DOI: 10.25283/2587-9707-2026-2-43-54 УДК 621.039.73

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ЙОДСОДЕРЖАЩИМИ СОРБЕНТАМИ НА ФГУП «ПО «МАЯК»

С. М. Шайдуллин[1], Е. В. Муленкова[2], Р. В. Пашковский[1], А. А. Аракелян[2], С. В. Степанов[1], К. А. Болдырев[2], В. А. Ремизова[1], Д. А. Соболев[2], П. В. Козлов[1], Ф. В. Григорьев[2], С. А. Лукин[1], П. А. Блохин[2], А. С. Лаптев[3]

[1] ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

[2] Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

[3] Госкорпорация «Росатом», Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2026 г.

Отработанные сорбенты, применяемые в системе газоочистки головных операций переработки отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов на заводе РТ-1, содержащие долгоживущий ^{129}I, относят к радиоактивным отходам класса 2, способы их кондиционирования в настоящее время разрабатываются. В статье приводятся результаты выбора и опробования в лабораторных условиях методов переработки отработанных сорбентов системы газоочистки, предназначенных для улавливания йода. Выполнена оценка возможности безопасного захоронения йодсодержащих радиоактивных отходов в пункте глубинного захоронения, разработаны варианты технический решений по обеспечению безопасности: предложены материалы системы инженерных барьеров безопасности и способы размещения радиоактивных отходов в горных выработках. Результаты сравнительной оценки вариантов обращения с йодсодержащими радиоактивным отходами по стоимости и долговременной безопасности их изоляции позволили рекомендовать наилучшие и подтвердили принципиальную возможность их размещения в пункте глубинного захоронения.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, захоронение йодсодержащих радиоактивных отходов, долговременная безопасность, иммобилизация, пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов, инженерные барьеры безопасности.*

Интенсивное развитие ядерной энергетики выдвигает на передний план проблему завершающей стадии замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) — регенерацию отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) энергетических установок — и решение сопутствующих ей вопросов обращения с радиоактивными отходами (РАО). Одной из основных задач, стоящих перед разработчиками, является создание высокоэффективной системы газоочистки, поскольку существует возможность загрязнения окружающей среды за счет газовых выбросов как при штатной работе предприятий, так и при аварийных ситуациях.

Среди радиоактивных газообразных нуклидов, выделяющихся при регенерации ОЯТ, особое место занимает изотоп йода ^{129}I, который в значительной степени определяет опасность РАО в долгосрочной перспективе. Это обуславливается совокупностью его свойств: длительным периодом полураспада ($1{,}57 \cdot 10^7$ лет), высокой миграционной способностью в большинстве материалов и сред, летучестью и возможностью физиологического накопления в щитовидной железе [1]—[4].

В некоторых странах в качестве окончательного решения, позволяющего обеспечить долговременную безопасность йодсодержащих РАО,

рассматривается их изоляция в пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО), совместно с другими ультрадолгоживущими отходами.

На заводе РТ-1 очистка газового потока от йода осуществляется с высокой эффективностью путем его улавливания на гранулированном сорбенте — оксиде алюминия, импрегнированном азотнокислым серебром. Однако этот сорбент по причине низкой механической прочности не соответствует общим критериям приемлемости РАО для захоронения, установленным требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, и не может быть использован в качестве матрицы для иммобилизации йодсодержащих РАО [5]—[7].

С целью решения проблем кондиционирования накопленных на заводе РТ-1 йодсодержащих РАО, по заказу Госкорпорации «Росатом» в 2024—2025 гг. была выполнена научно-исследовательская работа по разработке способов переработки и кондиционирования отработанных йодсодержащих сорбентов, включая обоснование вариантов их безопасного захоронения в пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО).

Как уже отмечалось, основная проблема обеспечения долговременной безопасности йодсодержащих РАО в первую очередь обусловлена свойствами ^{129}I. Скорость его поступления в биосферу из системы захоронения будет зависеть от интенсивности выхода через инженерные барьеры безопасности (ИББ) и геолого-гидрогеологических характеристик вмещающей среды [8].

Обеспечить удержание йода внутри системы захоронения в масштабах времени, сопоставимых с периодом полураспада ^{129}I, практически невозможно, поэтому основная задача разрабатываемых в настоящее время подходов к обеспечению долговременной безопасности содержащих его РАО заключается:

- в создании и совершенствовании технологий кондиционирования (иммобилизации), обеспечивающих фиксацию йода в матричном материале;
- поиске или разработке материалов для ИББ, которые бы позволили еще больше замедлить массоперенос йода в биосферу, снизив потенциальное пиковое дозовое воздействие на население.

Решение проблемы кондиционирования йодсодержащих РАО сопряжено с получением исчерпывающей информации о характеристиках накопленных отходов (физические свойства, химический и радионуклидный составы), подлежащих переработке и захоронению.

