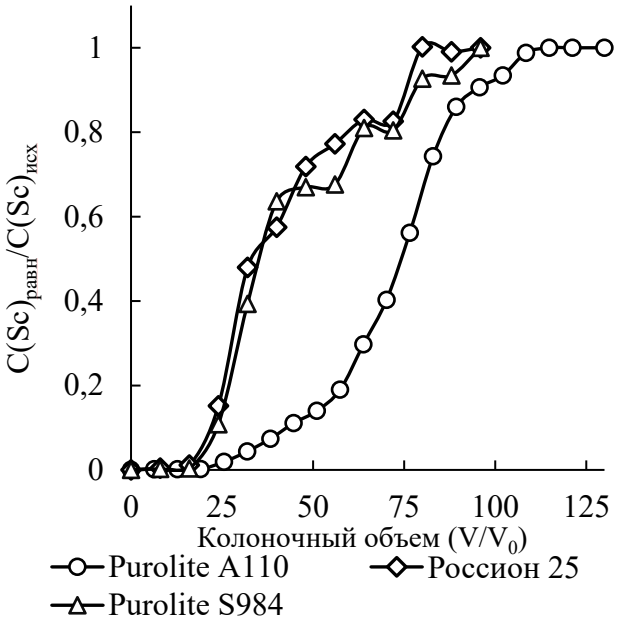


Рисунок 1 – Интегральные выходные кривые сорбции скандия из плавиковокислого раствора слабоосновными анионитами (концентрация скандия в растворе – 492 мг/дм^3)

Таблица 2 – Динамические емкостные характеристики слабоосновных анионитов при сорбции скандия из плавиковокислых растворов

Анионит	Содержание в ионите, г/дм^3				ПОЕ по первичным аминогруппам, мг·экв/см^3	Функциональная группа
	Sc*	Fe	Ti	Mo		
Purolite A110	34,6	1,9	2,0	3,7	2,2	Первичный амин
Россион 25	23,6	2,7	5,9	6,9	1,3	Полиаминная
Purolite S984	25,0	4,1	8,7	8,6	0,7	
Purolite A170	3,25	-	-	-	<0,01	Вторичный амин
Purolite A100	0,83	-	-	-	<0,01	Третичный амин

*– полная динамическая обменная емкость (ПДОЕ) анионитов по целевому компоненту

Значительно эффективнее сорбирует скандий анионит Purolite A110, при насыщении отмечается меньшее содержание тория и других примесных элементов сравнительно с полиаминными низкоосновными анионитами Россион 25 и Purolite S984. Причем, содержание примесей в анионите Россион 25 меньше, чем в анионите Purolite S984. Это связано с тем, что содержание вторичных и третичных аминогрупп по отношению к первичным в анионите Россион 25 меньше, чем в анионите Purolite S984.

На основании полученных данных для дальнейших исследований был выбран анионит Purolite A110, содержащий в качестве функциональной группы первичный амин. Для выбранного образца анионита был подобран более доступный аналог промышленного производства – Seplite CT20 (производство «SUNRESIN», Китай), обладающий аналогичными сравнительными физико-химическими характеристиками. Образец ионита использовали для дальнейших испытаний по сорбции скандия из плавиковокислых растворов.

Методом переменных объемов получена изотерма сорбции скандия (рисунок 2) слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами (Seplite CT20).

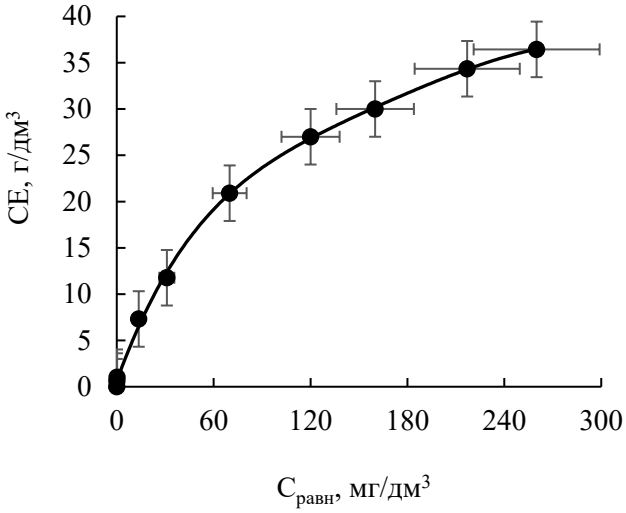


Рисунок 2 – Изотерма сорбции скандия слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами (Seplite CT20) из плавиковокислого раствора

Обработка данных изотермы по уравнению Ленгмюра позволила определить константу сорбционного равновесия и максимальную сорбционную емкость, значение которых составило $0{,}052 \cdot 10^3$ л/г и 71,2 г/г соответственно.

