

На правах рукописи



Лызлова Е.В.

**Лызлова Евгения Викторовна**

**Выделение и концентрирование актинидов из азотнокислых растворов с  
применением новых ионообменных материалов**

05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Озёрск - 2014

Работа выполнена в Федеральном Государственном Унитарном Предприятии «Производственное объединение «Маяк».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

**Гелис Владимир Меерович**

**Научный консультант:**

доктор химических наук, с.н.с.

**Милютин Виталий Витальевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, ведущий научный  
сотрудник ФГУП «ГНЦ ТРИНИТИ»

**Рябчиков Борис Евгеньевич**

кандидат технических наук, ведущий инженер  
ОАО «ВНИИХТ»

**Пензин Роман Андреевич**

**Ведущая организация:**

Открытое акционерное общество  
«Радиевый институт имени В.Г. Хлопина»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года в \_\_\_\_\_ часов 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета ДМ 418.002.01 при Открытом акционерном обществе «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (ОАО «ВНИИНМ»), Федеральном государственном унитарном предприятии «Объединённый эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды» (ФГУП «Радон») и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук» («ИФХЭ РАН») по адресу: 123098, г. Москва, ул. Живописная, д.44, зд.12, МСП ОАО «ВНИИНМ», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «ВНИИНМ» и на сайте [www.bochvar.ru](http://www.bochvar.ru)

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим отправлять по адресу: 123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а

Ученый секретарь  
диссертационного совета

**Шмидт Ольга Витальевна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В процессах химико-металлургического производства образуется большое количество азотнокислых растворов, содержащих уран и плутоний. Эти растворы наряду с ценными компонентами содержат различные примеси.

Извлечение и концентрирование урана и плутония из водных растворов можно осуществлять различными методами, к которым, главным образом, относятся: химическое избирательное осаждение, экстракция, ионный обмен. Выбор того или иного метода зависит от химического и радионуклидного состава раствора и определяется состоянием радионуклидов в растворе.

Регенерационные растворы химико-металлургического производства характеризуются незначительными объёмами и низкими концентрациями урана и плутония. Для извлечения ценных компонентов из таких растворов наиболее целесообразно использовать сорбционный метод. Ранее на предприятиях ядерно-энергетического комплекса использовались ионообменные материалы исключительно отечественного производства, однако в последние годы выпуск большинства из них прекращён. В то же время появилась возможность применения широкого ассортимента ионообменников иностранного производства, однако их сорбционные свойства по отношению к урану, плутонию и примесным элементам практически не изучены.

В связи с этим в настоящей работе были исследованы сорбционные и физико-химические характеристики целого ряда синтетических сорбентов импортного и отечественного производства по отношению к урану и плутонию при их сорбции из азотнокислых растворов.

**Цели работы.** Исходя из вышеизложенного, целями настоящей работы являются:

1. Поиск ионообменных материалов, пригодных для извлечения урана и плутония из азотнокислых растворов в условиях существующей технологии химико-металлургического производства.
2. Разработка технологии селективного выделения америция из водно-хвостовых растворов (ВХР) химико-металлургического производства.

**Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие научные задачи:**

1. Исследование сорбционных свойств современных ионообменных материалов с различными функциональными группами по отношению к урану и плутонию при их извлечении из азотнокислых растворов.
2. Изучение технологической приемлемости исследованных ионитов для избирательного извлечения урана и плутония из растворов химико-металлургического производства.
3. Исследование импрегната на основе тетраоктилдигликольамида (TODGA)

применительно к задаче селективного выделения америция из ВХР химико-металлургического производства.

**Научная новизна:**

1. Исследованы сорбционные свойства ряда ионообменных материалов по отношению к урану и плутонию при их извлечении из азотнокислых растворов.

2. Определены оптимальные параметры сорбционных процессов, позволяющие применять выбранные иониты для извлечения урана и плутония из растворов химико-металлургического производства.

3. Показана возможность выделения америция из ВХР с использованием импрегнированного сорбента TODGA.

**Практическая значимость работы:**

1. Проведена адаптация действующих технологий извлечения урана и плутония из растворов химико-металлургического производства применительно к использованию новых сорбционных материалов. Адаптированные варианты технологий внедрены в производство.

2. Разработана двухстадийная технология глубокой сорбционной очистки ВХР химико-металлургического производства от америция и плутония.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты исследования сорбционных свойств катионитов по отношению к урану и анионитов по отношению к плутонию при их сорбции из азотнокислых растворов.

2. Результаты опытно-промышленных испытаний адаптированных технологий извлечения урана и плутония из растворов химико-металлургического производства с использованием исследованных ионитов.

3. Технологическая схема глубокой очистки ВХР химико-металлургического производства от америция и плутония с использованием импрегната TODGA и фосфорорганического ионообменника.

**Личный вклад автора.** Автор в течение 15 лет принимал непосредственное участие в исследованиях, проводимых в центральной заводской лаборатории ФГУП «ПО «Маяк», а также в их практической реализации на предприятии химико-металлургического производства урана и плутония.

**Апробация работа.** Результаты работы представлены в виде докладов на Межотраслевой научно-технической конференции «Дни науки МИФИ» (Озёрск, 2002 год); IV Российской конференции по радиохимии «Радиохимия-2003» (Озёрск, 2003 год); II Молодежной научно-практической конференции «Ядерно-промышленный комплекс Урала: проблемы и перспективы» (Озёрск, 2003 год); научно-практической конференции «I Российская школа по радиохимии и ядерным технологиям» (Озёрск, 2004 год); научно-практической конференции «Молодежь ЯТЦ: наука, производство, экологическая

безопасность» (Северск, 2008 год); VI Российской конференции по радиохимии «Радиохимия-2009» (Москва, 2009 год); Российской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы радиохимии и радиоэкологии» (Екатеринбург: УрФУ, 2011 год); VII Российской научно-технической конференции по радиохимии «Радиохимия - 2012» (Димитровград, 2012 год); семинаре «Обращение с радиоактивными отходами от переработки ОЯТ АЭС» (ВНИИНМ, г. Москва, 2014 год).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы в журналах, рекомендуемых ВАК, 9 тезисов докладов на российских конференциях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из 138 наименований. Материал работы изложен на 147 страницах печатного текста, включает 25 рисунков и 38 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

**Глава 1. Литературный обзор.** Содержит обзор литературы по теме диссертации. В ней представлены ядерные свойства урана, плутония и америция, формы их нахождения и поведение в растворах различного состава. Рассмотрены основные методы выделения актинидов из растворов такие, как осаждение труднорастворимых соединений; экстрагирование органическими растворителями. Описаны сорбционные методы извлечения урана, плутония и америция из азотнокислых растворов, а также основные характеристики ионообменных материалов. Проведён анализ результатов исследований сорбции актинидов, полученных за последние 20 лет в России и других странах.