Радионуклидный состав йодсодержащих отходов обусловлен характеристиками перерабатываемого на заводе РТ-1 ОЯТ (ВВЭР-440, БН-350, БН-600 и др.).

С пуском в промышленную эксплуатацию в 1988 г. третьей цепочки завода РТ-1 для улавливания ^{129}I был применен сорбент на основе оксида алюминия марки А, импрегнированный солью азотнокислого серебра. При его выборе исходили из того, что он обладает высокой (более 99,9 %) эффективностью. Прочная связь серебра с йодом дает возможность осуществления надежного удержания этого радионуклида, а разработанный способ регенерации отработанного сорбента позволяет многократно использовать его в технологическом процессе [9]. Эксплуатация адсорбционных колонн с данным сорбентом при переработке ОЯТ энергетических реакторов ВВЭР позволила значительно снизить содержание ^{129}I в газоаэрозольных выбросах завода РТ-1 и обеспечить соблюдение контрольных уровней [10].

Объем отработанного сорбента на данном предприятии в настоящий момент составляет приблизительно 21 м^3, масса — 12,6 т.

По 35 его пробам проведены измерения физических параметров: насыпной плотности, дисперсности и влажности, а также удельной активности (УА) радионуклидов.

Величины насыпной плотности сорбента зависят от его фракционного состава: от 610 г/дм^3 для слоев с преобладанием целых гранул размерами более 5 мм до 682 г/дм^3 — при большей доле фракции менее 1 мм.

Влажность сорбента составляет от 5 % до 6 %, что объясняется его работой при высоких (до 190 °С) температурах, герметичностью законсервированных колонн и емкостей, а также отсутствием источников влаги в местах хранения (каньоны системы газоочистки).

Для проведения радиоизотопного анализа пробы сорбента растворялись в смеси серной и азотной кислот.

Определение ^{137}Cs и ^{241}Am выполнялось методом гамма-спектрометрии.

Содержание изотопов урана ($^{234\text{-}236,238}$U) и плутония ($^{239\text{-}242}$Pu) — радиологически значимых радионуклидов (РЗРН) – измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием консервативного подхода, принимая за содержание сумму нуклидов.

Так, в среднем в сорбенте обнаружено: $3{,}1\cdot10^5$ Бк/г — ^{129}I; $1{,}5\cdot10^2$ Бк/г — ^{137}Cs; $2{,}9\cdot10^2$ Бк/г — ^{90}Sr; $2{,}5\cdot10^2$ — ^{99}Tc. Содержание РЗРН в отработанных сорбентах, за исключением ^{129}I, крайне мало и варьирует от 0,1 до 5 Бк/г.

Доля алюминия составляет в среднем 40 мас.% (Al_2O_3 — 76%), Ag — 8 мас.%, связанных с ним NO_3^- — 6 мас.%; изотопов йода суммарно — 10 мас.%; F^- и Cl^- — менее 0,1 мас.%; SO_4^{2-} — до 0,5 мас.%.

Таким образом, по сути эти РАО можно считать мононуклидными так как удельная активность ^{129}I в них на несколько порядков выше, чем других ультрадолгоживущих радионуклидов.

Следует заметить, что из-за особенностей свойств йода, выбор технологии и матричного материала для иммобилизации йодсодержащих отходов представляет собой весьма сложную задачу.

В качестве таковых могут быть рассмотрены как стекло и цемент — наиболее изученные, так и стеклокерамическая матрица (СКМ), йодидный содалит, йодапатиты, цеолиты, металлические матрицы. Также в качестве способа кондиционирования можно рассматривать консолидацию малорастворимых соединений йода (самостоятельно либо в сочетании с дополнительным материалом) методом прессования. В качестве примера в данном случае можно рассматривать прессование соединений йодидов серебра и меди, с добавлением металлической меди.

Каждый из указанных матричных материалов характеризуется своими преимуществами и недостатками.

Цементирование — дешевая, отработанная и легко масштабируемая технология, совместимая с низкотемпературной фиксацией и преобразованными формами, широко применяется для иммобилизации РАО. Матрица на основе цемента обладает сравнительно высокими скоростями выщелачивания (обычно выше, чем у стекол/керамик для йода) и требует модификаций для их снижения [11], [12].

Боросиликатное стекло является промышленным стандартом матричного материала для кондиционирования РАО, но для йода критична стадия плавки из за летучести при повышенной температуре (около 1 000—1 200 °С). Серебряно-фосфатные стекла перспективны для низкотемпературной фиксации AgI, но требуют улучшения долговечности матрицы; модификации Nb_2O_5/MoO_3 улучшают пассивацию при выщелачивании [13], [14].

