DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-71-78 УДК 544.72; 544.58; 621.039.7

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ СЛОЖНОГО СОСТАВА ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУНКТА ХРАНЕНИЯ ОЯТ

А. В. Радкевич, В. В. Торопова, А. М. Зарубо, О. Б. Коренькова

Государственное научное учреждение «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2025 г.

В ходе работы изучено состояние радионуклидов плутония и америция в жидких радиоактивных отходах (ЖРО), образовавшихся при выводе из эксплуатации (ВЭ) пункта хранения отработанного ядерного топлива передвижной АЭС. Определено, что в ЖРО сложного состава после 10 лет хранения 95% плутония и 60% америция образуют псевдоколлоидные частицы с размером более 1 нм, а 5% плутония и 40% америция — моноядерные комплексы с органическими лигандами. Для удаления радионуклидов плутония и америция из исследуемых ЖРО был применен комбинированный окислительно-осадительный способ, включающий введение в раствор окислителя — перманганата калия, с последующей коагуляцией и флокуляцией. Значение коэффициента очистки составило 500—2 000, по результатам радиационного контроля дезактивированные растворы были выведены из категории ЖРО.

Ключевые слова: *состояние радионуклидов в растворах, радионуклиды плутония и америция, переработка жидких радиоактивных отходов, осаждение, окисление, радиоактивные отходы.*

Введение

Одной из основных сфер деятельности Института ядерной энергетики АН БССР (в настоящее время — государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси) являлась разработка газоохлаждаемых ядерных реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. В рамках развития данного направления с 1970 годов в институте проводились опытно-конструкторские работы по созданию передвижной АЭС «Памир-630Д» (ПАЭС) тепловой мощностью 5 МВт с диссоциирующим теплоносителем и рабочим телом «нитрин» на основе N_2O_4. В 1985—1987 годах ПАЭС прошла предварительные испытания в течение ~3 000 часов на различных уровнях мощности. С целью обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) ПАЭС в 1990 году был введен в эксплуатацию пункт хранения (ПХ ОЯТ). ОЯТ было размещено в бассейнах выдержки с 1991 по 2010 год. После его удаления, в соответствии с требованиями [1], начаты работы по ВЭ ПХ ОЯТ.

В ходе эксплуатации проводились дезактивации поверхностей оборудования и помещений ПХ ОЯТ. Применялись различные дезактивирующие композиции для изделий из углеродистой и нержавеющей сталей, полимерных покрытий, бетона, в связи с чем образовавшиеся растворы имели сложный радиохимический состав. Они

включали изотопы плутония, америция-241, а также следовые количества цезия-137, кобальта-60, европия-152, -154 с содержанием ниже максимально допустимого уровня активности 20 Бк/кг. Химический состав характеризовался присутствием органических комплексонов, поверхностно-активных веществ (ПАВ), карбоната натрия. С учетом величины общей удельной α-активности до $1{,}8 \cdot 10^4$ Бк/кг растворы дезактивации были классифицированы как низко- и среднеактивные (НАО и САО) ЖРО [2] и размещены на хранение в специальных емкостях.

Согласно общепринятым подходам [3], [4], переработка и удаление радиоактивных отходов (РАО), образовавшихся при эксплуатации объекта использования атомной энергии, является одной из основных задач, выполняемых после прекращения его эксплуатации по проектному назначению. В проекте ВЭ должны быть приведены и обоснованы конкретные технические и организационные меры по обращению с РАО с целью приведения их в безопасное состояние для долговременного хранения или захоронения. При отсутствии или неприменимости существующих на объекте технологий и установок, необходимые для разработки проекта исходные данные могут быть получены в рамках планирования и подготовки к ВЭ.

Основной целью данной научно-исследовательской работы было обоснование эффективных способов переработки ЖРО при выводе ПХ ОЯТ из эксплуатации. Степень их опасности обусловлена присутствующими в них α-излучателями с высокой радиотоксичностью — радионуклидами плутония и америция-241. Это определяет требования к достижению максимально возможных коэффициентов очистки растворов от указанных радионуклидов, для которых уровни отнесения к ЖРО составляют 10 Бк/дм^3 [5].