**Глава 2. Материалы и методики.** Включает описание экспериментальных методов исследования. В ней представлены методики приготовления растворов, описание материалов и оборудования, применяемых в работе, методы аналитического контроля, основные физико-химические характеристики сорбционных материалов и методики проведения экспериментов.

В работе были исследованы сорбционные свойства ионитов импортного и отечественного производства. Были определены физические характеристики ионитов: гранулометрический состав, насыпная плотность, набухание, сорбционные характеристики: коэффициенты распределения извлекаемых компонентов на исследуемых ионитах в зависимости от значения рН раствора и концентрации азотной кислоты, значения статической и полной обменной ёмкости, а также кинетические характеристики сорбентов: время полуобмена, скорость фильтрации раствора через сорбционную колонну. Изучен механизм сорбции урана и плутония на некоторых ионитах, определены коэффициенты диффузии.

**Глава 3. Исследование сорбционных свойств и выбор катионитов для извлечения урана из азотнокислых регенерационных растворов.** Глава посвящена изучению сорбционных свойств синтетических катионитов с различными функциональными группами по отношению к уранил-иону (далее урану) в азотнокислых растворах в статическом и динамическом режимах.

В ходе работы было установлено, что заметная сорбция урана на карбоксильных катионитах (СГ-1М, Resinex КН, Resinex КW-Н, Purolite С104FL и Dowex Mac 3) начинается при значении рН раствора выше 2,0, тогда как на сульфокислотных (Resinex КW-8, Purolite С100) и фосфорнокислом (Purolite D5041) уран хорошо извлекается в более широкой области – при значениях рН выше 0,3. Максимальных значений коэффициенты распределения и в том, и в другом случае достигают при рН от 4,0 до 5,0. Бифункциональные катиониты, проявляющие свойства смеси сильной и слабой кислот (Lewatit TP 260, Purolite S 957) способны эффективно извлекать уран, как в нейтральной, так и в кислой средах.

Эксперименты по определению полной обменной ёмкости (ПОЕ) показали, что наибольшей сорбционной ёмкостью по отношению к урану обладают карбоксильные и сульфокислотные катиониты. ПОЕ фосфорсодержащих ионитов, как выяснилось, значительно ниже.

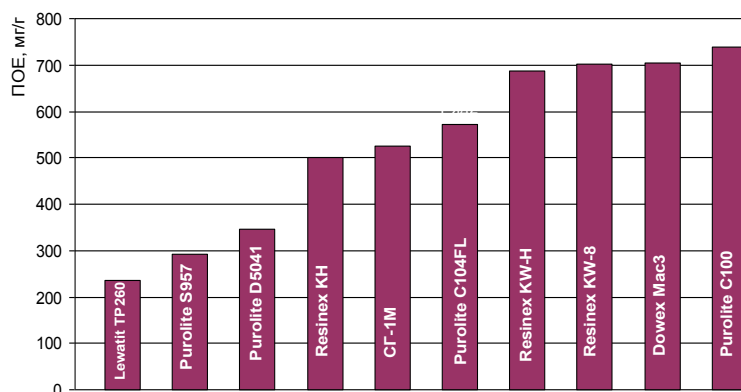


Рисунок 1 – Значения полной обменной ёмкости

В ходе работы было изучено влияние примесей, присутствующих в реальных растворах, которые могут оказывать конкурирующее действие в процессе сорбции или образовывать комплексные соединения с уранил-ионом, снижая тем самым сорбционную ёмкость катионита. Было установлено, что при проведении сорбции урана из растворов, имеющих значение рН=(4,5±0,5), на всех исследованных катионитах необходимо строго контролировать присутствие в растворе комплексонов (оксалат-ионов и фторид-ионов). Вследствие низкой селективности сульфокатионитов Resinex КW-8 и Purolite С100 к урану (VI) их ёмкость снижается в присутствии в растворе ионов  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $C_2O_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ , поэтому сорбцию урана на данных катионитах лучше всего проводить из азотнокислых растворов, не содержащих посторонние примеси. При сорбции урана на катионитах Purolite S957 и Purolite D5041 примеси ( $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $C_2O_4^{2-}$ ) мешают сорбции урана, снижая его коэффициент распределения, что подтверждается литературными данными, указывающими на то, что фосфорсодержащим катионитам свойственна низкая селективность извлечения урана из растворов сложного солевого

состава (в области низких концентраций кислоты поглощение урана фосфорсодержащими катионитами происходит в основном по катионообменному механизму и не связано с комплексобразованием уранил-иона с функциональной группой).

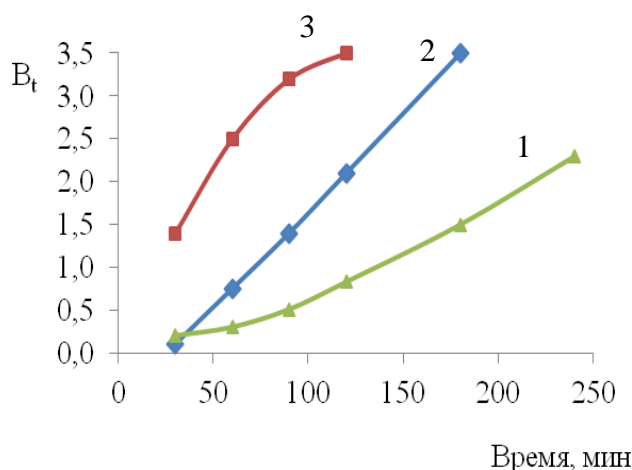
При исследовании кинетических характеристик катионитов было установлено, что сульфокатионитам Resinex KW-8 и Purolite C100 свойственна высокая скорость сорбции урана в азотнокислых растворах. Сорбционное равновесие для карбоксильных и фосфорнокислых катионитов наступает намного позже, таким образом, им свойственна «замедленная» кинетика сорбции, что объясняется малой степенью диссоциации водородной формы ионита. Кинетические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения времени полуобмена и максимальной скорости фильтрации раствора через сорбционную колонну

Катионит	СГ-1М	Resinex КН	Resinex KW-Н	Resinex KW-8	Lewatit TP260	Purolite C104FL	Purolite D5041	Purolite C100	Dowex Mac 3
$\tau_{1/2}$ , мин	56	42	78	18	48	45	44	12	20
Q, к.о./ч	3,2	3,7	2,3	12,2	4,2	5,1	3,52	17,4	12,7

Исследование механизма сорбции уранил-иона проводили на карбоксильном Purolite C104FL, фосфорсодержащем Purolite D5041 и сульфокислотном Purolite S957 катионитах. По экспериментально установленным значениям степени обмена определяли константы скорости реакции сорбции и строили график зависимости  $V_t=f(t)$ , представленный на рисунке 2. Прямолинейность зависимости  $V_t=f(t)$  указывает на внутридиффузионный характер процесса сорбции уранил-иона на карбоксильном катионите (т.е. сорбция лимитируется гелевой диффузией), искривление графиков зависимости  $V_t=f(t)$  подтверждает внешнедиффузионный характер сорбции уранил-иона на сульфо- и фосфорнокислым катионитах.