Обработку кинетических данных сорбции скандия слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами (Seplite CT20), при которых время полусорбции составило – 62,3 мин, осуществляли по известным моделям (таблица 3). Согласно моделям Вебера-Морриса и Бойда-Адамса-Майерса, сорбция лимитируется внутренней и внешней диффузией соответственно. Основным условием для этих моделей является пересечение линии линеаризации с нулевой точкой. В случае описания процесса сорбции скандия для двух моделей данное условие не соблюдается. В связи с этим, а также с более высокими коэффициентами корреляции, полученными по моделям псевдопервого и псевдовторого порядка, можно заключить, что лимитирующей стадией процесса является химическая реакция между сорбируемым ионом скандия и функциональными группами анионита.

Таблица 3 – Значения констант скоростей сорбции скандия слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами

Модель	R^2	Параметр	Значение
Модель псевдопервого порядка	0,9750	k_1, $мин^{-1} \cdot 10^3$	0,8
Модель псевдовторого порядка	0,9914	k_2, $г \cdot мг^{-1} \cdot мин^{-1}$	0,034
Модель Еловича	0,9846	β, $г \cdot мг^{-1}$	0,20
Модель внутренней диффузии (Вебера-Мориса)	0,9554	$k_р$, $мг \cdot ^{г-1} \cdot мин^{-0,5}$	0,56
Модель внешнедиффузионной кинетики (Бойда-Адамса-Майерса)	0,7975	β, $мг \cdot г^{-1} \cdot 10^6$	4,24

Однако, на начальном этапе сорбции заметный вклад может вносить также внешняя (пленочная) диффузия через граничный слой жидкости, поскольку модель Бойда–Адамса–Майерса хотя и имеет низкий коэффициент корреляции ($R^2 = 0{,}7975$), но именно для этой

модели характерно невыполнение условия прохождения линии через нулевую точку, что типично для вклада пленочной диффузии на начальной стадии.

Выходные кривые сорбции скандия и сопутствующих примесных элементов слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами (Seplite CT20) при скорости пропускания раствора 1,6 К.О./ч показаны на рисунке 4.

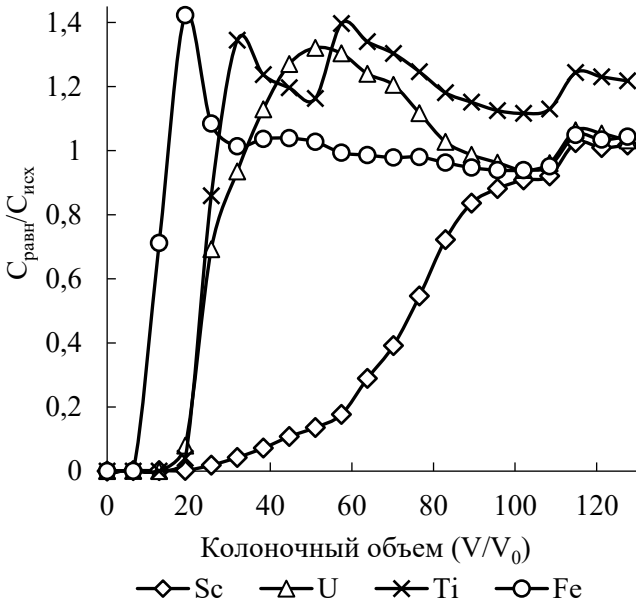


Рисунок 4 – Интегральные выходные кривые сорбции скандия и примесных элементов слабоосновным анионитом Seplite CT20 из плавиковокислого раствора (концентрация скандия в растворе – 492 мг/дм^3)

На начальном этапе процесса анионит преимущественно сорбирует примесные компоненты. По мере пропускания раствора происходит вытеснение этих примесей ионом скандия, обладающим более высоким сродством к функциональным группам сорбента. Таким образом, скорость достижения полной обменной ёмкости по скандию в значительной степени определяется кинетикой вытеснения ранее сорбированных примесей. Емкостные характеристики насыщенного анионита отражены в таблице 4.

Таблица 4 – Содержание скандия и примесных металлов в насыщенном анионите

Содержание в ионите,											
г/дм^3						мг/дм^3					
Sc	Fe	Ti	Mo	Al	Na	Th	U	Zr	Si	Ca	Mg
34,7	1,9	2,0	3,7	1,4	1,7	30,6	160	74,8	17,0	214	133

Динамические характеристики сорбции скандия слабоосновным анионитом Seplite CT20 представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Динамические характеристики сорбции скандия слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами Seplite CT20

ПДОЕ		Количество удельных объемов (К.О.) до полного насыщения ионита	Рабочее время сорбции, ч	Коэффициент концентрирования	Кинетический коэффициент сорбции β, ч
г/дм^3	г/г				
34,7	76,3	109	63,8	70,3	0,14