Согласно химическим свойствам плутония и америция, при данных величинах pH и солесодержании радионуклиды в растворе могут находиться в различных степенях окисления, образовывать полимерные гидролизные формы, коллоидные частицы и осадки. Плутоний имеет большую склонность к гидролизу и образованию нерастворимых соединений, тогда как америций характеризуется большей растворимостью [6]. Одновременно в растворе присутствует значительное количество сильных комплексообразователей и ПАВ, что существенно изменяет распределение форм радионуклидов, подавляет их гидролиз за счет полного или частичного замещения гидроксогрупп в первой координационной сфере металл-иона, увеличивает стабильность коллоидных и псевдоколлоидных частиц, что в целом приводит к увеличению растворимости. Установление форм нахождения радионуклидов в ЖРО и их поведения в различных физико-химических процессах являлось основной задачей, которая должна быть решена при обосновании эффективных способов переработки ЖРО.

Экспериментальная часть

Определение содержания радионуклидов плутония в растворах проводилось методом альфа-спектрометрии с предварительным радиохимическим выделением. Для америция-241 применялся метод гамма-спектрометрии на спектрометре рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучения с планарным полупроводниковым детектором.

В качестве интегрального показателя для определения относительного изменения содержания радионуклидов в исследуемых растворах использовалась суммарная удельная активность альфа- и бета-излучающих радионуклидов, которая определялась в соответствии с методиками согласно СТБ ISO 9696-2010 и СТБ ISO 9697-2010 [7], [8]. Измерение активности производилось на альфа-бета-радиометре для измерения малых активностей УМФ-2000.

Перед этим ЖРО отфильтровывались через бумажный фильтр «синяя лента».

Состояние радионуклидов в них исследовалось методами микро- и ультрафильтрации, центрифугирования и ионного обмена.

Для оценки дисперсного состояния радионуклидов плутония и америция в ЖРО были выполнены эксперименты по мембранному разделению. Ультрафильтрация проводилась в ячейке Millipore Amicon 8200 при давлении 0,3 МПа. Использовались мембраны из регенерированной целлюлозы с размером пор ~ 1 нм (предел отсечения 1 000 дальтон), 25 нм, и нитроцеллюлозы 300 нм производства Millipore.

Центрифугирование растворов проводилось с помощью лабораторной центрифуги ОПн-8 на скорости вращения ротора 8 000 об./мин в течение 30 минут. Данные условия обеспечивают осаждение частиц размером более 50 нм [9].

В экспериментах по ионному обмену использовались сильнокислотная катионообменная смола KW-8 в Na-форме и сильноосновная анионообменная смола А4 в Cl-форме производства Resinex. Процесс проводился в статических условиях в течение 1 сут при $V/m = 100$. Коэффициент распределения радионуклидов рассчитывался по формуле:

$$K_{\text{р}} = \frac{A_{\text{исх}} - A_{\text{к}}}{A_{\text{к}}} \cdot \frac{V}{m}, \quad (1)$$

где $A_{\text{исх}}$ и $A_{\text{к}}$ — удельные активности радионуклида в исходном и конечном растворах соответственно, Бк/дм^3; V — объем раствора, см^3; m — навеска смолы, г.

Для определения степени очистки при коагуляции применялись растворы хлорида железа (III) и полиоксихлорида алюминия (III). В целях увеличения размера образуемых частиц и ускорения осаждения в них добавлялся катионный флокулянт — полиакриламид марки Praestol 857 BS со средней молекулярной массой до 10 млн дальтон. После добавления реагентов, растворы выдерживались в течение 1 часа, после чего декантировались или фильтровались на бумажном фильтре «синяя лента».

В качестве показателя, характеризующего степень удаления радионуклидов из раствора, использовался коэффициент очистки ($K_{\text{оч}}$):

$$K_{\text{оч}} = \frac{A_{\text{исх}}}{A_{\text{к}}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{исх}}$ и $A_{\text{к}}$ — удельные активности радионуклида в исходном и конечном растворах соответственно, Бк/дм^3.

Окисление органических компонентов ЖРО проводилось введением газообразного озона, добавлением растворов пероксида водорода и перманганата калия. Озонирование выполнялось в проточном режиме в течение 30 минут озонатором ОГВК–05КЦ производства «МЭЛП», доза для каждого образца определялась как общая масса пропущенного через раствор озона, отнесенная к объему раствора.