Были рассчитаны параметры процесса сорбции уранил-иона на катионитах. Кинетический коэффициент для катионита Purolite C104FL составил  $0,02 \text{ мин}^{-1}$ , для Purolite C100 –  $0,04 \text{ мин}^{-1}$ , для Purolite D5041 –  $0,005 \text{ мин}^{-1}$ . Коэффициент диффузии уранил-иона для Purolite C104FL составил  $6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{мин}$ , для Purolite C100 –  $1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{мин}$ , для Purolite D5041 –  $4,5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{мин}$ . Полученные результаты подтверждают тот факт, что сульфокислотные катиониты характеризуются более высокой скоростью обмена, а для карбоксильных и фосфорнокислых катионитов свойственна более «замедленная» кинетика сорбции.



1 – Purolite D5041, 2 – Purolite C104FL, 3 – Purolite C100.

Рисунок 2 – График кинетической зависимости  $V_t$  от  $t$  для катионитов

В ходе статических экспериментов были подобраны десорбирующие растворы и определён оптимальный режим проведения процесса десорбции. Результаты экспериментов по десорбции урана представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты опытов по десорбции урана с катионитов различными растворами

Состав десорбирующего раствора	Степень десорбции, %			
	Раствор азотной кислоты с молярной концентрацией		Раствор карбоната аммония с массовой долей 5%	Раствор карбоната натрия с массовой долей 5%
	(2,0±0,5) моль/дм <sup>3</sup>	(6,5±0,5) моль/дм <sup>3</sup>		
СГ-1М	98	96	22	28
Purolite C104FL	100	98	15	18
Resinex КН	84	73	31	37
Resinex КW-Н	71	67	29	31
Dowex Mac 3	93	85	37	39
Purolite D5041	8	20,5	96,7	96,9
Purolite S957	10	14,0	97,9	96,7
Lewatit TP260	0	0	86	100
Purolite C100	83	78	73	75
Resinex КW-8	77	69	59	62

Было установлено, что наилучшими десорбирующими растворами для карбоксильных катионитов являются растворы азотной кислоты. Для десорбции урана с сульфокислотных катионитов можно использовать не только растворы азотной кислоты, но растворы  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с массовой долей 5%. Использование карбонатных растворов позволяет полностью десорбировать уран с фосфорсодержащих катионитов.

Исследование процесса извлечения урана в динамическом режиме проводили с использованием имитационного раствора с массовой концентрацией урана  $(0,8\pm 0,2)$  г/дм<sup>3</sup> и значением pH среды  $(4,5\pm 0,5)$ . Результаты экспериментов показали, что использование катионита Resinex КW-Н в технологическом процессе нецелесообразно, так как получены достаточно низкие значения нагрузки урана на сорбент при допустимой концентрации урана в фильтрате. Анализ результатов динамических испытаний сорбции урана на катионитах показал, что наилучшими сорбционными характеристиками обладают карбоксильные катиониты СГ-1М, Purolite C104FL, Dowex Mac 3. Показано, что массовая концентрация урана в сорбенте (нагрузка), достигает 127 г/дм<sup>3</sup>, 113 г/дм<sup>3</sup> и 83 г/дм<sup>3</sup>, соответственно, при этом концентрация урана в фильтрате не превышает 0,5 мг/дм<sup>3</sup>. Полная десорбция урана происходит при пропускании 10 колоночных объёмов (к.о.) раствора азотной кислоты с концентрацией от  $(2,0\pm 0,5)$  до  $(6,5\pm 0,5)$  моль/дм<sup>3</sup>. Нагрузка урана на Resinex КН в тех же условиях не превышает 30 г/дм<sup>3</sup>.

Установлено, что при извлечении урана на бифункциональных катионитах Lewatit TP260 и Purolite S957 из растворов со значением pH  $(4,5\pm 0,5)$  достигается достаточно высокая нагрузка урана на катионит около 120 и 70 г/дм<sup>3</sup>, соответственно, при этом не наблюдается проскок урана в фильтрат.



Однако, следует отметить, что применение катионитов Purolite S957 и Purolite D5041 для извлечения урана из технологических растворов нецелесообразно из-за определённых трудностей, возникающих при извлечении урана из фазы ионита. Для полной десорбции урана с данных катионитов необходимо пропустить не менее 30 к.о. десорбирующего раствора.

Сульфокислотные катиониты Resinex KW-8 и Purolite C100 обладают достаточно высокой сорбционной способностью при извлечении урана из имитационных растворов, не содержащих посторонние примеси, со значением pH среды ( $4,5 \pm 0,5$ ). В условиях эксперимента нагрузка урана на сорбент, при которой массовая концентрация урана в фильтрате не превышает  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ , составляла около 300 и около  $200 \text{ г/дм}^3$ , соответственно. Таким образом, изученные сульфокатиониты можно рассматривать как перспективные сорбенты для извлечения урана из азотнокислых растворов.

Исследование процессов извлечения урана из азотнокислых растворов химико-металлургического производства на наиболее перспективных катионитах (СГ-1М, Purolite C104FL, Dowex Mac3, Resinex KH, Resinex KW-8, Purolite C100 и Lewatit TP260.) и десорбции урана в динамических условиях проводили с использованием регенерационных растворов, в состав которых входили аммиачные маточные растворы, водно-хвостовые растворы, промывные воды от отмывки оборудования, растворы от обработки отходов.

Реальные растворы подготавливали к сорбции путём добавления раствора аммиака с массовой долей 25% до значения pH среды ( $4,5 \pm 0,5$ ), затем полученную суспензию фильтровали на фильтре «синяя лента». Извлечение урана из растворов с массовой концентрацией урана ( $0,8 \pm 0,2$ )  $\text{г/дм}^3$  проводили на двух последовательно соединённых колонках, заполненных катионитом.