Методом ИК-спектроскопии изучены структурные изменения слабоосновного анионита на основе стирол-дивинилбензольного сополимера с первичными аминогруппами в процессе сорбции скандия из плавиковокислых растворов (83 г/дм^3 HF). В спектре исходного анионита в товарной форме наблюдаются характерные полосы валентных колебаний свободных первичных аминогрупп –NH_2 при 3285 и 3356 см$^{-1}$. При переводе анионита в фторидную форму появляется широкая полоса растяжения N–H в протонированной форме –NH_3^+ при 2630 см$^{-1}$, а также полосы в области 420–467 см$^{-1}$, соответствующие водородным связям N–H…F$^-$. При насыщении анионита скандием в спектре регистрируется интенсивный пик при 447 см$^{-1}$, отнесённый к валентным колебаниям Sc–F в комплексном анионе $[ScF_6]^{3-}$. Полученные данные подтверждают анионообменную реакцию сорбции с участием гексафтороскандат-аниона согласно уравнению:

$$3R–NH_3F + H_3[ScF_6] \longrightarrow (R–NH_3)_3[ScF_6] + 3HF,$$

что согласуется с литературными данными по поведению комплекса $[ScF_6]^{3-}$ в концентрированных фторидных растворах.

В главе 4 приведены результаты операций отмывки и десорбции насыщенного скандием анионита.

При изучении промывки насыщенного анионита от сопутствующих примесных элементов (таких как железо, титан, алюминий и др.) определены оптимальные параметры ведения процесса. Так, при промывке серной или азотной кислотой (рисунок 5), объемное соотношение промывного раствора кислоты и насыщенного анионита 3-4:1 при концентрации кислоты в 4 н. выбрано как оптимальное для очистки скандия от примесей при минимизации потерь скандия с промывным раствором. При этом использование серной кислоты на стадии кислотной промывки насыщенного слабоосновного анионита технологически и экономически оправдано, поскольку образующиеся промывные растворы серной кислоты могут быть направлены в оборот процесса скважинного подземного выщелачивания (СПВ) урана без дополнительной корректировки состава, что позволяет минимизировать расход реагентов и снизить объемы жидких отходов.

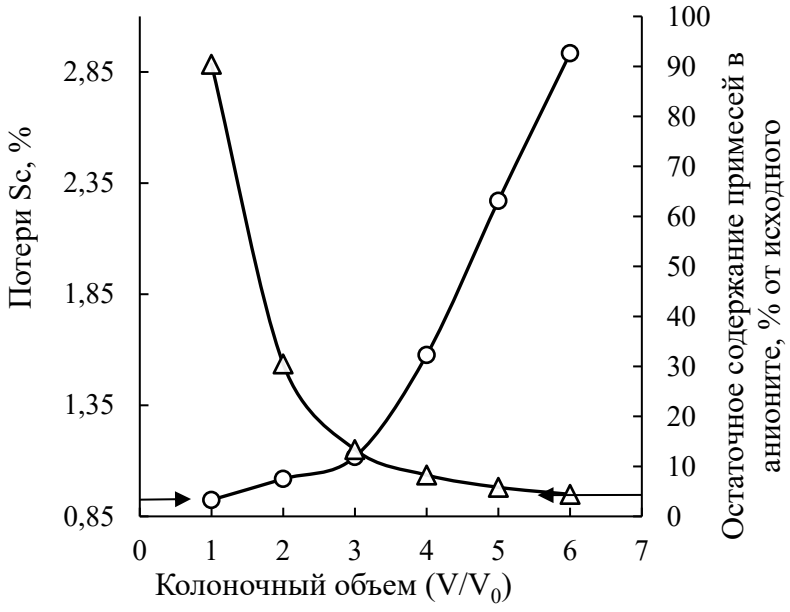


Рисунок 5 – Влияние соотношения объемов промывного раствора кислоты (4 н.) и насыщенного слабоосновного анионита (Seplite CT20) на эффективность отмывки насыщенного анионита от примесей и величину потерь скандия на операции

Экспериментальные данные по десорбции скандия из фазы насыщенного анионита марки Seplite CT20 получены при скорости пропускания раствора – 1 К.О./ч в верхнюю часть сорбционной колонны (рисунки 6, 7).

При необходимости получения фторида скандия десорбцию скандия из анионита ведут раствором карбоната аммония. Необходимая и достаточная концентрация карбоната аммония в десорбирующем растворе составляет 150 г/дм^3, а соотношение объемов десорбирующего раствора и анионита 3-4:1. В этом случае степень извлечения скандия из насыщенного анионита в десорбат составляет более 99,8 %, а содержание скандия в десорбате – 8-12 г/дм^3. При уменьшении содержания карбоната аммония в десорбирующем растворе до 100 г/дм^3 в первых фракциях десорбата наблюдается образование нерастворимого осадка, что приводит к технологическим затруднениям при ведении процесса.

