

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»
МИЭМ НИУ ВШЭ

ТРУДЫ

XXIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 8-13 июля 2013 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва – 2013

УДК 669.
ББК 22.38
P15
ISBN 978-5-89671-021-9

Труды XXIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 8 – 13 июля 2013 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2013 г., 588с.

В рамках совещания проводилась XVII Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор),
д.ф.-м.н. Кристя В.И.,
д.т.н. Прасицкий В.В.,
Киреева И.А.
Мелкумян А.Б.

УДК 669.
ББК 22.38
© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2013

ISBN 978-5-89671-021-9

© Труды XXIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела»

ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

Понедельник, 8 июля

9.00-13.00

Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.

1. Дидык А.Ю., Шилов В.М., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т. «Образование новых элементов под действием 10 МэВ-ных гамма-квантов при ядерных реакциях в насыщенном дейтерием палладии» 11
2. Якушин В.Л., Аунг Тхурейн Хейн, Джумаев П.С., Калин Б.А., Леонтьева-Смирнова М.В., Польский В.И. «Поверхностное легирование фрагментов твэльных труб из ферритно-мартенситных сталей с использованием потоков импульсной плазмы» 34
3. Ивченко В.А., Пушин А.В., Ивченко М.В. «Создание структуры микродуплекс в сплавах PdCuAg ионным облучением» 45
4. Печенкин В. А., Чернов К. Г., Черный В.А., Аверин Л. В. «Повреждающая доза в металлах при облучении в исследовательских быстрых реакторах» 53
5. Голубев О.Л. «Поверхностная ионизация и высокотемпературное поленое испарение: сходство и различие явлений» 58

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция «Радиационная физика металлов» (заседание школы молодых ученых)

1. Колокольцев В.Н., Боровицкая И.В., Ерискин А.А. , Никулин В.Я., Силин П.В., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Дегтярев В.Ф. «Получение оптических пленок металлов на установке «плазменный фокус»» 67
2. Демина Е.В., Прусакова М.Д., Доильницын В.А., Зайцева Н.А., Бабаев А.В. «Влияние термической обработки на коррозионную стойкость малоактивируемой мартенситной стали 13X12B2ГФРТ в щелочной среде» 78

3. Демина Е.В., Прусакова М.Д. В. Широкова, Грибков В.А., Пименов В.Н., Масляев С.А., Бабаев А.В. «Особенности структурных изменений в поверхностном слое композиционного сплава W-1%La₂O₃ под воздействием высокотемпературной импульсной дейтериевой плазмы» 83
4. Селищев П.А., Щербань Л.В. «Распределение точечных дефектов при концентрационном расслоении сплава» 99
5. Молодцов В.Л., Печенкин В.А. «Зависимость энергии образования точечных дефектов от состава Fe – Cr сплавов» 104
6. Конов К.И., Никеров В.А. «Пробеги электронов в толстых и тонких слоях веществ в модели обобщенной диффузии» 110

Вторник, 9 июля

9.00-13.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов”

1. Суржиков А.П., Франгульян Т.С., Гынгазов С.А., Васендина Е.А. «Влияние электронного облучения на микроструктуру приповерхностных слоев композиционной керамики ZrO₂(Y)-Al₂O₃» 117
2. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Винтайкин И.Б. , Поржежинская Е.Ю. «Влияние ионизирующих излучений на спектр пропускания защитного стекла солнечных батарей космических аппаратов» 124
3. Коршунова Д.Д., Пронь Н.П., С. А. Кривелевич С. А. «Нелинейные волны и структуры, индуцированные ионной бомбардировкой, на примере силикатых и интерметаллических систем» 132
4. Прокопьев С.Л., Ивлев Г.Д., Гайдук П.И. «Формирование поверхностного микрорельефа в слоях Si_{1-x}Ge_x при наносекундном лазерном воздействии» 140
5. Kryuchkov S.V., Kukhar E.I., Nikitina O.S. «Influence of the electromagnetic radiation on the energy spectrum of the charge carriers in the graphene» 148
6. Коротков В.В., Загорский Д.Л., Березкин В.В., Бедин С.А., Кудрявцев В.Н., Мchedlishvili Б.В. «Трековые мембраны с наноразмерными порами как матрицы для электроосаждения» 154

металла»