Для определения pH применяли иономер лабораторный И-160: измерительный электрод — стеклянный, электрод сравнения — хлорсеребряный. Взвешивание производили на аналитических весах Adventurer RV 214.

Использованные химические реагенты имели чистоту марок ч.д.а., х.ч. Все растворы готовились на дистиллированной воде.

Результаты и обсуждение

Растворы дезактивации ПХ ОЯТ при образовании обладали сложным составом, который определялся набором радионуклидов, присутствующих в них, и компонентами применяемых дезактивирующих композиций. Основные параметры отнесенных к ЖРО растворов дезактивации на момент образования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики ЖРО на момент образования

Параметр	Значение
Категория ЖРО по радиационной опасности	НАО, САО
Радионуклидный состав	ΣPu, ^{241}Am
Общая удельная α-активность, Бк/кг	$5{,}5\cdot10^1$–$1{,}8\cdot10^4$
Общая удельная β-активность, Бк/кг	$1{,}0\cdot10^2$–$2{,}3\cdot10^3$
Объем, м^3	5,7
Химический состав, мг/дм^3: • органические комплексоны (оксиэтидидендифосфоновая кислота, ЭДТА и др.); • ПАВ (алкилсульфаты); • карбонат натрия	 до 1 000 до 400 до 700

В дальнейшем, при хранении ЖРО в емкостях ПХ ОЯТ, в течение нескольких лет произошло значительное снижение активности верхнего слоя жидкости за счет укрупнения частиц, содержащих радионуклиды плутония и америция, и перехода их в осадок. Результаты измерений объемной активности радионуклидов в верхнем слое ЖРО в зависимости от времени после их образования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение объемной активности радионуклидов в верхнем слое ЖРО в зависимости от времени после их образования, %

Радионуклид	Время после образования ЖРО, лет			
	0	1	6	10
ΣPu	100	0,54	0,35	0,38
^{241}Am	100	6,70	0,22	0,13

Полученные результаты показывают, что 99,5 % плутония и 93,3 % америция переходят в осадок уже через 1 год после образования ЖРО. Растворимая доля плутония стабилизируется на уровне (0,35—0,38) % от исходной после 6 лет хранения, а количество америция продолжает снижаться до 0,13 % через 10 лет. Образовавшиеся осадки радионуклидов представлены относительно крупными стабильными частицами, поскольку после перемешивания достигается их быстрое осаждение и удельная активность надосадочной жидкости через 1 сут возвращается к значению, полученному при отборе без перемешивания. При этом удельная активность радионуклидов, оставшихся в растворенном состоянии, существенно превышает уровень отнесения к ЖРО.

Определение химического состава надосадочной части ЖРО без перемешивания было

проведено перед установлением форм нахождения в них радионуклидов (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав ЖРО без перемешивания после временного хранения

Параметр	Значение	Методика определения
Водородный показатель (pH)	8,8	Руководство по эксплуатации иономера И-160
Удельная электропроводность χ, мкСм/см	2 240,0	Руководство по эксплуатации кондуктометра Aqua lytic Al20Con
Перманганатная окисляемость, мг/дм^3	32,0	ГОСТ 23268.12-78 [10]
Сухой остаток, мг/дм^3	1 950,2	ГОСТ 18164-72 [11]
Плотность раствора, кг/дм^3	1,02	ГОСТ 18995.1-73 [12]

ЖРО характеризуются слабощелочной средой и умеренным солесодержанием порядка 2 г/дм^3. По сравнению с химическим составом на момент их образования, существенно снизилась концентрация растворенных органических соединений, что, по-видимому, связано с переходом в осадок.

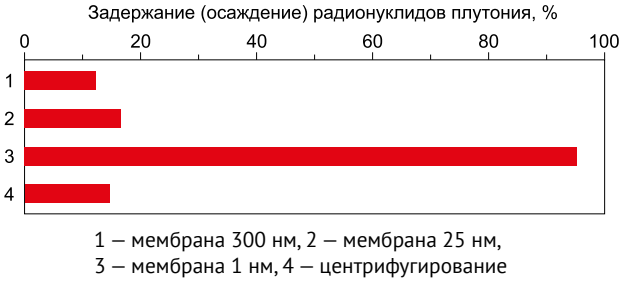
Результаты определения форм радионуклидов плутония в ЖРО различными методами представлены в табл. 4.