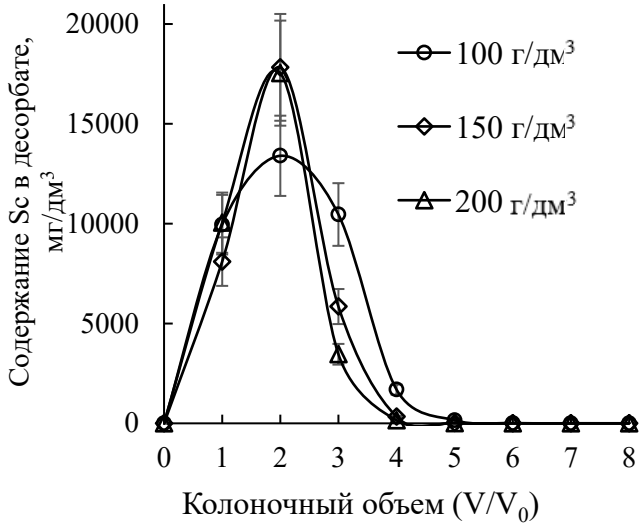


Рисунок 6 – Интегральные кривые десорбции скандия из анионита Seplite CT20 карбонатом аммония

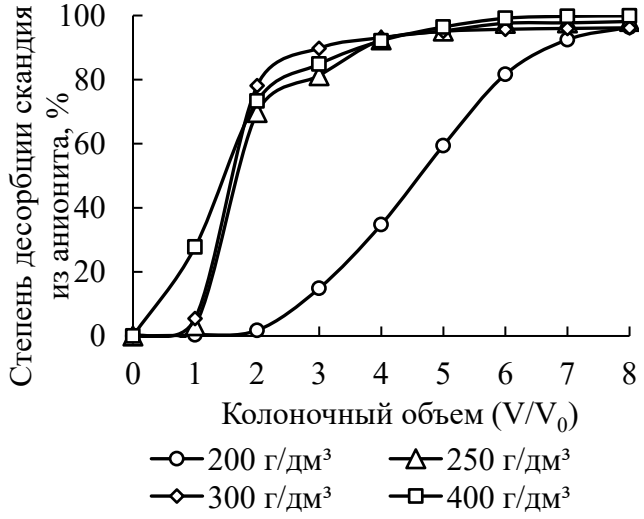


Рисунок 7 – Зависимость эффективности десорбции скандия из анионита Seplite CT20 карбонатом калия от концентрации раствора карбоната калия и соотношения объемов ионита и раствора карбоната калия

При необходимости получения оксида скандия десорбцию скандия из анионита ведут раствором карбоната калия. При десорбции скандия раствором карбоната калия необходимая концентрация по соли в десорбирующем растворе составляет 300 г/дм^3, а соотношение объемов десорбирующего раствора и анионита 5–6:1. В этом случае степень извлечения скандия из насыщенного анионита в десорбат составляет более 95 %, а содержание скандия в десорбате – 5–6 г/дм^3. При уменьшении концентрации карбоната калия в растворе или

уменьшении объемного соотношения десорбирующего раствора и анионита десорбция скандия из анионита проходит не полностью. Увеличение концентрации карбоната калия в растворе приводит к увеличению расхода карбоната калия. Увеличение объемного соотношения десорбирующего раствора и анионита приводит к разубоживанию десорбата по скандию.

В главе 5 отражены результаты подбора оптимальных условий осаждения скандия из карбонатных десорбатов, которые обеспечивают высокую степень извлечения и получение кондиционного осадка. Установлено влияние основных технологических параметров процесса на полноту осаждения и состав образующихся соединений, что позволило повысить эффективность выделения скандия из растворов. Разработаны условия прямого осаждения ScF_3 из аммонийно-карбонатного десорбата (подкисление до 1 н. по серной кислоте) и смеси Sc_2O_3 и $Sc(OH)_3$ из калийно-карбонатного десорбата (защелачивание до избыточного содержания KOH – 10 г/дм^3). Полученный образец смеси оксида и гидроксида скандия на основании действующего регламента АО «Далур» конверсией перевели в кондиционный оксид скандия с помощью оксалатного переосаждения и последующей прокалки до получения оксида скандия. Полученные продукты удовлетворяют требованиям потребителей (ScF_3 – ОК «РУСАЛ», Sc_2O_3 после оксалатной очистки и прокалки – ОС-99,9 (ТУ 95.148-77)).

Глава 6. На основании результатов, полученных в работе, проведены полупромышленные циклические испытания с оборотом плавиковокислого раствора на этап десорбции ТВЭКС и последующей сорбцией скандия из плавиковокислых растворов слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами. Полученные данные подтвердили накопление примесей в оборотном растворе, идущем на сорбцию скандия анионитом, однако к окончанию циклических испытаний интенсивность увеличения содержания большинства примесей снизилась (Таблица 6), что подтверждает возможность оборота плавиковокислого раствора после сорбции скандия на этап десорбции ТВЭКС.

В ходе полупромышленных циклических испытаний подтверждены емкостные характеристики используемого сорбента. С увеличением цикла емкость слабоосновного анионита с первичными аминогруппами Seplite CT20 составила – не менее 29,4 г/дм^3.