Стеклокерамика (СКМ) и цепочка «цеолиты — содалит — связывание в стекло» могут рассматриваться как перспективные материалы по удержанию йода, пусть и при более сложной и затратной технологии реализации. Йодидный содалит при связывании в стекло обладает высокой прочностью фиксации, ключ к успеху — контролируемый синтез/консолидация и правильно подобранный материал. Йодапатиты в исследованиях демонстрируют низкую скорость выщелачивания. Достоинствами металлической матрицы на основе свинца или эвтектических сплавов Pb-Bi являются: возможность утилизации отработанного теплоносителя, содержащего такие сплавы, малая температура их плавления, которая ниже температуры термической деградации AgI и CuI, а также длительный срок сохранения свойств такого материала, обусловленный разрушением только вследствие коррозии самого металла [15]—[19].

Учитывая техническую и научную проработку изложенных выше вариантов, наиболее перспективными методами кондиционирования йодсодержащих отходов на данный момент следует признать их цементирование, прессование и, возможно, отверждение в свинцовую матрицу.

Специалистами ФГУП «ПО «Маяк» и ИБРАЭ РАН разработана комплексная схема вариантов кондиционирования йодсодержащих отходов (рис. 1), включающая в себя следующие основные способы переработки сорбента: регенерация; измельчение; прессование, а также

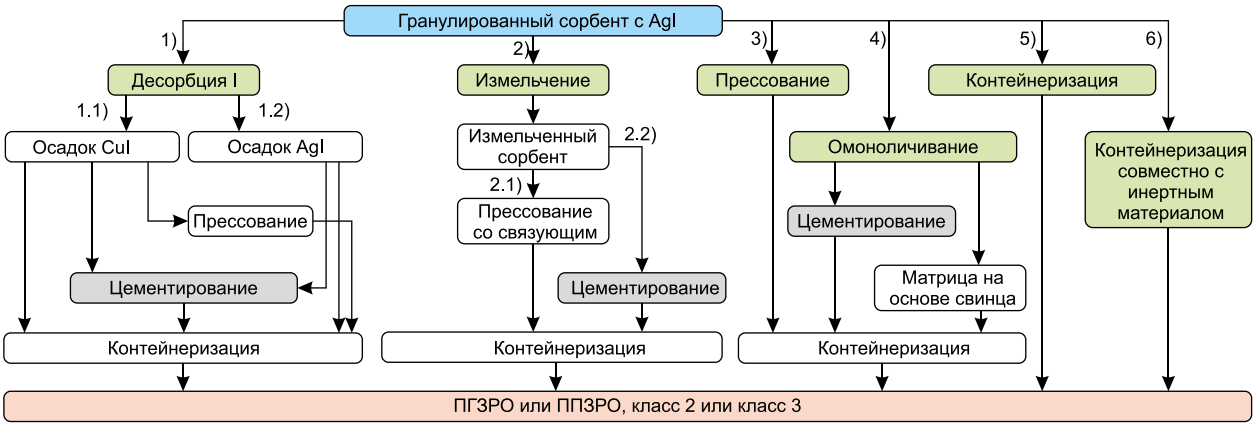

Рис. 1. Комплексная схема вариантов кондиционирования йодсодержащих отходов

дальнейшие этапы приведения отходов к критериям приемлемости: омоноличивание (заключение в матрицу на основе цемента или свинца); контейнеризацию, в том числе совместно с буферным материалом (например, бентонитом).

По предложенным вариантам изготовлены образцы, подвергнутые испытаниям для определения прочностной и химической устойчивости в лабораторных условиях.

По результатам проведенных исследовательских работ от вариантов цементирования сорбента (без предварительного измельчения), прессования совместно с Na_2SiO_3, контейнеризации совместно с буферным материалом было принято решение в дальнейшем отказаться в связи с низкими значениями полученных показателей.

Варианты обращения с сорбентом, предусматривающие его непосредственное прессование, были исключены из рассмотрения из-за того, что полученные по этой технологии образцы не соответствовали критериям прочности и водостойкости. Также не рассматривались способы, которые не предусматривают омоноличивание РАО.

Для сопоставления влияния вариантов кондиционирования на долговременную безопасность захоронения и стоимость их реализации, выбраны два метода переработки йодсодержащего сорбента:

1) регенерация, в результате которой образуется 1 м^3 РАО с удельной активностью $2 \cdot 10^6$ Бк/г;

2) измельчение, в результате которого образуется 25 м^3 РАО с удельной активностью $1{,}5 \cdot 10^4$ Бк/г.

Чтобы показать целесообразность поиска решений по переработке йодсодержащего сорбента, дополнительно оценена стоимость реализации способа размещения его без предварительной переработки в контейнерах типа НЗК после омоноличивания путем центрирования, но обоснование оценки долговременной безопасности (ОДБ) для этого варианта не выполнялось.

Сравнительный анализ вариантов включения йода в матричный материал показал, что наиболее перспективными являются цемент и свинец.

Цементирование — наиболее отработанная технология, легко масштабируется, имеет низкую стоимость. Однако недостатками такой матрицы является сравнительно непродолжительный срок службы и то, что в щелочной среде алюминий (содержащийся в сорбенте) в этом процессе образовывает алюминаты и выделяется водород.