В ходе проведения стендовых испытаний было установлено, что наилучшими сорбционными характеристиками при извлечении урана из реальных растворов обладают карбоксильные катиониты СГ-1М, Purolite C104FL. Показано, что увеличение скорости фильтрования раствора до расчётной максимально возможной не снижает эффективность сорбции урана. Данные катиониты были рекомендованы для проведения опытно-промышленных испытаний на сорбционной установке. Была изучена возможность применения катионитов СГ-1М и Purolite C104FL для извлечения урана из реальных растворов на действующей промышленной сорбционной установке. Перед испытаниями катиониты переводили в  $\text{H}^+$ -форму и загружали в две последовательно соединённые колонны сорбционной установки.

Технологическая схема извлечения урана из реальных растворов включала стадии: корректировку значения pH среды растворов до значения ( $4,5 \pm 0,5$ ), фильтрование растворов на нутч-фильтре; извлечение урана из подготовленных растворов на двух

последовательно соединенных колоннах при времени контакта раствора с сорбентом 60 мин; завершение процесса сорбции при получении фильтратов с массовой концентрацией более  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ ; промывку колонн перед десорбцией хозяйственно-питьевой водой (ХПВ) для полного вытеснения исходного раствора; десорбцию урана отдельно с первой и второй колонн раствором азотной кислоты с молярной концентрацией  $(2,0 \pm 0,5) \text{ моль/дм}^3$  при времени контакта раствора с катионитом 60 мин. Объем десорбирующего раствора 10 к.о.; промывку колонн ХПВ, имеющей значение pH  $(4,5 \pm 0,5)$  для подготовки катионита к следующему циклу сорбции.

Результаты опытно-промышленной проверки технологии извлечения урана из регенерационных растворов на катионите СГ-1М представлены в таблице 3. Концентрация урана в растворах, поступающих на сорбцию, составляла  $(0,8 \pm 0,1) \text{ г/дм}^3$ , значение pH -  $(4,5 \pm 0,5)$ .

Всего было проведено семь опытно-промышленных операций сорбции и десорбции урана. Со 2 по 6 операции масса урана, извлеченного катионитом, постепенно уменьшалась. С целью обеспечения эффективной сорбции урана на катионите скорость фильтрования исходного раствора в седьмой операции снизили в три раза. Это позволило увеличить нагрузку урана на сорбент, однако объем десорбирующего раствора увеличился на 40%. По окончании седьмой операции катионит выгрузили из колонн в контейнеры. Осмотр катионита показал, что произошло почти полное разрушение гранул сорбента и он не пригоден для дальнейшего использования. До выгрузки из колонн на катионите СГ-1М извлекли в 1,5 раза меньше урана, чем на ранее применяемом в технологии СГ-1. Таким образом, несмотря на то, что производители указывают на высокую осмотическую стабильность (95-99%) и механическую прочность (98%) катионита СГ-1М опытно-промышленная проверка показала, что предоставленная партия катионита, обладает низкой осмотической устойчивостью, в отличие от образца, который исследовали в лабораторных условиях. Следовательно, предоставленный образец катионита СГ-1М нецелесообразно использовать в промышленных сорбционных колоннах.

Результаты опытно-промышленной проверки технологии извлечения урана из реальных растворов на катионите Purolite C104FL также представлены в таблице 3.

В 1, 2 и 3 операциях концентрация урана в фильтратах не превышала  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ . При этом во 2 и 3 операциях на катионите Purolite C104FL извлекли примерно в два раза больше урана, чем на катионите СГ-1М. Извлечение урана в 4 – 7 операциях проводили до появления фильтратов с концентрацией более  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ .

Таблица 3 – Результаты опытно-промышленной проверки технологии извлечения урана из реальных растворов на катионитах СГ-1М и Purolite C104FL

Номер цикла	Катионит СГ-1М			Катионит Purolite C104FL		
	Объём раствора, дм <sup>3</sup>	Концентрация урана в катионите после прекращения сорбции, г/дм <sup>3</sup>	Объём десорбирующего раствора, дм <sup>3</sup>	Объём раствора, дм <sup>3</sup>	Концентрация урана в катионите после прекращения сорбции, г/дм <sup>3</sup>	Объём десорбирующего раствора, дм <sup>3</sup>
1	30190	63	12	51470	82	10
2	14570	50	10	57770	104	14
3	21630	53	10	48270	153	16
4	31900	58	10	21420	65	11
5	8780	47	10	20240	56	12
6	6000	36	10	4120	23	10
7	19710	55	14	5250	20	8

Начиная с четвёртой операции, масса сорбированного урана постепенно уменьшалась. После того, как в седьмой операции массовая концентрация урана в фазе катионита достигла 20 г/дм<sup>3</sup>, испытания катионита прекратили. Визуально было установлено, что разрушение гранул сорбента не произошло. Однако, для дальнейшего использования катионит не был пригоден, вследствие частичной потери сорбционной способности. Тем не менее, результаты производственных испытаний катионита Purolite C104FL следует признать удовлетворительными, так как до выгрузки из колонн за 6 циклов сорбции масса урана, извлечённого на данном катионите, превышала массу урана, извлечённого на ранее применяемом в технологии катионите СГ-1 за 10-12 циклов. Катионит Purolite C104FL был рекомендован для применения на промышленной сорбционной установке. С 2008 года катионит Purolite C104FL успешно эксплуатируется на промышленной сорбционной установке химико-металлургического производства.

**Глава 4. Исследование сорбционных свойств и выбор анионитов для извлечения плутония из азотнокислых регенерационных растворов.** Глава посвящена изучению сорбционных свойств ряда синтетических анионитов с различными функциональными группами по отношению к плутонию в азотнокислых растворах в статическом и динамическом режимах.

В ходе исследований были получены низкие значения коэффициентов распределения плутония на слабоосновных анионитах марки Relite в области концентраций азотной кислоты от 2,0 до 7,0 моль/дм<sup>3</sup>, которые, как известно, способны обменивать анионы из слабощелочных растворов. Согласно литературным данным некоторые слабоосновные иониты «работают» при значениях рН < 9, другие в узкой области значений рН раствора – от 2 до 7. Было установлено, что в соответствии с особенностями типичных сильноосновных анионитов заметная сорбция плутония на остальных исследованных анионитах начинается при молярной концентрации азотной кислоты 4,5 моль/дм<sup>3</sup>, максимальное извлечение плутония в рассмотренном диапазоне

происходит при концентрации азотной кислоты 7,0 моль/дм<sup>3</sup>. Следует отметить, что наилучшими сорбционными свойствами по отношению к плутонию обладают сильноосновные аниониты с четвертичной аммониевой (Purolite A500U/2788, Purolite A560, ZG A351Cl) и пиридиниевой (ВП-1Ап, ВП-3Ап, Россион-62, Россион-511) функциональными группами.