Таблица 6 – Содержание скандия и примесей в плавиковокислых десорбатах ТВЭКС, полученных при циклических испытаниях и направленных на сорбцию скандия анионитом

№ цикла	Содержание элементов в фтористоводородном десорбате, мг/дм^3												г/дм^3
	Fe	Sc	Al	Ca	Mg	Mo	Na	Th	Ti	U	Zr	Mn	F
1	3670	321	58,7	12,5	5,5	268	287	0,19	340	108	10,7	1,0	86,5
2	4610	426	69,0	20,8	18,5	271	321	0,27	326	139	15,6	1,2	84,6
3	7110	466	91,6	19,6	11,9	394	299	1,5	549	145	17,4	1,7	89,8
4	9870	470	76,0	11,6	11,1	441	201	2,2	635	195	18,6	1,7	86,6
5	9700	501	102	15,3	12,0	495	198	2,1	741	163	21,8	2,3	73,0
6	10410	489	114	22,9	17,7	487	241	2,4	748	148	22,4	3,0	88,8

При проведении полупромышленных испытаний в последнем цикле получены образцы трифторида и оксида скандия (таблицы 7 и 8).

Таблица 7 – Состав полученного в ходе полупромышленных сорбционных испытаний трифторида скандия (ScF_3)

Элемент	Содержание во фториде скандия, %	
	Полученный трифторид скандия	Требования ОК «Русал»
Sc	39,81	>35
Fe	0,007	<0,1
Mg	0,023	<0,1
Ti	<0,001	<0,1
Si	0,025	<0,1
Zr	<0,001	<0,05
Ca	0,008	<0,5
Th	0,008	нет данных
U	<0,001	нет данных

Таблица 8 – Состав полученных в ходе полупромышленных сорбционных испытаний образца смеси оксида и гидроксида скандия (оксигидроксида) и очищенного оксида скандия

Соединение	Содержание, %			
	Полученный оксигидроксид скандия	Оксид скандия после однократной оксалатной очистки оксигидроксида скандия	Требования к оксиду скандия ТУ 95.148-77	
			ОС-99,9	ОС-99,0
Sc_2O_3	99,51	99,97	99,9	99,0
Al_2O_3	0,037	<0,001	0,003	0,01
CuO	<0,002	<0,001	0,005	0,01
Fe_2O_3	0,044	0,003	0,005	0,05
MgO	0,022	<0,001	0,003	0,01
MnO_2	<0,001	<0,001	0,003	0,01
P_2O_5	0,006	0,005	0,010	0,02
TiO_2	0,243	<0,001	0,005	0,05
SiO_2	<0,003	<0,001	0,010	0,05
Y_2O_3	0,015	0,002	0,005	0,05
Yb_2O_3	0,006	<0,001	0,005	0,05
ZrO_2	0,002	<0,001	0,005	0,1
CaO	0,080	0,005	0,010	0,05
ThO_2	0,030	0,007	0,01*	нет данных

* – требования к СкО-3 (ТУ 48-4-417-87)

На основании полученных результатов **с**оставлены блок-схемы технологических процессов получения ScF_3 и $Sc(OH)_3$ (рисунки 8 и 9).