7. R. Shalayev, B. Efros, A. Misiuk, V. Varyukhin, A. Prudnikov, V. Burkhovetsky, B. Surma, J. Bak-Misiuk, W. Wierzchowski, K. Wieteska. «Photoluminescence of nanostructured hydrogen-implanted silicon treated at high temperature & pressure» 158

8. Королев А.А., Козлов С.А., Штумпф С.А. «Уширение и модуляция спектра предельно короткого интенсивного светового импульса при его распространении в диэлектрике с плазменной нелинейностью» 165

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)

1. Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Жилиев Ю.В., Жигунов В.С., Конакова Р.В., Пантелеев В.Н., Саченко А.В., Шеремет В.Н. «Влияние микроволнового излучения на удельное контактное сопротивление омических контактов к n-GaN И n-AlN» 172

2. Матяш И.Е., Минайлова И.А., Мищук О.Н., Сердега Б.К. «Исследование радиационной термоупругости в стекле методом поляризационной модуляции электромагнитного излучения» 178

3. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И. «Особенности изменений оптических свойств высоконаполненных полимеров при облучении вакуумным ультрафиолетом» 183

4. Осадчая А.С., Золотов Д.А., Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Смирнов И.С. «Исследование монокристаллического кремния методом рентгеновской томографии в лабораторных условиях» 188

5. Грач Е.П., Тютнев А.П., Нерето М.О. «Влияние заряженных центров на транспорт дырок в молекулярнодопированных полимерах» 196

6. Четвериков В.М., Смирнов Д.Д., Гузенкова А.С. «Зависимость диэлектрической проницаемости композита от концентрации проводящего наполнителя» 200

7. Дьячкова И.Г., Смирнов И.С., Новоселова Е. Г. «Структурные особенности кристаллов кремния, подвергнутых облучению протонами и термической

обработке» 210

Среда, 10 июля

9.00-13.00 Секция “Радиационная физика металлов”

1. Хофман А., Дидык А.Ю., Семина В.К. «Влияние облучения на коррозию и коррозионное растрескивание под напряжением в аустенитных нержавеющей сталях» 216
2. Углов В.В., Кулешов А.К., Крутилина Е.А., Анищик В.М., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Фазовый и элементный состав поверхностных слоев твердого сплава с титановым покрытием после воздействия компрессионными плазменными потоками» 240
3. Черенда Н.Н., Басалай А.В., Углов В.В., Анищик В.М., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Структура поверхностного слоя меди, легированной атомами титана под действием компрессионных плазменных потоков» 248
4. Быков П.В., Воробьев В.Л., Баянкин В.Я., Лыс В.Ф., Тарасов В.В. «Влияние дозы облучения ионами аргона на формирование состава поверхностных слоев и изменение механических свойств углеродистой стали с нанесенным ионно-плазменным покрытием» 256
5. Исакаков Б.М., Байгисова К.Б. «Расчет потенциальной энергии взаимодействия атомных остовов и электронов проводимости в ГЦК кристаллах» 263
6. Лейви А.Я., Яловец А.П., Черенда Н.Н., Углов В.В., Басалай А.В., Асташинский В.М. «Изменение рельефа поверхности медной мишени при ее обработке компрессионными плазменными потоками» 268
7. Чернова А. Д., Печенкин В. А. «Моделирование радиационно-индуцированной сегрегации в сплавах при высоких дозах ионного облучения» 276
8. Валько Н.Г., Гуртовой В.Г. «Отжиг Co-Ni сплавов, электроосажденных при воздействии рентгеновского излучения» 282

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция «Физические основы радиационной технологии» (заседание школы молодых учёных)

1. Демчишин А.Б., Селищев П.А. «Модификация наноструктурных материалов под влиянием быстрых тяжелых ионов (БТИ)» 287
2. Жарков М.Ю., Люблинский И.Е., Вертков А.В. «Криогенная мишень для токамака Т11-М: назначение, конструкция, первые результаты экспериментов» 289
3. Колодяжный А.Ю., Шешин Е.П. «Формовка автокатода на основе углеродных волокон холодной плазмой аргона» 296
4. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Ахмелкин Д.М. «Методика контроля ионизирующих излучений сенсорами на основе МДП-структур» 305
5. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Масловский В.М., Столяров А.А., Соловьев И.В. «Датчик поглощенной дозы излучения на основе инжекционно-модифицированного МДП-транзистора» 311
6. Никеров А.В., Ихсанов Р.Ш. «Особенности времяпролетных кривых в поликарбонате, молекулярнодопированном тритолиламином» 319
7. Борисов Н.И., Востриков А.В., Тишкин А.М. «Оценка численной устойчивости вычислительной редуцированной схемы, основанной на методах Эйлера» 325
8. Ризаханов Р.Н., Полянский М.Н., Бармин А.А., Рудштейн Р.И. «Функциональные материалы для трубопроводов ядерных энерго-двигательных установок» 332