Дальнейшие исследования процесса сорбции плутония на анионитах проводили из растворов с молярной концентрацией азотной кислоты, при которой обеспечивается эффективная сорбция на сильноосновных анионитах- (6,5±0,5) моль/дм<sup>3</sup>.

Полученные значения ПОЕ исследованных анионитов показали, что наибольшей сорбционной ёмкостью по отношению к плутонию обладают аниониты с функциональной группой четвертичного аммония (-N<sup>+</sup>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) Purolite A500U/2788, Purolite A560, ZG A351Cl и с пиридиниевой функциональной группой

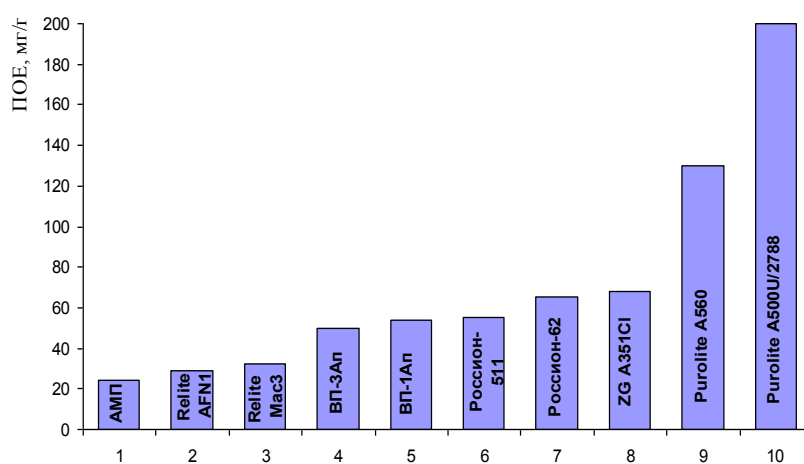


Рисунок 3 – Значения полной обменной ёмкости анионитов

(-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>N<sup>+</sup>R) Россион-62 и Россион-511. Это обусловлено тем, что в растворе азотной кислоты с концентрацией (6,5±0,5) моль/дм<sup>3</sup> плутоний образует устойчивый гексанитратный комплекс состава [Pu(NO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>]<sup>2-</sup>, который прочно связывается с двумя фиксированными зарядами сильноосновного анионита, при этом достигается высокая степень очистки плутония от примесей. Для проведения дальнейших исследований были выбраны аниониты, обладающие наибольшим значением ПОЕ: Purolite A500U/2788, Purolite A560, ZG A351Cl, Россион-62 и Россион-511, а также для сравнения винилпиридиновые аниониты, которые используются в настоящее время на химико-металлургическом производстве: ВП-1Ап, ВП-3Ап.

Результаты исследований кинетических характеристик ряда анионитов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения времени полуобмена и максимальной скорости фильтрации раствора через сорбционную колонну, заполненную анионитом

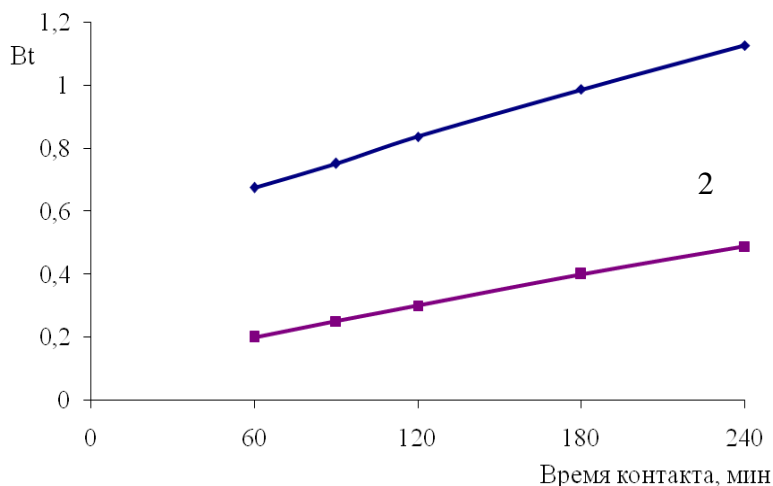
Анионит	ВП-1Ап	ВП-3Ап	Purolite A500U/2788	Purolite A560	Россион-511	Россион-62
τ <sub>1/2</sub> , мин	120	90	30	15	20	90
Q, к.о./ч	1,2	1,5	7,0	14,4	7,3	1,7

В ходе экспериментов установлено, что анионитам с группами четвертичного аммониевого основания Purolite A500U/2788, Purolite A560 свойственна высокая скорость

сорбции плутония в азотнокислых растворах. В литературе часто проводят аналогию между кинетическими свойствами данных анионитов и сульфокислотных катионитов. Сорбционное равновесие для пиридиновых анионитов ВП, Россион-62, наступает позже, таким образом, им свойственна несколько «замедленная» кинетика сорбции.

Исследование механизма сорбции плутония проводили на сильнокислотных анионитах с разными функциональными группами: четвертичными аммониевыми - Purolite A500U и пиридиновыми - ВП-3Ап.

Прямолинейность зависимости эффективной константы скорости реакции сорбции от



времени, представленных на рисунке 4, подтверждает внутридиф-

Рисунок 4 – Графики кинетической зависимости  $V_t$  от  $t$  для анионитов Purolite A500U/2788 (1) и ВП-3Ап (2)

фузионный характер процесса сорбции плутония на анионитах Purolite A500U/2788 и ВП-3Ап (т.е. сорбция лимитируется гелевой диффузией). Были рассчитаны параметры процесса сорбции плутония на анионитах. Кинетический коэффициент для анионита Purolite A500U/2788 составил  $0,0016 \text{ мин}^{-1}$ , для анионита ВП-3Ап -  $0,0025 \text{ мин}^{-1}$ . Получены сопоставимые значения коэффициентов диффузии для данных анионитов: коэффициент диффузии плутония для Purolite A500U/2788 составил  $4,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{мин}$ , для ВП-3Ап –  $6,8 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{мин}$ . Небольшое отличие может быть связано с размером зёрен и «сшитостью» ионита, которые могут оказывать влияние на скорость внутренней диффузии. Коэффициенты диффузии, как правило, уменьшаются с увеличением степени сшивки ионита.

Исследование процессов сорбции плутония и десорбции из фазы анионита в динамическом режиме проводили с использованием усреднённых реальных растворов с концентрацией плутония от 0,2 до  $1,2 \text{ г/дм}^3$  и азотной кислоты ( $6,5 \pm 0,5$ ) моль/дм<sup>3</sup>.