Положительными свойствами свинцовой матрицы являются ее радиационная и термическая стойкость, высокая степень включения йода, а также низкая скорость коррозии (всего около 1 мкм/год). Ее недостатки связаны с токсичностью (для работы с данным материалом требуются дополнительные средства защиты, иные, чем при работе с ^{129}I) и ее недостаточной исследованностью как матричного материала.

Для первичной упаковки РАО предлагается использовать металлические 200-литровые бочки из нержавеющей стали (рис. 2) [19].

Рис. 2. Металлические 200-литровые бочки из нержавеющей стали

При выборе контейнера необходимо учитывать, что в условиях ПГЗРО, за счет совокупности нагрузок от горного давления, напора подземных вод и набухания бентонитового буфера, давление на контейнер составит более 5 МПа. С учетом схожести технических требований для данных условий может рассматриваться металлический невозвратный чехол для захоронения РАО класса 1 (НЧ) или железобетонный контейнер типа НЗК (КЗХ-2кс) с вкладышем или без него, но стоит отметить, что принятие решения по этому вопросу потребует дополнительного обоснования.

Оцениваемые по показателю безопасности при захоронении йодсодержащих РАО для условий размещения в ПГЗРО варианты технических решений включают многообразие комбинаций ИББ из указанных ранее материалов (матриц, контейнеров) (табл. 1): контейнеры типа НЗК и НЧ; матричный материал на основе цемента и свинца; материал — заполнитель пространства между бочками в контейнерах, инертный по отношению к миграции йода (стеклошарики или песок) и селективный сорбент, обладающий фиксирующими свойствами по отношению к йоду (например, киноварь).

Таблица 1. Перечень комбинаций инженерных барьеров безопасности, принятый для оценки долговременной безопасности

Номер варианта	Матрица	Заполнитель контейнера	Тип контейнера
1	Цементная	Киноварь	НЗК
2	Цементная	Стеклошарики	
3	Свинцовая	Стеклошарики	
4	Цементная	Киноварь	НЧ
5	Свинцовая	Киноварь	
6	Свинцовая	Стеклошарики	
7	Свинцовая	Свинец	

При переработке сорбента способом регенерации из всего объема, накопленного к настоящему времени на ФГУП «ПО «Маяк», ожидается образование приблизительно 1 м^3 йодосодержащих РАО. Предлагаемые варианты технических решений в результате их кондиционирования предполагают, что образуется по 2 контейнера типа НЗК или НЧ, размещение которых в пределах ПГЗРО не представляет значительных сложностей.

Для кондиционирования РАО, полученных при переработке сорбента способом измельчения, потребуется уже 32 контейнера типа НЗК или 42 контейнера типа НЧ.

Для сравнительного анализа вариантов технических решений с позиций долговременной безопасности прогнозные расчеты массопереноса йода из системы захоронения выполнены с учетом основных предположений базового сценария ее эволюции, характеризующегося естественным протеканием процессов в системе захоронения и геологической среде и потенциальным дозовым воздействием на население за счет ведения фермерского хозяйства.

Результаты расчетов распространения йода в системе ИББ показали доминирующее влияние величины растворимости AgI на общую картину миграции. Оно было настолько значительным, что затрудняло оценку вклада и определение значимости других характеристик ИББ системы захоронения.

Однако значение предела растворимости AgI, используемое в расчетах, само по себе является параметром, известным с некоторой степенью неопределенности, поскольку основывается на литературных данных и результатах химического моделирования. В связи с этим для их верификации сотрудниками ФГУП «ПО «Маяк» выполнены лабораторные исследования скоростей и степеней выщелачивания йода за 28 суток из образцов, полученных при различных рассматриваемых в настоящей работе вариантах переработки йодсодержащих сорбентов. Согласно полученным результатам, данные показатели для цементных образцов с AgI и CuI варьируются от $4{,}7\cdot10^{-7}$ до $5{,}2\cdot10^{-4}$ г/(см^2·сут) и от $1{,}6\cdot10^{-3}$ % до 45,2 % соответственно (в зависимости от степени наполнения сорбентом цементной матрицы). Значения скорости и степени выщелачивания ^{129}I из проб на основе измельченного сорбента и связующего (Na_2SiO_3) составляют $9{,}83\cdot10^{-4}$ г/(см^2·сут) и 2,32 % соответственно, а из цементных образцов с измельченным сорбентом — от $6{,}9\cdot10^{-4}$ до $1{,}6\cdot10^{-3}$ г/(см^2·сут) и от 29,3 % до 34,0 % соответственно (в зависимости от степени наполнения сорбентом), но при включении гранулированного сорбента в цементную матрицу они равны $9{,}9\cdot10^{-6}$ г/(см^2·сут) и 0,72 %.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что оптимальным вариантом для захоронения в ПГЗРО по совокупности факторов (степень включения йода и химическая устойчивость компаунда) является компактная прессованная соль AgI с включением ^{129}I на уровне 50 %, скоростью выщелачивания $1{,}5\cdot10^{-7}$ г/(см^2·сут) и его степенью $1{,}6\cdot10^{-3}$ %.