Таблица 4. Установление форм радионуклидов плутония в ЖРО

Метод разделения	Результат	Вывод о форме радионуклидов плутония
Ионный обмен (катионит)	$K_р < 100$	незначительное количество катионных форм
Ионный обмен (анионит)	$K_р < 100$	незначительное количество анионных форм
Коагуляция + флокуляция	$K_{оч} = 3,3$	~70 % крупных псевдоколлидных частиц
Озонирование + коагуляция	$K_{оч} = 940$	псевдоколлоидные частицы, стабилизированные органическими комплексонами

Полученные данные в целом характерны для поведения плутония в растворе с нейтральным pH и комплексообразователями. Незначительные коэффициенты распределения на ионообменных смолах указывают на его преимущественно неионное состояние в виде псевдоколлоидных частиц, стабилизированных органическими комплексонами. Осаждением при коагуляции/флокуляции удаляется 70 % радионуклидов, присутствующих в виде крупных псевдоколлоидов, тогда как оставшиеся 30 %, по-видимому, содержатся в мелких частицах и растворимых комплексных соединениях. Стабилизация плутония органическими комплексонами подтверждается по результатам введения в раствор сильного окислителя. Озонирование растворов приводит к существенным изменениям форм нахождения плутония: происходит разрушение органических соединений с укрупнением частиц, содержащих плутоний, которые практически полностью удаляются при коагуляции.

Для детальной оценки дисперсного состояния проведены эксперименты по ультрафильтрации на мембранах с различным размером пор и центрифугированию ЖРО (рис. 1).



1 — мембрана 300 нм, 2 — мембрана 25 нм,
3 — мембрана 1 нм, 4 — центрифугирование

Рис. 1. Задержание (осаждение) радионуклидов плутония при ультрафильтрации на мембранах с различным размером пор (центрифугировании)

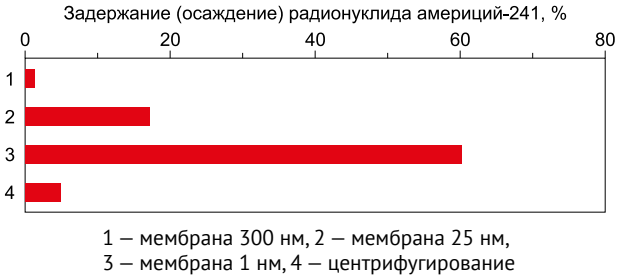
Показано, что основная доля плутония, 75 %, входит в состав частиц размером от 1 до 25 нм, 20 % — в частицы более 25 нм и только порядка 5 % образуют моноядерные комплексные соединения. Данные центрифугирования растворов соответствуют показателям ультрафильтрации.

Результаты определения форм и дисперсного состояния америция-241 в ЖРО различными методами представлены в табл. 5 и на рис. 2.

Таблица 5. Установление форм америция-241 в ЖРО

Метод разделения	Результат	Вывод о форме америция-241
Ионный обмен (катионит)	$K_р < 100$	незначительное количество катионных форм
Ионный обмен (анионит)	$K_р < 100$	незначительное количество анионных форм
Коагуляция + флокуляция	$K_{оч} = 2,1$	~50 % крупных псевдоколлидных частиц
Озонирование + коагуляция	$K_{оч} > 200$	псевдоколлоидные частицы, стабилизированные органическими комплексонами

Распределение форм америция-241 в ЖРО следует таким же закономерностям, как и для радионуклидов плутония, с учетом меньшей



1 – мембрана 300 нм, 2 – мембрана 25 нм,
3 – мембрана 1 нм, 4 – центрифугирование

Рис. 2. Задержание (осаждение) радионуклида америций-241 при ультрафильтрации на мембранах с различным размером пор (центрифугировании)

склонности его к гидролизу и комплексообразованию. В целом, доля крупных частиц, содержащих америций, меньше соответствующей доли крупных частиц, содержащих плутоний, при этом значительно выше содержание моноядерных форм америция. Порядка 80% америция образуют частицы размером менее 25 нм, а количество моноядерных комплексов с размером менее 1 нм и псевдоколлоидов размером 1—25 нм сопоставимо.

На рис. 3 представлены обобщенные данные по состоянию радионуклидов плутония и америция-241 в ЖРО после временного хранения.