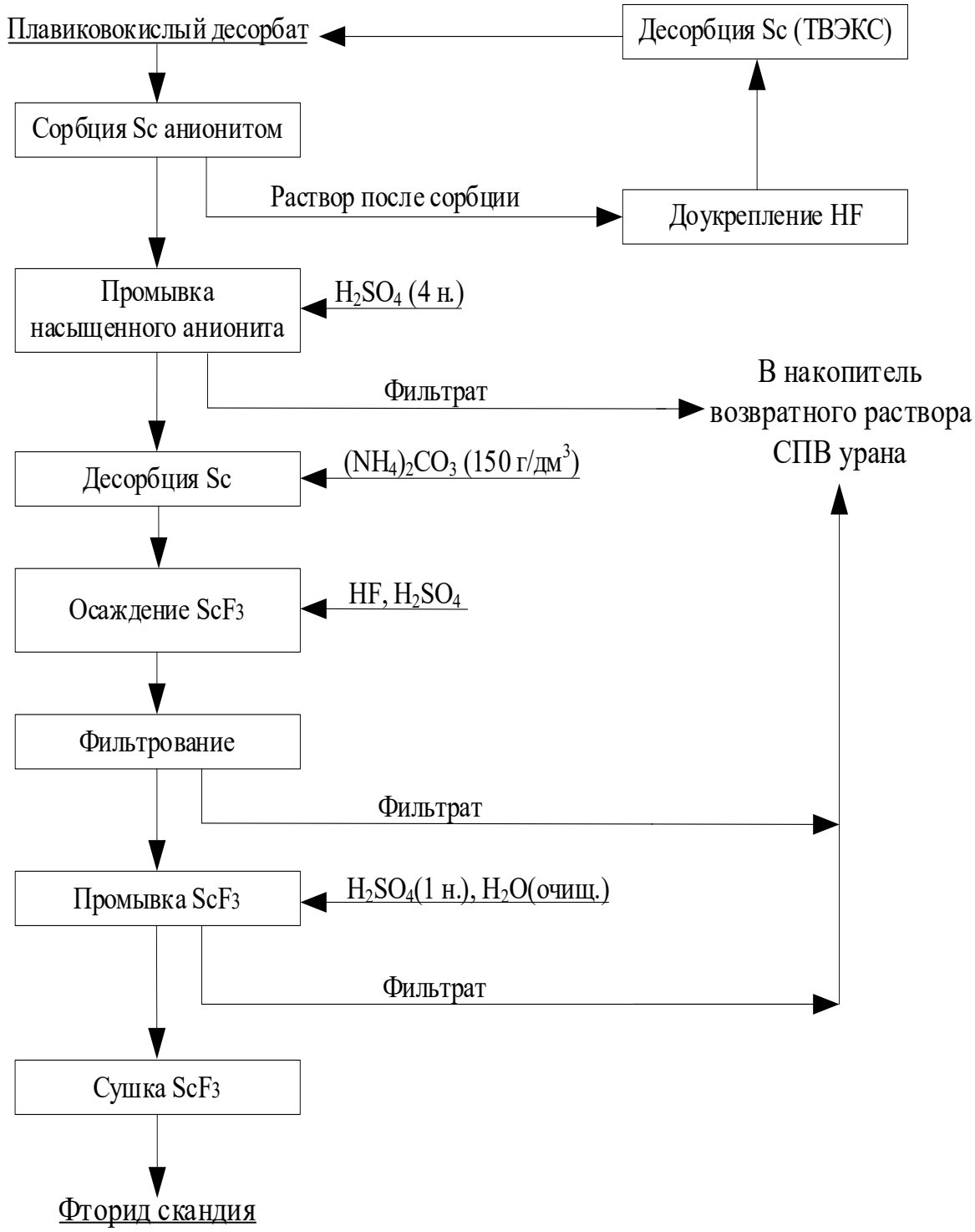


Рисунок 8 – Принципиальная блок-схема сорбционного извлечения скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания с получением трифторида скандия