Сравнение прогнозов миграции йода при различных скоростях выщелачивания показали, что за счет глубокой переработки сорбента можно достигнуть эффективности удержания, близкой к селективным сорбентам (рис. 3).

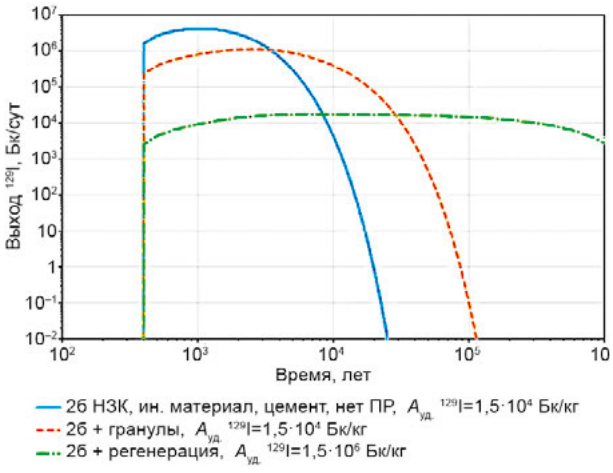

Рис. 3. Выход ^{129}I при различных вариантах переработки сорбента

Серия расчетов позволила количественно оценить роль барьеров безопасности в сдерживании распространения йода.

Применение свинцовой матрицы и киновари в качестве селективного сорбента демонстрирует высокую эффективность в предотвращении

выхода ^{129}I за пределы системы захоронения РАО, позволяя растянуть процесс его миграции в пределах ближней зоны на сотни тысяч лет и существенно снизить пиковую интенсивность выхода в область жизнедеятельности человека.

В противоположность этому, использование менее эффективных сорбентов, таких как бентонит, модифицированный серебром, показало свою ограниченную целесообразность. Проведенный анализ свидетельствует о том, что в предложенной конфигурации подобный селективный сорбент не может служить полноценной заменой киновари в качестве основного барьера. При этом в системе, уже включающей киноварь, дополнительное применение модифицированного бентонита не вносит существенного вклада в улучшение барьерных свойств (рис. 4).

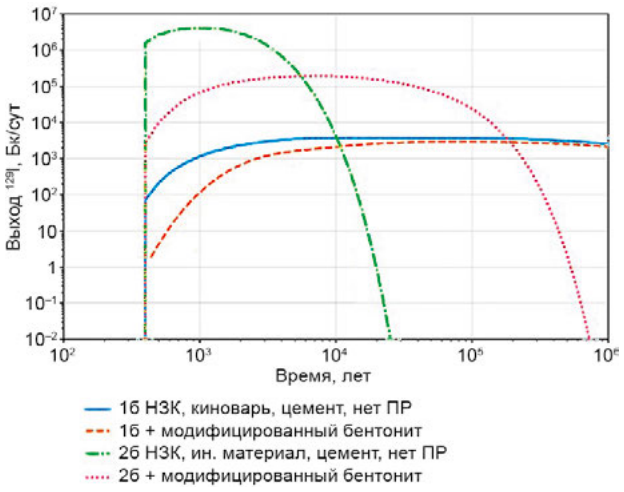

Рис. 4. Выход ^{129}I за пределы ближней зоны системы захоронения РАО при различных селективных сорбентах

По результатам прогнозных расчетов распространения ^{129}I в геологической среде получены характеристики потенциального загрязнения в зоне водопользования при различных сценариях эволюции системы захоронения РАО. При учете в расчетах низкого предела растворимости соединения AgI потенциальное дозовое воздействие йода на население в точке водопользования не превысит 1 мкЗв/год при любом варианте технических решений по ИББ. Для высоких пределов растворимости соединения AgI получено, что вариант цементирования йодсодержащих РАО и их последующего размещения в контейнерах типа НЗК с инертным (несорбирующим) заполнителем при прочих равных условиях, не обеспечивает долговременную безопасность РАО (рис. 5).

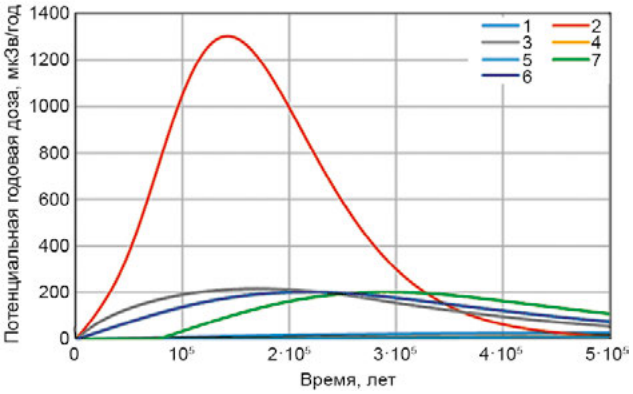

Рис. 5. Оценки потенциального дозового воздействия ^{129}I на население в точке водопользования для различных вариантов комбинаций ИББ (по табл. 3)

Прогнозные расчеты распространения йода до точки водопользования и оценки потенциальных дозовых воздействий на население за счет ведения фермерского хозяйства позволили дифференцировать варианты технических решений кондиционирования йодсодержащих РАО по степени долговременной безопасности.