Полученные результаты показали, что на анионитах ВП-3Ап, Purolite A500U, Purolite A560, Россион-62, Россион-511 происходит эффективная сорбция плутония при достаточно высоком насыщении ионита первой колонки от 40 до  $60 \text{ г/дм}^3$ . Увеличение скорости пропускания раствора через сорбционную колонну с анионитами до рассчитанной максимально возможной не приводило к снижению сорбционной способности анионитов. Полностью извлечь плутоний из фазы анионита Россион-62 можно только с применением восстановительной десорбции. Для полной десорбции плутония из фазы остальных анионитов необходимо пропустить от 6 до 10 к.о. раствора

азотной кислоты с концентрацией 0,2 - 0,6 моль/дм<sup>3</sup>. На протяжении шести циклов сорбции и десорбции плутония не отмечены потеря сорбционной способности и разрушение анионитов.

Для проведения проверки на промышленной установке по извлечению плутония из азотнокислых растворов были выбраны аниониты ВП-3Ап и Purolite A500U/2788.

В связи с жёсткими условиями эксплуатации сорбентов из-за воздействия на них в процессе сорбции ионизирующего излучения большое практическое значение приобретают вопросы их радиационной устойчивости. В ходе работы на примере анионита ВП-3Ап было изучено влияние поглощённой дозы излучения при извлечении плутония из реальных растворов на его физико-химические и сорбционные свойства. Исследовано влияние внутреннего альфа-излучения и внешнего гамма-излучения.

В ходе испытаний было установлено, что увеличение поглощённой дозы излучения до 1 МГр приводит к росту массовой концентрации плутония в фильтратах (более 2 мг/дм<sup>3</sup>) и уменьшению динамической обменной ёмкости анионита, что недопустимо при извлечении плутония из технологических растворов. Данный факт подтверждает результаты статических экспериментов, которые показали, что при получении анионитом поглощённой дозы излучения более 1 МГр происходит частичная деструкция матрицы, а, следовательно, снижение сорбционных свойств анионитов.

Однако при условии циклической работы промышленной сорбционной установки, когда сорбент работает в режиме периодического облучения и получает дозу излучения, не превышающую 1 МГр, анионит ВП-3Ап можно считать радиационно-устойчивым материалом, пригодными для извлечения плутония из растворов.

В ходе работы была изучена возможность применения анионитов Purolite A500U/2788 и ВП-3Ап для извлечения плутония из реальных растворов на действующей промышленной сорбционной установке. Перед испытаниями аниониты отмывали от хлорид-иона, переводили в NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - форму, загружали в две последовательно соединённые колонны сорбционной установки.

Технологическая схема извлечения плутония на анионитах Purolite A500U/2788 и ВП-3Ап включала следующие операции: подготовку растворов к сорбции путём корректировки значения молярной концентрации азотной кислоты до (6,5±0,5) моль/дм<sup>3</sup>, добавления раствора гидразин-нитрата из расчёта создания массовой концентрации гидразина в растворе 100 мг/дм<sup>3</sup>, перемешивание и фильтрование полученного раствора на нутч-филт্রে; подачу подготовленного к сорбции раствора на первую колонну сверху вниз со скоростью 1-2 к.о./ч, сорбцию плутония до получения фильтратов с концентрацией плутония 2 мг/дм<sup>3</sup> или насыщения анионита по плутонию от 40 до 70 г/дм<sup>3</sup>; прямую промывку колонн с анионитом при завершении процесса сорбции раствором азотной кислоты с молярной концентрацией (6,5±0,5) моль/дм<sup>3</sup> (2 к.о./ч), объём

промывки не более 5 к.о.; десорбцию плутония с первой колонны раствором азотной кислоты с молярной концентрацией  $(0,20 \pm 0,05)$  моль/дм<sup>3</sup> (1 к.о./ч), подача раствора сверху вниз, объём раствора 10 к.о.; обратную промывку первой колонны раствором азотной кислоты с молярной концентрацией  $(6,5 \pm 0,5)$  моль/дм<sup>3</sup> циклами с выдержкой в колонне 15 мин, объём раствора на один цикл 2 к.о. Всего было проведено 19 операций сорбции и десорбции плутония на анионите Purolite A500U/2788 и 14 операций на анионите ВП-3Ап. Результаты опытно-промышленной проверки технологии извлечения плутония из регенерационных растворов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты опытно-промышленной проверки технологии извлечения плутония из реальных растворов на анионитах Purolite A500U/2788 и ВП-3Ап

Анионит	Количество циклов	Массовая концентрация плутония в фильтрате, мг/дм <sup>3</sup>	Масса плутония в фазе анионита после сорбции, кг	ДОЕ по плутонию, г/дм <sup>3</sup>
Purolite A500U/2788	19	не более 0,8	от 1,5 до 3,0	от 33 до 67
ВП-3Ап	14	не более 1,3	от 1,4 до 2,1	от 31 до 47

Результаты опытно-промышленной проверки технологии извлечения плутония из растворов химико-металлургического производства на анионите Purolite A500U/2788 признаны удовлетворительными. Анионит Purolite A500U/2788 внедрён на химико-металлургическом производстве и успешно эксплуатируется на сорбционной установке.

За один цикл сорбции на анионите ВП-3Ап извлекали примерно такое же количество плутония, которое в настоящее время извлекается на анионите ВП-1Ап. При этом концентрация плутония в фильтрате изменялась от 0,7 до 1,3 мг/дм<sup>3</sup>.

Результаты опытно-промышленной проверки технологии извлечения плутония из реальных растворов на анионите ВП-3Ап были признаны удовлетворительными. На основании полученных результатов анионит ВП-3Ап был рекомендован для извлечения плутония из регенерационных растворов.

**Глава 5. Исследование возможности извлечения америция из ВХР с использованием импрегната TODGA.** Глава посвящена изучению возможности сорбционного выделения америция из ВХР - фильтратов, образующихся в результате извлечения плутония на анионите из регенерационных растворов химико-металлургического производства.