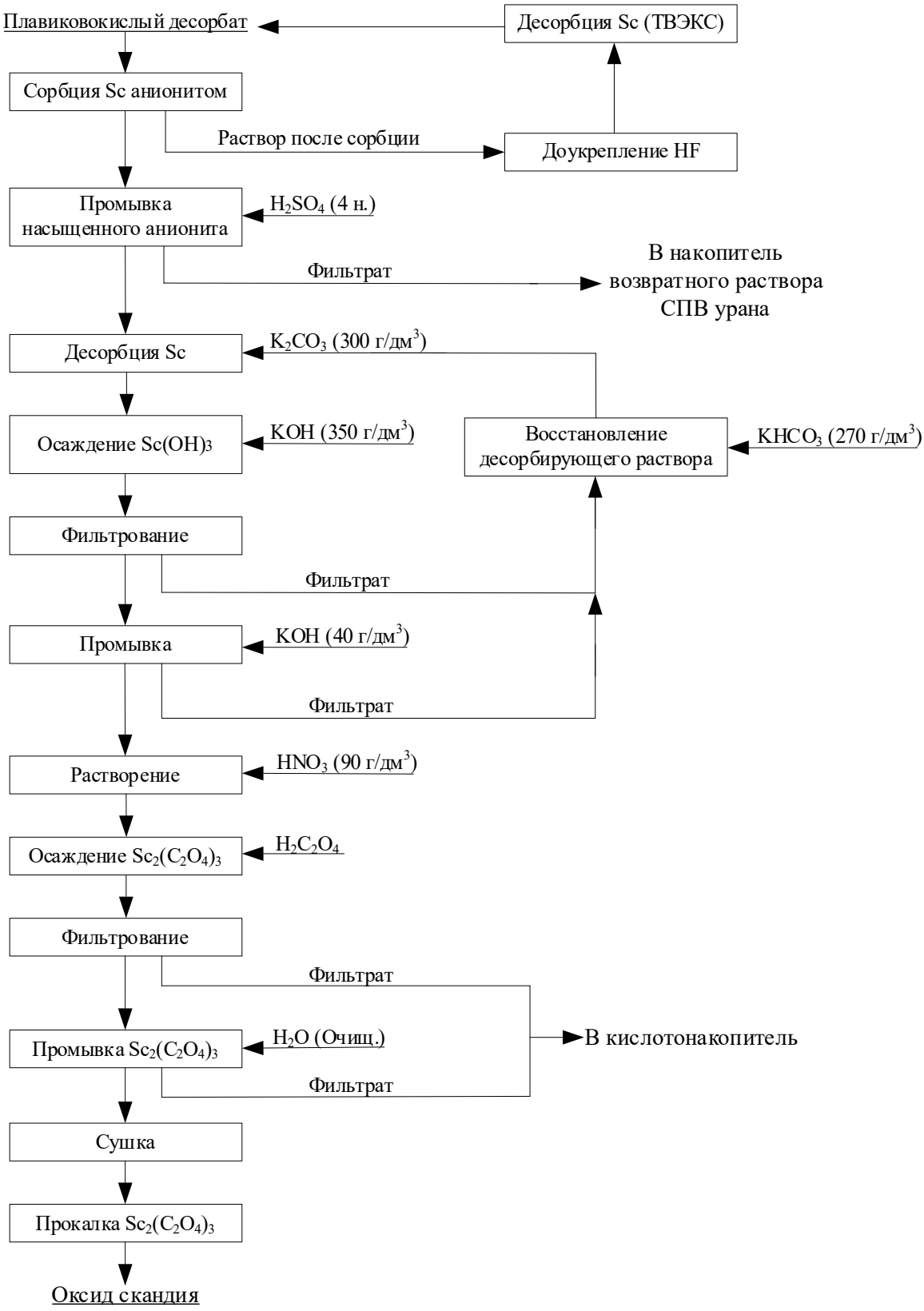


Рисунок 9 – Принципиальная блок-схема сорбционного извлечения скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания с получением оксида скандия

Оценена возможность извлечения скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания с использованием слабоосновного анионита с первичными аминогруппами Seplite CT20.

Расчетные эксплуатационные расходы при получении фторида скандия составляют 30,6 млн руб./год при прибыли 28,6 млн руб./год и рентабельности 48,3 %. Для варианта получения Sc_2O_3 эксплуатационные затраты возрастают до 33,5 млн руб./год вследствие увеличения числа технологических операций, расхода реагентов и энергопотребления, что снижает прибыль до 20,7 млн руб./год и рентабельность до 38,2 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований, направленных на сорбционное извлечение скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания, выявлен тип сорбента, обладающий лучшими емкостными характеристиками: слабоосновный анионит с первичными аминогруппами – Seplite CT20.

Выводы:

1. Впервые изучены сорбционно-десорбционные характеристики слабоосновного анионита с первичными аминогруппами (Seplite CT20) при извлечении скандия из плавиковокислых (фтористоводородных) растворов, получаемых при комплексной переработке урановых руд методом скважинного подземного выщелачивания; показано преимущество этого сорбента в сравнении с полиаминными анионитами по динамической обменной ёмкости и селективности.
2. По выходным кривым сорбции в динамических условиях установлено, что на начальном этапе анионит преимущественно сорбирует примесные компоненты (Fe, Ti, Mo и др.), которые затем вытесняются ионом скандия, обладающим большим сродством к первичным аминогруппам. Скорость достижения полной обменной ёмкости по скандию определяется кинетикой вытеснения ранее сорбированных примесей.
3. Получены интегральные кривые сорбции скандия и примесей, определены динамические характеристики сорбции скандия: полная динамическая обменная ёмкость – 34,7 г/дм^3, коэффициент концентрирования – 70,3, кинетический коэффициент сорбции – 0,14 ч.
4. Установлены оптимальные условия кислотной промывки насыщенного анионита (концентрация кислоты 4 н., объёмное соотношение промывного раствора к аниониту 3–4:1) и карбонатной десорбции (для получения ScF_3 – раствор карбоната аммония 150 г/дм^3, соотношение 3–4:1; для получения Sc_2O_3 – раствор карбоната калия 300 г/дм^3, соотношение 5–6:1), обеспечивающие высокую очистку от примесей и получение кондиционных продуктов.
5. Разработаны условия осаждения кондиционного трифторида скандия (ScF_3) из аммонийно-карбонатного десорбата и осаждения смеси оксида и гидроксида скандия (Sc_2O_3, $Sc(OH)_3$) из калийно-карбонатного десорбата с последующей конверсией в оксид скандия. Полученные продукты соответствуют требованиям потребителей (ОК «РУСАЛ» и ТУ 95.148–77).
6. Предложена и апробирована в полупромышленном масштабе (с проведением циклических испытаний) технологическая схема сорбционного извлечения скандия из плавиковокислых растворов с получением кондиционных трифторида и оксида скандия. Подтверждена

возможность многократного оборота плавиковокислого раствора без существенного накопления примесей и высокая технико-экономическая эффективность процесса.

7. Установлено, что получение трифторида скандия (ScF_3) является более экономически выгодным вариантом переработки скандиевого десорбата по сравнению с получением оксида скандия (Sc_2O_3), что обусловлено более высокой степенью извлечения скандия, меньшими эксплуатационными затратами и более высокой рентабельностью процесса (48,3 % против 38,2 %).

Полученные научные результаты по выбору и применению слабоосновного анионита с первичными аминогруппами Seplite CT20 могут быть использованы для извлечения скандия из плавиковокислых растворов комплексной переработки урановых руд методом подземного выщелачивания. Перспективы практического использования результатов работы связаны с получением товарных продуктов (трифторида и оксида скандия) при внедрении разработанного способа извлечения скандия при комплексной переработке урановых руд методом подземного выщелачивания.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ:

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Татарников А.В., Михайленко М.А., Мешков Е.Ю., Андреева С.И. Изучение некоторых фосфорсодержащих ионитов применительно к гидрометаллургии редкоземельных металлов // Цветные металлы. – 2023. – № 6. – С. 25-30. – DOI: 10.17580/tsm.2023.06.03. (Scopus).