С учетом возможного влияния внешних и внутренних факторов природного и техногенного происхождения сформулирован набор альтернативных сценариев эволюции системы захоронения РАО:

- АС1. Разрушение контейнеров в результате землетрясения или механического воздействия вышележащих горных пород.
- АС2. Формирование новых трещин и разломов в результате активизации тектонических движений или сейсмической активности.
- АС3. Изменения гидрогеологического режима.
- АС4. Деградация ИББ со снижением изолирующих свойств.
- АС5. Образование химических соединений, обладающих большим пределом растворимости или отказ матричного материала.
- АС6. Снижение способности бентонитов к набуханию (увеличение проницаемости буферного ИББ).
- АС7. Локальное непреднамеренное вторжение в систему захоронения.

Прогнозные расчеты по альтернативным сценариям эволюции системы захоронения РАО выполнены для варианта технических решений, при котором продемонстрирована наибольшая безопасность в сценарии нормальной эволюции: переработанные сорбенты включаются в свинцовую матрицу, размещаются в бидонах из стали и далее в контейнере типа НЧ, в качестве буферного материала используется киноварь, материал — заполнитель пространства внутри

горной выработки. Серия расчетов для альтернативных сценариев эволюции системы захоронения продемонстрировала высокую устойчивость выбранных ИББ к рассмотренным внешним и внутренним воздействиям природного и техногенного характера (рис. 6).

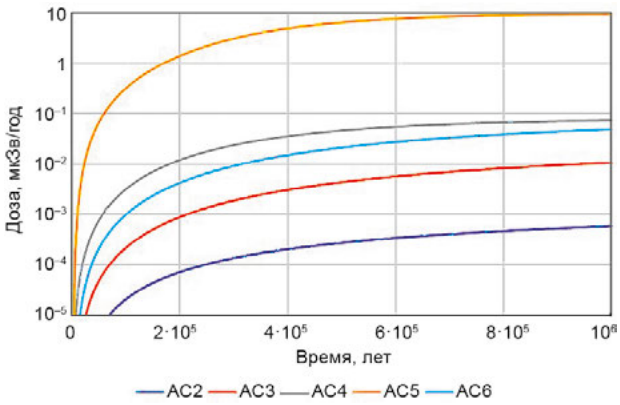

Рис. 6. Потенциальные дозовые воздействия при альтернативных сценариях для набора ИББ, включающего НЧ, киноварь, свинец, при низком пределе растворимости AgI

Сравнительный анализ стоимости вариантов обращения с йодсодержащими РАО показал, что, несмотря на значительные затраты на переработку сорбента способом регенерации (при десорбции ^{129}I), суммарная стоимость обращения с такими РАО будет наиболее низкой, независимо от выбора материалов ИББ. Это связано с меньшим объемом захораниваемых РАО, образующихся при регенерации сорбента, в том числе сорбентом, который образуется после десорбции ^{129}I (его можно размещать в железобетонном контейнере типа НЗК (КЗХ-2кс) с вкладышем или без него). Остаточная удельная активность его после десорбции ^{129}I составляет $1{,}2 \cdot 10^4$ Бк/г.

В стоимостных оценках свинцовая матрица не рассматривается ввиду отсутствия информации по ее применимости в качестве матричного материала и оценок по долговременной сохранности. Кроме того, на данный момент отсутствует техническая проработка применения подобной матрицы для омоноличивания РАО.

Стоимостные оценки различных вариантов переработки йодсодержащих РАО представлены на рис. 7.

При определении возможности размещения йодсодержащих РАО в ПГЗРО необходимо учитывать сочетанное воздействие от размещаемых в нем РАО классов 1 и 2 (в том числе накопленных на ФГУП «ПО «Маяк» остеклованных ВАО, отходов АО «Концерн Росэнергоатом» от вывода энергоблоков из эксплуатации и т.д.), а также прогнозируемые объемы образования йодсодержащих РАО на заводе большой производительности.

В зависимости от варианта технических решений такие отходы могут создавать от 2% до 99% потенциальной дозовой нагрузки на критическую группу населения. Потенциальная дозовая нагрузка при негативном (вариант 3 табл .1) и оптимистическом (вариант 5 табл. 1) представлена на рис .8.