Четверг, 11 июля

9.00-13.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»

1. Маковийчук М.И. КНИ-сенсорные матрицы. 340
2. Анищик В.М., Валько Н.Г., Война В.В. Электролитическое осаждение композиционных покрытий на основе сплава Zn-Ni под облучением рентгеновским излучением. 346
3. Мельник И.В. Расчет энергетических характеристик триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. 351

4. Ельникова Л.В. Особенности применения позитронной аннигиляционной спектроскопии в трибологии. 359
5. Курбанов К.Р., Матаев М.М. Твердофазные синтезы и фазовый анализ систем РВО-ВЮХ. 367
6. Степанова О.М. Энергоэффективность ионно-лучевых эрозионных технологий обработки материалов. 375
7. Лейви А.Я., Талала К.А., Яловец А.П. Динамические процессы в веществе при радиационной обработке. Численный эксперимент. 383
8. Красников В.С., Бакин Е.И., Яловец А.П., Майер А.Е. Поля напряжений и пластических деформаций в мишени при обработке пучками заряженных частиц. 391

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция «Радиационная физика неметаллических материалов»

1. Амрастанов А.Н., Степович М.А., Гинзгеймер С.А. «О возможности использования модели независимых источников для оценки распределения неосновных носителей заряда, генерированных в полупроводнике остро сфокусированным электронным пучком» 397
2. Илиев Х.М., Исмаилов К.А., Сапарниязова З.М. «Влияние γ -облучения на состояние кластеров примесных атомов в кремнии» 403
3. Медведева И.Ф., Гусаков В.Е., Мулин Л.И., Коршунов Ф.П., Ластовский С.Б. «Влияние температуры облучения на первичные процессы дефектообразования в кремнии» 408
4. Гусаков В. Е. «АВ INITIO исследование дефектов в кремнии: структура, колебательный спектр и диффузия димера кислорода» 417
5. Макаренко Л. Ф., Ластовский С. Б., Коршунов Ф.П., Казючиц Н. М., Абросимов Н.В., Гуринович В.А. «Образование и отжиг дефектов междоузельного типа в кремнии и кремний-германиевых сплавах, облученных альфа-частицами» 426
6. Эминов П.А., Сезонов Ю.И., Гордеева С.В. «Электропроводность нанотрубок в магнитном поле» 432

Пятница, 12 июля

9.00-13.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»

1. Белик Г.А., Абрамешин А.Е., Саенко В.С. «Метод

повышения устойчивости печатных узлов бортовой аппаратуры космических аппаратов к возникновению электростатических разрядов» 440

2. Казючиц Н.М., Макаренко Л.Ф., Наумчик Е.В., Русецкий М.С., Шуленков А.С. «Детекторы ультрафиолетового и ионизирующих излучений на основе синтетического НРНТ алмаза» 446

3. Шиманский В.И., Черенда Н.Н., Концевой Е.В., Углов В.В., Асташинский В.М., Баран Л.В. «Термическая стабильность твердого раствора β -Ti(Mo,Cr), сформированного компрессионными плазменными потоками» 454

4. Суржиков А.П., Лысенко Е.Н., Власов В.А., Малышев А.В. «Синтез Li-Zn феррита в условиях высокоэнергетических воздействий» 462

5. Хасаншин Р.Х., Тимофеев А.Н. «К моделированию композиционных материалов с минимальным выходом продуктов радиолиза» 470

6. Гильман А.Б., Пискарев М.С., Яблоков М.Ю., Кузнецов А.А. «Изменение свойств поверхности пленок фторсодержащих полимеров под воздействием разряда постоянного тока» 478

7. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г. «Переработка и кондиционирование жидких радиоактивных отходов с использованием радиационно-защитных методов и технологий» 486

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция «Радиационная физика металлов»

1. Боровицкая И.В., Коршунов С.Н., Ляховицкий М.М., Мансурова А.Н., Парамонова В.В. «Влияние параметров облучения ионами аргона на поверхностное упрочнение ванадия и его сплавов» 492