В результате сорбционной переработки регенерационных растворов образуются ВХР с массовой концентрацией плутония не превышающей 2 мг/дм<sup>3</sup> и средней концентрацией америция 0,5 мг/дм<sup>3</sup> (не более 5 мг/дм<sup>3</sup>). В настоящее время для химико-металлургического производства принята концепция технологической независимости от других подразделений «ПО «Маяк» при утилизации жидких радиоактивных отходов без их направления для хранения в промышленные водоёмы. В связи с этим ВХР, относящиеся к отходам среднего уровня активности (САО), планируется перерабатывать

по осадительно-фильтрационной технологии на производственных мощностях завода, в результате чего будут образовываться твёрдые отходы с высоким содержанием  $^{241}\text{Am}$ , которые будут относиться к категории высокоактивных отходов (ВАО). Согласно представленным ИФХЭ РАН данным полученные твёрдые отходы будут содержать радионуклиды  $^{239}\text{Pu}$  (0,4 г/кг) и  $^{241}\text{Am}$  (0,6 г/кг), удельная активность данных отходов составит  $8 \cdot 10^{10}$  Бк/кг и на 99% будет обусловлена активностью  $^{241}\text{Am}$ . Данные отходы предполагается направлять на временное хранение. Очевидно, что одним из способов решения проблем, связанных с хранением отходов, является выделение америция на более ранней стадии. По нашим оценкам извлечение  $^{241}\text{Am}$  из ВХР позволит перевести отверждённые отходы в категорию САО, снизить уровень радиационной опасности в процессе хранения, а также вовлечь выделенный  $^{241}\text{Am}$  в изотопное производство.

Для извлечения америция из ВХР был исследован селективный по отношению к америцию импрегнат TODGA, который получают путём нанесения на матрицу стиролдивинилбензолного сополимера жидкого экстрагента N,N,N',N'-тетраоктил-3-оксапентан-1,5-диамида дигликолевой кислоты. Ввиду того, что для импрегнатов характерно отсутствие химической связи между молекулами экстрагента и полимерной матрицей, возможно снижение сорбционных свойств из-за вымывания экстрагента в растворы азотной кислоты. Однако, в ходе работы было показано, что экстрагент TODGA не смывается с зерна матрицы при пропускании 1200 к.о. раствора азотной кислоты с молярной концентрацией 5,0 моль/дм<sup>3</sup>.

Для определения возможности извлечения и разделения на стадии сорбции плутония и америция, а также влияния на процесс сорбции присутствующих в растворе макропримесей железа и алюминия, была изучена зависимость их массовых коэффициентов распределения ( $K_d$ ) от концентрации азотной кислоты в растворе.

Таблица 6 – Зависимость  $K_d$  америция, плутония, железа и алюминия от молярной концентрации азотной кислоты в исходном растворе

Молярная концентрация азотной кислоты в растворе, моль/дм <sup>3</sup>	Коэффициенты распределения, $K_d$ , см <sup>3</sup> /г			
	америция	плутония	железа	алюминия
0,5	11	31	8	<1
1,5	32	83	10	<1
2,0	58	95	10	<1
4,0	250	160	18	2
5,0	280	400	20	2
6,0	300	450	50	5
7,0	550	460	75	5

Примечание - Массовая концентрация в исходном растворе: америция – от 40 до 50 мг/дм<sup>3</sup>, плутония – от 1,0 до 2,0 мг/дм<sup>3</sup>, железа и алюминия – от 0,8 до 1,2 г/дм<sup>3</sup>.

Полученные результаты указывают на то, что на стадии сорбции невозможно провести разделение америция и плутония. Максимальных значений коэффициенты распределения америция и плутония на импрегнате TODGA достигают при молярной концентрации азотной кислоты в растворе 7,0 моль/дм<sup>3</sup>. Присутствие железа в растворах,



скорее всего, может несколько снижать сорбционную ёмкость импрегната по Америцию и Плутонию. Присутствие в растворах ионов  $Al^{3+}$  негативного влияния на процесс сорбции не окажет. Подобраны десорбирующие растворы, позволяющие достаточно эффективно извлекать Америций и Плутоний из фазы импрегната. Полученные результаты показали, что для извлечения Плутония из фазы импрегната TODGA достаточно эффективной является восстановительная десорбция. Использование водного раствора, содержащего ДТПА, позволяет практически полностью извлечь Америций.

В ходе динамических экспериментов были установлены значения полной динамической обменной ёмкости импрегната TODGA по Америцию и Плутонию (ПДОЕ). Значение  $ПДОЕ_{Am}$  составило  $15,5 \text{ г/дм}^3$ , значение  $ПДОЕ_{Pu}$  составило  $12 \text{ г/дм}^3$ . Эти значения, выраженные в мг-экв/г, сопоставимы и составляют  $0,3 \text{ мг-экв/г}$ . Проведённые исследования подтвердили возможность извлечения Америция из ВХР с использованием данного импрегната.

Для обеспечения эффективной сорбции на импрегнате TODGA была рассмотрена возможность реализации двухстадийной технологии, предусматривающей предварительную сорбционную очистку ВХР на катионите Purolite S957. Такая очистка позволит избежать накопления на импрегнате смеси радионуклидов – Америция и Плутония, а также снизить в ВХР концентрацию примесей, которые могут оказывать негативное влияние на процесс сорбции Америция на импрегнате. Была предложена двухстадийная технология извлечения Америция с использованием катионита Purolite S957 и импрегната TODGA, которая включала следующие стадии: корректировку концентрации азотной кислоты в исходном растворе – ВХР (до концентрации  $(5,0 \pm 0,5) \text{ моль/дм}^3$ ; извлечение Плутония из ВХР с использованием катионита Purolite S 957; извлечение Америция из полученного фильтрата с использованием импрегната; десорбцию Плутония из фазы катионита Purolite S 957; промывку катионита Purolite S 957; десорбцию Америция из фазы импрегната TODGA; промывку импрегната.

Принципиальная технологическая схема извлечения Америция из ВХР представлена на рисунке 5. Исследования проводили в соответствии с разработанной схемой с использованием реального фильтрата сорбционной установки. В результате сорбции на катионите Purolite S957 был получен фильтрат с массовой концентрацией Плутония менее  $0,1 \text{ мг/дм}^3$  и средним значением массовой концентрации Америция  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ , который направляли на сорбционную колонку с импрегнатом. Показана достаточно эффективная сорбция Америция из фильтрата. При насыщении сорбента Америцием до  $(5,5 \pm 0,5) \text{ г/дм}^3$  массовая концентрация последнего в фильтрате не превышает  $80 \text{ мкг/дм}^3$ . Содержание Плутония в десорбате Америция не превышает 1%. Таким образом, двухстадийная технология обеспечивает хорошие показатели процесса сорбции и десорбции. Установлено, что полная десорбция Америция из фазы импрегната

достигается при пропускании 10 к.о. водного раствора, содержащего ДТПА с концентрацией  $10 \text{ г/дм}^3$  и значением pH ( $5,5 \pm 0,5$ ) при скорости фильтрации 1 к.о./ч.