При оценке долговременной безопасности захоронения йодсодержащих РАО в ПГЗРО необходимо учитывать воздействие от совместно

Рис. 7. Стоимостные оценки (млн рублей) различных вариантов переработки всего объема йодсодержащих РАО

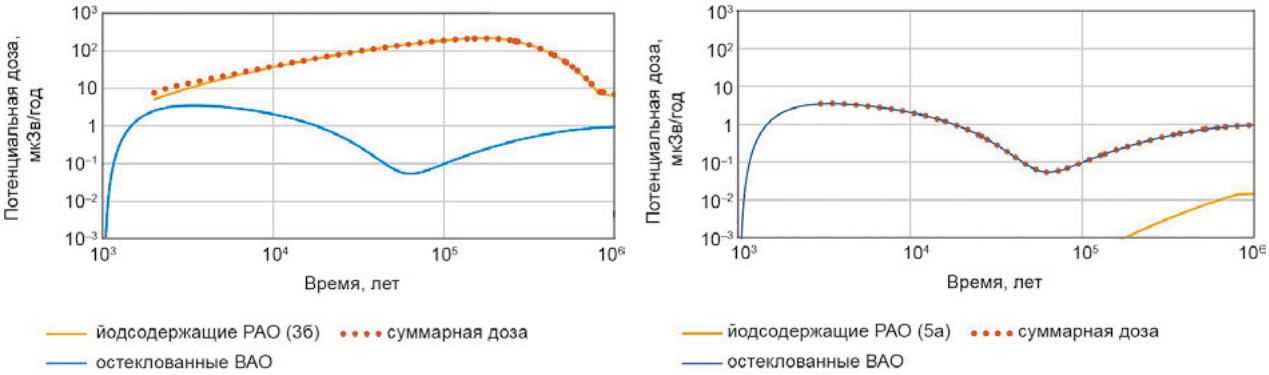

Рис. 8. Потенциальная дозовая нагрузка при негативном и оптимистичном варианте: а) негативный вариант, б) оптимистичный вариант

размещаемых в нем других отходов. Для минимизации суммарного потенциального дозового влияния на население захораниваемых в ПГЗРО РАО возможно сохранение безопасности за счет технических решений, которые позволят обеспечить достижение пиковых значений потенциальных доз облучения от йода и других долгоживущих радионуклидов, содержащихся в РАО классов 1 и 2, в различные периоды времени.

Предварительные оценки радиологической емкости ПГЗРО показывают, что в зависимости от выбора варианта разработанных технических решений в нем допустимо разместить йодсодержащие РАО с суммарной активностью от $5 \cdot 10^{12}$ до $5 \cdot 10^{16}$ Бк в соответствии со свойствами кондиционированных отходов и эффективности ИББ.

Заключение

В результате работы подтверждена принципиальная возможность безопасного захоронения йодсодержащих РАО в ПГЗРО. Сформированы варианты переработки йодсодержащих сорбентов, накопленных на ФГУП «ПО «Маяк».

Из рассмотренных вариантов переработки йодсодержащих сорбентов перспективными и технически реализуемыми видятся варианты, основанные на количественной десорбции йода с сорбента с последующим получением малорастворимого AgI либо в спрессованном, либо в цементированном виде.

Среди разработанных технических решений по обеспечению безопасности захоронения йодсодержащих РАО наиболее эффективным прогнозируется вариант включения их в форме малорастворимого AgI в свинцовую матрицу и использование киновари в качестве сорбирующего материала – заполнителя контейнера.

Методы обращения с сорбентами, в результате которых образуется меньшее количество РАО, являются более экономически выгодными.

Технико-экономическая оптимизация сформированных подходов должна идти по пути:

- подтверждения величины предела растворимости йодистого серебра в подземной воде ПГЗРО с учетом вариаций прогнозируемых условий системы захоронения РАО;
- установления требований к материалам ИББ в ПГЗРО, подтверждения свойств и совместимости конструкционных, буферных и матричных материалов (бетон, бентонит, киноварь, свинец);
- подтверждения сорбционных параметров селективных сорбентов и обоснования их сроков службы в условиях ПГЗРО.

Материал подготовлен в рамках исполнения договора с Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» от 12 .02 .202 № 1/29241-Д по теме «Разработка способа обращения с отработанными йодсодержащими сорбентами и обоснование безопасности их размещения в пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов».

Литература

1 . *Орлова Э. К.* Очистка отходящих газов при переработке облученного топлива. Вып. 1. Улавливание йода. Обзорная информация. — М. : ЦНИИ «Атоминформ», 1979. 92 с.

2 . Гигиеническая и радиоэкологическая оценка выбросов и обоснование ПДВ йода-129 при переработке облученного ядерного топлива : отчет / исп. Д. И. Гусев. Инв. № И-396. — Л., 1981. 56 с.

3 . Radioiodine Removal in Nuclear Facilities. IAEA — Techn. Reports Series № 201. — Vienna, IAEA, 1980. 98 p.

4 . Treatment of Volatile Fission Products. Nuclear Science NEA/NSC/R(2022)4. 2022.