2. Углов В.В., Кулешов А.К., Крутилина Е.А., Анищик В.М., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Фазовый и элементный состав поверхностных слоев твердого сплава с титановым покрытием после воздействия компрессионными плазменными потоками» 502

3. Эпов Г. А., Печенкин В. А. «Влияние углерода на набухание облученных в быстрых реакторах аустенитных

нержавеющих сталей»	510
4. Кабышев А.В., Конусов Ф.В. «Эволюция дефектного состояния облученного ионами хрома и отожженного на воздухе оксида алюминия»	519
5. Омаров С.С., Бегимов Т.Б., Тукибаева М.А., Нысанбаева С.К. «Влияние ядерных реакций на образование дефектов и физические свойства материалов»	527
6. Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А. «Влияние нейтронного излучения на теплофизические параметры некоторых конструкционных материалов»	535
7. Абдукадырова И.Х., Хайдаров Т., Болтабаев А.Ф. «Исследование радиационного упрочнения алюминиевого сплава»	538

Суббота, 13 июля

9.00-13.00

1. Понарядов В.В., Пилипенко В.А., Турцевич А.С., Шведов С. В., Горушко В.А., Петлицкая Т.В. «Применение БТО для получения элементов СБИС на основе пленок легированного поликремния»	542
2. Масляев С.А., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Грибков В.А., Дубровский А.В., Сасиновская И.П., Пруцков М.Е., Колмаков А.Г., Сиротинкин В.П., Шамрай В.Ф. «Воздействие мощных импульсных потоков ионов и высокотемпературной плазмы на оксид алюминия»	547
3. Гильман А.Б., Яблоков М.Ю., Кузнецов А.А. «Обработка в низкотемпературной плазме – эффективный метод модификации углеродных нанообъектов»	560
4. Мискевич С.А., Комаров Ф.Ф., Заяц Г.М., Комаров А.Ф. «Численное моделирование радиационных изменений характеристик МДП-приборов»	569
5. Онанко А.П., Онанко Ю.А. «Измерение механических характеристик ультразвуковым способом после облучения»	577
6. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Йе Наинг Тун. «Влияние искривленности поверхности электрода на энергетические распределения потоков частиц в приэлектродном слое тлеющего разряда»	584

ПЕРЕРАБОТКА И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ЖИДКИХ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

¹Ястребинский Р.Н., ²Бондаренко Г.Г.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: yrndo@mail.ru)

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Москва, ул. Мясницкая, д.20; e-mail: gbondarenko@hse.ru)

Развитие атомной энергетики требует разработки и внедрения целостной системы по обращению с радиоактивными отходами (РАО), основой которой является концепция, охватывающая вопросы их переработки, хранения, транспортировки и захоронения. Конечной целью концепции является отработка технологий и оборудования для переработки отходов, проектов их безопасного хранения и захоронения, а также руководство нормативной документации по обращению с РАО. В России пока нет высокопроизводительных промышленных установок для утилизации жидких радиоактивных отходов (ЖРО), и поэтому объемы опасных для окружающей среды отходов на атомных электростанциях непрерывно возрастают. Емкости для их хранения заполнены почти полностью, а сроки эксплуатации АЭС продлеваются. По данным Счетной палаты РФ, которые были опубликованы еще в 2001 году, Россия вступила в новый век с накопленными РАО и ОЯТ суммарной активностью более 6 млрд. кюри. При этом для хранения РАО и ОЯТ применялись технологии, разработанные еще на заре атомной эры. На многих АЭС РАО хранят без переработки.

Используемые в настоящее время методы и технологические схемы переработки и кондиционирования ЖРО должны обеспечивать снижение концентрации радионуклидов в очищенных водах до установленных МАГАТЭ норм (10^{-8} Ки/л ($3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг) [1]. На современном этапе развития техники такая глубина очистки отработанных дезактивирующих растворов (при условии минимизации объема вторичных отходов) возможна только с применением методов ионного обмена (дренажные контурные воды с солесодержанием менее

100 мг/л) и упаривания (высокосолевые растворы), эффективности которых препятствует содержание оксалатов и ПАВ.