Рисунок 5 – Принципиальная технологическая схема извлечения америция из ВХР

Реализация предложенной технологической схемы позволит снизить объёмную активность ВХР не менее чем в 10 раз и перевести полученные в результате осадительно-фильтрационной технологии твёрдые отходы из категории ВАО ( $A_{уд.} \sim 10^7$  кБк/кг) в категорию САО ( $A_{уд.} < 10^6$  кБк/кг), снизив, тем самым, уровень радиационной опасности в процессе хранения. Кроме того, предложенная технология позволяет сконцентрировать выделенный  $^{241}\text{Am}$  в  $10^3$  раз. В настоящее время проводятся укрупнённые динамические испытания двухстадийной технологии извлечения америция из ВХР с использованием катионита Purolite S957 и импрегната TODGA с целью определения возможности работы установки в многоциклическом режиме и получения качественного препарата америция.

### Выводы

1. Проведена сравнительная оценка сорбционных свойств катионитов с различными функциональными группами при извлечении урана из азотнокислых растворов. Установлено, что наибольшей сорбционной ёмкостью по отношению к уранил-иону обладают карбоксильные и сульфокатиониты. Подобраны оптимальные условия проведения процессов сорбции и десорбции урана на указанных катионитах. Показана возможность извлечения урана из растворов химико-металлургического производства на

катионитах СГ-1М, Purolite C104FL, Resinex КН и Lewatit TP260. На основании результатов опытно-промышленной проверки карбоксильный катионит Purolite C104FL был рекомендован для применения и в настоящее время успешно эксплуатируется на промышленной сорбционной установке.

2. В ходе работы показано, что наилучшими сорбционными свойствами при извлечении плутония из азотнокислых растворов обладают аниониты с четвертичной аммониевой группой и пиридиниевой функциональной группой. Подобраны оптимальные условия проведения процессов сорбции и десорбции плутония на указанных анионитах. Установлено, что при условии циклической работы сорбционной установки анионит ВП-3Ап можно считать радиационно-устойчивым материалом. На основании результатов опытно-промышленной проверки технологии извлечения плутония из растворов химико-металлургического производства аниониты ВП-3Ап и Purolite A500U/2788 были рекомендованы для применения на промышленной установке. Анионит Purolite A500U/2788 внедрён и успешно эксплуатируется на сорбционной установке химико-металлургического производства.

3. Показана возможность извлечения америция-241 из водно-хвостовых растворов химико-металлургического производства на импрегнате TODGA. Предложена двухстадийная технология извлечения америция-241 из ВХР с использованием катионита Purolite S957 и импрегната TODGA.

#### **Список работ по теме диссертации**

##### **Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:**

1 Лызлова, Е.В. Изучение сорбции урана на неорганическом катионите – фосфате циркония [Текст] / Е.В.Лызлова, В.А. Боровинский, Л.М. Рамазанов // Радиохимия. – 2001. - т.43, № 1. - с.77 – 79.

2 Разделение трансураниевых элементов на сорбенте S-957 [Текст] / Н.А. Некрасова, В.В. Милютин, В.М. Гелис и др. // Радиохимия. – 2011. - т.53, №4. - с. 333-335.

3 Лызлова, Е.В. Изучение возможности извлечения урана из азотнокислых регенерационных растворов с применением новых катионитов [Текст] / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова // Вопросы радиационной безопасности. – 2012. - №2. - с. 24 – 30.

4 Извлечение плутония из азотнокислых регенерационных растворов с использованием анионита ВП-3Ап [Текст] / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова, Н.П. Старовойтов и др. // Вопросы радиационной безопасности. – 2013. - №2. - с.57 – 63.

##### **Список публикаций в сборниках тезисов конференций:**

1 Лызлова, Е.В. Изучение процесса сорбции урана на неорганическом катионите – фосфате циркония [Текст] / Е.В. Лызлова, В.А. Боровинский, Л.М. Рамазанов // Межотраслевая научно – техническая конференция «Дни науки МИФИ». - Озёрск, 2002. – с.38-39.

2 Лызлова, Е.В. Изучение возможности сорбционного извлечения плутония из растворов химико-металлургического производства с применением анионитов ВП-1АП,

Purolite A 500U/2788, ZHENG GUANG A351C1 [Текст] / Е.В. Лызлова, В.А. Боровинский, Л.М. Рамазанов // IV Российская конференция по радиохимии «Радиохимия - 2003». - Озёрск, 2003. - с.180.

3 Лызлова, Е.В. Изучение возможности сорбционного извлечения плутония из растворов химико-металлургического производства с применением анионитов ВП-1АП, Purolite A500U/2788, ZHENG GUANG A 351C1 [Текст] / Е.В. Лызлова, В.А. Боровинский, Л.М. Рамазанов // II Молодежная научно - практическая конференция «Ядерно-промышленный комплекс Урала: проблемы и перспективы». – Озёрск, 2003. – с.125.

4 Лызлова, Е.В. Применение новых ионообменных материалов для извлечения урана, плутония и нептуния из растворов химико-металлургического и радиохимического производств [Текст] / Е.В. Лызлова, В.А. Боровинский, Л.М. Рамазанов // Научно-практическая конференция «I Российская школа по радиохимии и ядерным технологиям». – Озёрск, 2004. – с.138.

5 Лызлова, Е. В. Изучение возможности применения катионитов Purolite S957, Purolite D5041 и Lewatit TP260 для извлечения урана из азотнокислых растворов [Текст] / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова, Л.М. Рамазанов // НПК «Молодежь ЯТЦ: наука, производство, экологическая безопасность». – Северск, 2008. - с.98.

6 Лызлова, Е.В. Изучение возможности применения новых катионитов с различными функциональными группами для извлечения урана из азотнокислых растворов [Текст] / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова, Л.М. Рамазанов // НПК VI Российская конференция по радиохимии «Радиохимия-2009». - Москва, 2009. - с. 165-166.

7 Лызлова, Е.В. Изучение возможности применения анионита ВП-3Ап для извлечения плутония из азотнокислых растворов [Текст] / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова, Л.М. Рамазанов // Российская научно-техническая конференция с международным участием: Актуальные проблемы радиохимии и радиоэкологии. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – с. 249.

8 Лызлова, Е.В. Исследование влияния дозы излучения, поглощенной анионитом ВП-3Ап, при извлечении плутония из азотнокислых технологических растворов на сорбционные свойства анионита [Текст] / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова, Н.П. Старовойтов // VII Российская научно-техническая конференция по радиохимии «Радиохимия - 2012». – Димитровград, 2012. – с. 159.

9 Лызлова, Е.В. Исследование процесса сорбции плутония из азотнокислых регенерационных растворов на анионитах марки Россион [Текст] / Е.В. Лызлова, А.В. Глухова // VII Российская научно-техническая конференция по радиохимии «Радиохимия - 2012». – Димитровград, 2012. – с. 158.