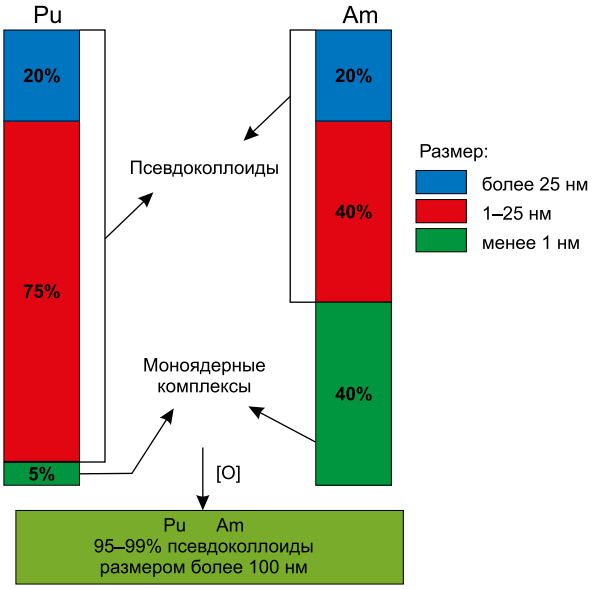
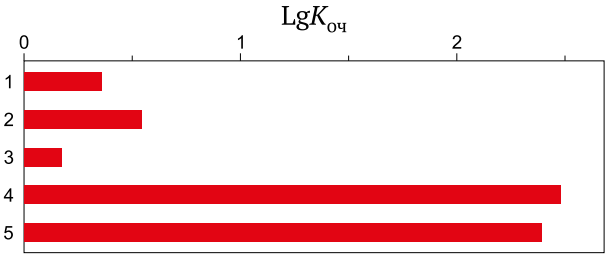


Рис. 3. Состояние радионуклидов плутония и америция-241 в ЖРО

На основании данных о формах радионуклидов показано, что высокая эффективность при очистке ЖРО, в первую очередь по америцию-241, может быть достигнута при разрушении их комплексных соединений с органическими компонентами раствора. Как было показано, высокий окислительный потенциал озона позволяет проводить окисление присутствующих в ЖРО соединений. В качестве альтернативных окислителей, помимо газообразного озона, были исследованы перекись водорода в присутствии Fe(II) и перманганат калия, которые, при в целом меньшей окисляющей способности, не требуют специального оборудования и могут применяться в виде готовых растворов. Результаты экспериментальной отработки комбинированных способов очистки ЖРО, включающие стадии окисления, ионного обмена и коагуляции радионуклидов, представлены на рис. 4.



1 – коагуляция/флокуляция, 2 – перекись водорода/Fe(II),
3 – озонирование/ионный обмен,
4 – озонирование/коагуляция/флокуляция,
5 – перманганат калия/коагуляция/флокуляция

Рис. 4. Эффективность очистки ЖРО различными комбинированными способами

Представленные результаты показывают, что наибольшая эффективность дезактивации ЖРО достигается при использовании в качестве окислителей озона и перманганата калия с последующей коагуляцией/флокуляцией, при этом суммарный коэффициент очистки достигает 245 и 300. По объемной активности радионуклидов полученные растворы ниже уровней отнесения к ЖРО.

Заключение

Состояние плутония и америция в ЖРО сложного радиохимического состава установлено на основании данных по поведению радионуклидов в процессах ионного обмена, микро- и ультрафильтрации, центрифугирования, коагуляции и флокуляции: 95% плутония и 60% америция образуют псевдоколлоидные частицы с размером более 1 нм, а 5% плутония и 40% америция образуют моноядерные комплексы с органическими лигандами. Присутствие таких соединений существенно увеличивает стабильность содержащих радионуклиды форм по отношению к методам удаления из растворов. Показана возможность изменения состояния радионуклидов за счет разрушения комплексообразователей и ПАВ при окислении.

Экспериментально обоснован комбинированный окислительно-осадительный способ переработки ЖРО, включающий введение окислителя — перманганата калия — с последующей коагуляцией и флокуляцией, что позволяет за один цикл снизить активность растворов ниже требуемого уровня.