Отработанные ионообменные смолы и кубовые концентраты от упаривания ЖРО хранятся на АЭС или пунктах переработки в емкостях объемом от 200-500 м³ до 5-7 тыс. м³, выполненных из нержавеющей стали и помещенных в железобетонные отсеки, оборудованные системой раскочки емкостей монжусами. Такое временное хранение из-за коррозии материала емкостей не может исключить на большой срок (более 20 лет) утечку концентрата и загрязнения окружающей среды [2]. Поэтому необходим перевод концентратов в твердую форму путем включения в матричный материал, хорошо совместимый с компонентами ЖРО, обладающий высокими физико-механическими и изолирующими свойствами, обеспечивающими безопасность хранения и изоляционный барьер между радионуклидами и окружающей средой. При этом отверждение концентратов ЖРО должно не только снизить на 3-4 порядка возможность выхода радионуклидов в окружающую среду, но и обеспечить безопасность обращения с отходами и уменьшить затраты на их хранение по сравнению с жидкими концентратами.

В связи с этим, в настоящее время наиболее актуально создание единой технологии переработки и кондиционирования радиоактивных отходов, обеспечивающей химическую, тепловую и радиационную устойчивость, пониженную радиационную активность, взрывобезопасность, механическую прочность получаемого продукта, концентрирование радионуклидов в меньшем объеме, отсутствие газовыделения, а также высокие экономические показатели.

Нами предлагается экологически безопасная технология переработки жидких радиоактивных отходов: актинидов и продуктов деления, обеспечивающая снижение их МЭД (мощности экспозиционной дозы) и исключая возможность их контакта с биосферой. Технология предполагает ступенчатую очистку и включает следующие стадии:

- разложение органической составляющей ЖРО различного состава автоклавной обработкой растворов;
- упаривание высокосолевых дезактивирующих растворов после автоклавной обработки;
- ионоселективная очистка дезактивирующих растворов и дренажных контурных вод на модифицированных железооксидных ионообменниках;

- цементирование отработанных ионообменников и осадков в бетонные компаунды;
- утилизация образованных компаундов внутри радиационно-стойких железо-магнетито-серпентинитовых бетонных контейнеров.

Исходные ЖРО обладают тонкодисперсной развитой коагуляционной структурой, которая сильно затрудняет процессы водоотделения и компактирования. Для устранения этих недостатков разработан метод предварительной тепловлажностной обработки отходов в автоклаве при давлении пара 0,8-1,2 МПа и температуре 180-200°C. Автоклавирование ЖРО обеспечивает разрушение коагуляционных структур отходов, стабилизацию органических составляющих, полную стерилизацию, улучшается водоотделение и происходит уменьшение объема отходов до 50%.

Снижение МЭД радиоактивных отходов заключается в переводе жидких радиоактивных отходов в твердые радиоактивные отходы низкой активности концентрированием радионуклидов из ЖРО внутри железооксидной матрицы радиационно-защитных ионообменников. Благодаря высокой плотности железооксидные ионообменники обеспечивают эффективный радиационно-защитный экран от фотонного излучения с энергией до 2 МэВ [3,4].

При достаточно высоком уровне научных и практических исследований в области создания высокоэффективных сорбционных технологий и утилизации отработанных радиоактивных ионообменников, до сих пор не проводились исследования по получению ионообменных материалов, обладающих эффектом радиационной защиты. Анализ отечественной и зарубежной литературы свидетельствует о нерешенности общих подходов к созданию подобных радиационно-защитных ионообменников радионуклидов, что, безусловно, тормозит прогрессу в данной области. Применение свинецсодержащих материалов ограничено их высокой токсичностью, поэтому в данном направлении наиболее перспективны природные железооксидные минеральные системы.

Впервые разработаны научные основы синтеза ионоселективных сорбентов радионуклидов, отличающихся тем, что в качестве основного носителя использована ультрадисперсная модифицированная железооксидная матрица, обладающая радиационно-защитным эффектом. Исходным сырьем для получения ионообменников являются ультрадисперсные железооксидные порошки плотностью 4900-5100 кг/м³, обладающие высоким сечением захвата радиоизотопов. Предварительная механоактивация оксидов

железа и последующая термическая обработка совместно с боросиликатными соединениями позволяет получать высокоразвитую пористую матрицу. Модификаторами служат водорастворимые кремнийорганические соединения, имеющие в своей структуре силанольные ионообменные группировки и создающие с поверхностью железоксидной подложки гидrolитически стабильную систему связей [5].