2. Андреева С.И., Татарников А.В., Мешков Е.Ю., Бобыренко Н.А., Лавров А.С., Трошкина И.Д. Гидрометаллургические методы селективного извлечения скандия из возвратных растворов скважинного подземного выщелачивания урана: наука и производство // Горный журнал. – 2026. – № 8. – С. 87-93. – DOI: 10.17580/gzh.2026.08.08. (Scopus)

Публикации в рецензируемых журналах:

1. Татарников А.В., Андреева С.И., Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Трошкина И.Д., Лавров А.С. Сорбционная переработка скандийсодержащего раствора уранового производства слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2025. – № 39. – С. 42-56. – DOI: 10.17223/24135542/39/3. (ВАК).

Патент:

2. Патент № 2854951 C2 Российская Федерация, МПК C22B 59/00, C22B 3/24, C01F 17/13, C01F 17/212, C01F 17/253. Способ переработки скандийсодержащего раствора уранового производства: № 2024118203: заявл. 26.06.2024: опубл. 22.01.2026 / Д.О. Ежуров, А.С. Лавров, С.И. Андреева, Е.Ю. Мешков, А.А. Соловьев, А.В. Татарников; заявитель Акционерное общество "Далур".

Публичные доклады на международных и российских научных мероприятиях:

1. Мешков Е.Ю., Татарников А.В., Чернобровкин Н.А., Соловьев А.А., Андреева С.И., Трошкина И.Д., Бояркина Е.С. Сорбция урана из сернокислых растворов скважинного подземного выщелачивания в присутствии депрессирующих примесей // Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение (РЕДМЕТ-2024). Сборник тезисов 3-ей Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика Н.П. Сажина. – Москва, 2024. – С. 83-84.

2. Андреева С.И., Татарников А.В., Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Трошкина И.Д. Осаждение кондиционного трифторида скандия из карбонатных десорбатов при переработке технологических растворов сорбции урана // Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение (РЕДМЕТ-2024). Сборник тезисов 3-ей Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика Н.П. Сажина. – Москва, 2024. – С. 33-34.

3. Андреева С.И., Татарников А.В., Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Трошкина И.Д. Получение кондиционного трифторида скандия из плавиковокислого раствора десорбции ТВЭКС // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. материалы XXIX Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXII Уральской горнопромышленной декады 01-10 апреля 2024 г. – Екатеринбург, 2024. – С. 267-270.

4. Соловьев А.А., Татарников А.В., Мешков Е.Ю., Андреева С.И., Бояркина Е.С. Сорбционная переработка продуктивных растворов СПВ урана на ОПУ Добровольного месторождения // Развитие урановой и редкометалльной промышленности. XI Международная научно-практическая конференция. 16-18 мая 2024 г. – Алматы: Казатомпром: КБТУ, 2024. – С. 183-188.

5. Андреева С.И., Татарников А.В., Мешков Е.Ю., Соловьев А.А., Трошкина И.Д., Лавров А.С. Сорбционное двухстадийное получение кондиционного трифторида скандия из растворов подземного выщелачивания урана // Развитие урановой и редкометалльной промышленности. XI Международная научно-практическая конференция. 16-18 мая 2024 г. – Алматы: Казатомпром: КБТУ, 2024. – С. 316-319.

6. Татарников А.В., Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Андреева С.И., Бобыренко Н.А. Использование ионообменных процессов в технологиях добычи и производства редких и радиоактивных металлов (опыт и разработки АО «ВНИПИпромтехнологии») // Цветные металлы и минералы – 2024. Сборник тезисов докладов двенадцатого международного конгресса. – Красноярск, 2024. – С. 1003-1008.

7. Андреева С.И., Татарников А.В., Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Трошкина И.Д., Лавров А.С. Сорбция скандия и редких металлов из фторидных растворов низкоосновными анионитами // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXX Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXIII Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург, 2025. – С. 171-175.

8. Мешков Е.Ю., Соловьев А.А., Татарников А.В., Чернобровкин Н.А., Андреева С.И., Трошкина И.Д., Бояркина Е.С. Особенности сорбционной переработки сернокислых растворов скважинного подземного выщелачивания урана в присутствии депрессирующих примесей // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXX Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXIII Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург, 2025. – С. 166-171.

9. Васильева В.С., Андреева С.И., Цыганкова М.В., Мешков Е.Ю., Чернобровкин Н.А., Лавров А.С. Оценка возможности применения сорбционного метода для выделения РЗЭ из технологических растворов скважинного подземного выщелачивания урана // Международный конгресс по редким металлам, материалам и технологиям «РЕДМЕТ-2026». Сборник тезисов. – Москва, 2026. – С. 97-98.