Предложенные технологические решения реализованы при выводе из эксплуатации ПХ ОЯТ. При переработке 5,7 м^3 ЖРО достигнут коэффициент очистки от радионуклидов плутония и америция 500—2 000, и растворы по результатам радиационного контроля выведены из категории ЖРО. После кондиционирования суммарный коэффициент сокращения объема РАО составил порядка 100, что пропорционально снизило затраты на изоляцию отвержденных отходов. Образовавшиеся вторичные РАО кондиционированы и переданы на долговременное хранение на спецпредприятие по обращению с радиоактивными отходами УП «Экорес».

Литература

1. Об использовании атомной энергии : закон Респ. Беларусь от 30 июл. 2008 г. № 426-З. Доступ из информ.-правовой системы «Эталон online».
2. Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами : постановление Минздрава Респ. Беларусь от 31 дек. 2015 г. № 142. Доступ из информ.-правовой системы «Эталон online».
3. Вывод из эксплуатации установок : Нормы безопасности МАГАТЭ № GSR Part 6. — URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1652r_web.pdf (дата обращения: 12.11.2025).
4. Рекомендации по разработке концепции вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии : приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 июл. 2021 г. № 265. — URL: https://docs.secnrs.ru/catalog/RB/RB_008_21/# (дата обращения: 12.11.2025).
5. Критерии оценки радиационного воздействия : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 25 янв. 2021 № 37 (с изм. и доп., внесенными постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 29 нояб. 2022 № 829). Доступ из информ.-правовой системы «Эталон online».
6. *Давыдов Ю. П., Давыдов Д. Ю.* Формы нахождения металл–ионов (радионуклидов) в растворе. — Минск : Беларуская навука, 2011. 189 с.
7. Качество воды. Измерение общей альфа-активности в питьевой воде. Метод толстослойного источника : постановление Госстандарта Респ. Беларусь от 15 фев. 2010 № 3. — URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293739/4293739435.pdf (дата обращения: 12.11.2025).
8. Качество воды. Общая бета-активность в питьевой воде. Метод толстослойного источника : постановление Госстандарта Респ. Беларусь от 29 окт. 2016 № 83. — URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739447.pdf (дата обращения: 12.11.2025).
9. *Beneš P., Majer V.* Chemistry of Aqueous Solutions: General Chemistry and Radiochemistry. — Praga, Academia, 1980. 100 p.

Информация об авторах

Радкевич Артем Валерьянович, заведующий лабораторией «Форм радионуклидов (металл-ионов) в растворах», Государственное научное учреждение «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, Республика Беларусь, Минск, а/я 119), e-mail: radkevich@sosny.bas-net.by.

Торопова Валентина Владимировна, старший научный сотрудник, Государственное научное учреждение «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, Республика Беларусь, Минск, а/я 119), e-mail: vtoropova@sosny.bas-net.by.

Зарубо Александр Михайлович, старший научный сотрудник, Государственное научное учреждение «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, Республика Беларусь, Минск, а/я 119), e-mail: aliaksandr.zaruba@sosny.bas-net.by.

Коренькова Ольга Борисовна, научный сотрудник, Государственное научное учреждение «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, Республика Беларусь, Минск, а/я 119), e-mail: korenkova_olya@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Радкевич А. В., Торопова В. В., Зарубо А. М., Коренькова О. Б. Обоснование способа переработки жидких радиоактивных отходов сложного состава при выводе из эксплуатации пункта хранения ОЯТ // Радиоактивные отходы. 2026. № 1 (34). С. 71—78. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-71-78.

JUSTIFICATION OF A TREATMENT METHOD FOR LIQUID RADIOACTIVE WASTE OF COMPLEX COMPOSITION FROM THE DECOMMISSIONING OF A SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY

Radkevich A. V., Toropova V. V., Zarubo A. M., Korenkova O. B.

State Scientific Institution "Joint Institute for Power and Nuclear Research — Sosny" of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Article received on November 25, 2025

The study examined the state of plutonium and americium radionuclides in liquid radioactive waste (LRW) generated during the decommissioning of a spent nuclear fuel storage facility at a mobile NPP. The study shows that after a decade of storage in LRW of complex composition, up to 95% of the plutonium and 60% of the americium account for pseudocolloidal species larger than 1 nm, while 5% of the plutonium and 40% of the americium form mononuclear complexes with organic ligands.