Разработанные железоксидные ионообменники предназначены для концентрирования широкого спектра наиболее токсичных радионуклидов: ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{60}Co , ^{238}Pu , ^{241}Am и по своим ионообменным свойствам превосходят сорбенты на основе ионообменных смол (КУ 2-8 (Россия), “Амберлит“ (Rand H), “Ионак” (ICC) (США), “Вофатит”, “Пермулит” (Perm) (Германии), “Остион” (SCh) (Чехия), “Синрок” (Австралия) и др.). При этом кратность защиты от фотонного излучения в 5 раз выше, чем у традиционных ионообменников. Кроме того, максимальная рабочая температура синтезированных ионообменников в 4,0-4,5 раза выше, чем у известных материалов и составляет 450 °С.

Применение таких радиационно-защитных сорбентов позволит обезопасить обслуживающий персонал атомных станций при обращении с отработанными сорбентами, так как в этом случае, после сорбции, радионуклиды упакованы внутри железоксидной матрицы, гасящей фотонное излучение. Разработанные модифицированные железоксидные сорбенты обладают химической стойкостью, механической прочностью и высокой скоростью массообмена.

Разработанная технология утилизации отработанных железоксидных сорбентов путем включения их в железобетонную матрицу обеспечивает получение объекта разработки с повышенными химической, тепловой и радиационной устойчивостью, пониженной радиационной активностью, взрывобезопасностью, требуемой механической прочностью, отсутствием газовой выделений, а также с высокими экономическими показателями.

Определены оптимальные условия (технологические и физико-химические параметры) надежной цементации образующихся осадков и отработанных ионообменников в зависимости от доли перерабатываемой пульпы в компаунде и концентрации вводимых фосфатов.

Полученные таким образом цементные компаунды должны соответствовать НП-019-2000 и обладать характеристиками, представленными в таблице.

Таблица

Свойства цементных компаундов с отработанными железоксидными
ионообменниками

Свойство материала	Показатель
Удельная активность компаунда: бета-активность альфа-активность	$<3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/кг ($1 \cdot 10^{-3}$ Ку/г) $<3,7 \cdot 10^7$ Бк/кг ($1 \cdot 10^{-6}$ Ку/г)
Водоустойчивость (скорость выщелачивания радионуклидов по ^{137}Cs и ^{90}Sr)	$<1 \cdot 10^{-4}$ г/см ² сут
Механическая прочность (предел прочности при сжатии)	≥ 50 кгс/см ²
Радиационная устойчивость (механическая прочность после облучения дозой 10^6 Гр (10^8 рад))	>50 кгс/см ²
Устойчивость к термическим циклам (механическая прочность после 30 циклов замораживания и оттаивания (-40...+40°C))	не менее 50 кгс/см ²
Водостойкость (механическая прочность после 90-дневного погружения в воду)	не менее 50 кгс/см ²

Таким образом, разработанные научно-методические подходы и технологические решения по снижению активности радиоактивных отходов, переводение их в экологически безопасное состояние, теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности получения радиационно-защитных ионообменников позволят развить новые научно-технические направления в области переработки ЖРО.

Разработанные радиационно-защитные железоксидные ионообменники найдут широкое применение для очистки радиоактивных водных сред в атомной энергетике, на радиохимических предприятиях по переработке жидких радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива, при дезактивации воды в регионах с аномально повышенной концентрацией радионуклидов в природных водах, очистке техногенных вод от тяжелых металлов, очистке питьевой воды др.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0298.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технический доклад МАГАТЭ. Утилизация радиоактивных отходов / Вена. 2003. №116. 135 с.
2. Хеспе Э.Д. Испытания отвержденных РАО на выщелачивание / АИНФ -155 (П) // М.: Атомиздат. 2001. 212 с.
3. Экологически безопасная и безотходная технология кондиционирования и утилизации радиоактивных отходов / Р.Н. Ястребинский, Е.И. Евтушенко, Д.В. Воронов, Н.А. Четвериков // Современные проблемы науки и образования. 2012. №6. URL: <http://www.science-education.ru>
4. Композиционный материал для защиты от гамма излучения / Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, П.В. Матюхин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 15–18.
5. Модифицирование природных минеральных систем для очистки воды от радионуклидов / Е.П. Клочков, В.И. Павленко, П.В. Матюхин, А.В. Ястребинская // Современные проблемы науки и образования. 2012. №6. URL: <http://www.science-education.ru>