A combined oxidation-precipitation method was used to remove plutonium and americium radionuclides from the studied liquid radioactive waste. Thus, potassium permanganate was added as an oxidizing agent to the solution, followed by coagulation and flocculation. The decontamination factor was 500–2000; based on radiation monitoring results, the treated solutions were referred to the non-radioactive waste category.

Keywords: *radionuclide speciation in solutions, plutonium and americium radionuclides, liquid radioactive waste processing, precipitation, oxidation, radioactive waste.*

References

1. *Ob ispol'zovanii atomnoy energii* [On Atomic Energy Use] : Law of the Republic of Belarus of July 30, 2008, No. 426-Z. Accessed from the information and legal system Etalon Online.

2. *Trebovaniya k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti personala i naseleniya pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami* [Requirements for the Radiation Safety of Personnel and the Population During Radioactive Waste Management] : Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of December 31, 2015, No. 142. Accessed from the information and legal system Etalon Online.

3. Decommissioning of Facilities : IAEA Safety Standards No. GSR Part 6. — URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1652r_web.pdf (accessed on November 12, 2025).

4. *Rekomendatsii po razrabotke kontseptsii vyvoda iz ekspluatatsii ob"yekta ispol'zovaniya atomnoy energii* [Recommendations for the development of a decommissioning concept for a nuclear facility] : Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of July 30, 2021

No. 265. — URL: https://docs.secnrs.ru/catalog/RB/RB_008_21/# (accessed on November 12, 2025).

5. *Kriterii otsenki radiatsionnogo vozdeystviya* [Radiation exposure assessment criteria] : Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of January 25, 2021 No. 37 (as amended and supplemented by the Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of November 29, 2022 No. 829). Accessed from the information and legal system Etalon Online.

6. Davydov Yu. P., Davydov D. Yu. *Formy nakhozhdeniya metall–ionov (radionuklidov) v rastvore* [Metal Ion (Radionuclide) Speciation in Solution]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 189 p.

7. *Kachestvo vody. Izmereniye obshchey al'fa-aktivnosti v pit'yevoy vode. Metod tolstosloynogo istochnika* [Water Quality. Measurement of Total Alpha Activity in Drinking Water. Thick-Film Source Method] : Decree of the State Standard of the Republic of Belarus of February 15, 2010, No. 3. — URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293739/4293739435.pdf (accessed on November 12, 2025).

8. *Kachestvo vody. Obshchaya beta-aktivnost' v pit'yevoy vode. Metod tolstosloynogo istochnika* [Water Quality. Total Beta Activity in Drinking Water. Thick-Film Source Method] : Decree of the State Standard of the Republic of Belarus of October 29, 2010, No. 3. 2016 No. 83. — URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739447.pdf (accessed on November 12, 2025).

9. Beneš P., Majer V. Chemistry of Aqueous Solutions: General Chemistry and Radiochemistry. Praga, Academia Publ., 1980. 100 p.

Information about the authors

Radkevich Artyom Valeryanovich, Head of the laboratory of "Forms of radionuclides (metal ions) in solutions", State Scientific Institution "Joint Institute for Power and Nuclear Research — Sosny" of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. Box 119, Minsk, 220109, Republic of Belarus), e-mail: radkevich@sosny.bas-net.by.

Toropova Valentina Vladimirovna, Senior Researcher, State Scientific Institution "Joint Institute for Power and Nuclear Research — Sosny" of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. Box 119, Minsk, 220109, Republic of Belarus), e-mail: vtoropova@sosny.bas-net.by.

Zarubo Alexander Mikhailovich, Senior Researcher, State Scientific Institution "Joint Institute for Power and Nuclear Research — Sosny" of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. Box 119, Minsk, 220109, Republic of Belarus), e-mail: aliaksandr.zaruba@sosny.bas-net.by.

Korenkova Olga Borisovna, Researcher, State Scientific Institution "Joint Institute for Power and Nuclear Research — Sosny" of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. Box 119, Minsk, 220109, Republic of Belarus), e-mail: korenkova_olya@mail.ru.

Bibliographic description

Radkevich A. V., Toropova V. V., Zarubo A. M., Korenkova O. B. Justification of a Treatment Method for Liquid Radioactive Waste of Complex Composition from the Decommissioning of a Spent Nuclear Fuel Storage Facility. *Radioactive Waste,* 2026, no. 1 (34), pp. 71—78. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-71-78. (In Russian).