5 .*Asmussen R. M., Turner J., Chong S., Riley B. J.* Review of recent developments in iodine wasteform production // Front. Chem. 2022. Vol. 10. P. 1043653. DOI: 10 .3389/chem .2022 .104365 — URL: https:// pmc .ncbi .nlm .nih v/articles/PMC9816813/ (дата обращения: 20 .01 .2026

6 .*Riley B. J. et al.* Materials and processes for the effective capture and immobilization of radioiodine: A review // Journal of Nuclear Materials. 2016. Vol. 470. Pp. 307—326. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.11.038.

7 . НП-019-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. — М. : Ростехнадзор, 2015. 22 с.

8 .*Tanabe H. et al.* Development of new waste forms to immobilize iodine-129 released from a spent fuel reprocessing plant // Advances in science and technology. 2011. Vol. 73. Pp. 158—170.

9 .*Мокров Ю. Г.* Реконструкция параметров источников выброса йода-129 в атмосферу на ФГУП «ПО «Маяк» (1975—2000 годы) // Вопросы радиационной безопасности. 2025. № 3 (119). С. 49—64.

10 . Оборудование для обращения с РАО базовой технологической линии опытно-демонстрационного центра ФГУП «ГХК». — URL: https:// sosny.ru/oborudovanie-dlya-obrashheniya-s-rao/ oborudovanie-dlya-obrashheniya-s-tro-bazovoj-texnologicheskoj-linii-odcz-fgup-vinchagxkvincha. html (дата обращения: 16 .01 .2026

11 .*Калинин Н. Н., Елизарова А. Н., Щебетковский В. Н., Кузнецов Ю. Л., Исупов В. К.* Исследование выщелачивания йода из цементных и битумных компаундов на основе различных соединений йода // Радиохимия. 1983. № 4. С. 537—542.

12 .*Варлаков А. П., Баринов А. С.* Кондиционирование твердых радиоактивных отходов с использованием цементных матриц // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 71—79. DOI: 10 .25283/258 -9707-2020-4-71-79.

13 .*Cicconi M. R. et al.* Iodine solubility and speciation in glasses // Scientific Reports. 2019. Vol. 9 . No . . .7758 . OI: 10.1038/s41598-019-44274-4.

14 .*Garino T. J. et al.* Low-temperature sintering Bi–Si–Zn–oxide glasses for use in either glass composite materials or core/shell ^{129}I waste forms // Journal of the American Ceramic Society. 2011. Vol. 94. No. 8. Pp .2412—2419. DOI: 10 .1111/j .1551-2916 .2011 .0454

15 .*Maddrell E., Gandy A., Stennett M.* The durability of iodide sodalite // Journal of Nuclear Materials. 2014. Vol. 449. No. 1—3. Pp. 168—172. DOI: 10 .1016/j jnucmat .2014 .03 .0

16 .*Trill H., Eckert H., Srdanov V. I.* Mixed halide sodalite solid solution systems. Hydrothermal synthesis and structural characterization by solid state NMR // The Journal of Physical Chemistry B. 2003. Vol. 107. No. 34. Pp. 8779—8788.

17 .*Jubin R. T., Bruffey S. H., Patton K. K.* Expanded analysis of hot isostatic pressed iodine-loaded silver-exchanged mordenite. No. ORNL/LTR-2014/476 . — Oak Ridge, TN (United States), Oak Ridge National Lab., 2014.

18 .*Jubin R. T., Bruffey S. H.* High-temperature pressing of silver-exchanged mordenite into a potential iodine waste form. In Proc. WM2014 Conference, Phoenix, Arizona, USA, 2—6 March 2014. Pp. 2—6.

19 .*Hyatt N. C. et al.* Zeolite-salt occlusion: A potential route for the immobilisation of iodine-129? // MRS Online Proceedings Library. 2003. Vol. 807. Pp .212—217. DOI: 10.1557/ PROC-807-359.

Информация об авторах

Шайдуллин Сергей Минуллович, кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д .31), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Муленкова Екатерина Викторовна, главный специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: mulenkova@ibrae. ac .ru

Пашковский Роман Владимирович, инженер-технолог Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: romantike90@gmail.com.

Аракелян Арам Айкович, кандидат технических наук, заведующий отделом, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: arakelyan@ibrae .ac .r

Степанов Сергей Викторович, инженер-технолог Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Болдырев Кирилл Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kaboldyrev@ibrae .ac .r

Ремизова Валерия Александровна, инженер-технолог Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Соболев Денис Андреевич, техник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sobolev@ibrae .ac .r

Козлов Павел Васильевич, кандидат технических наук, доцент, начальник исследовательской лаборатории Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: kozlov_pavel@inbox .ru

Григорьев Федор Владимирович, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: grig-fedor@ibrae .ac .r

Лукин Сергей Александрович, заместитель начальника Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Блохин Павел Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: blokhin@ibrae .ac .r

Лаптев Александр Сергеевич, эксперт проектного офиса, Госкорпорация «Росатом» (119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24), e-mail: AlekSLaptev@rosatom .ru

Библиографическое описание статьи

Шайдуллин С. М., Муленкова Е. В., Пашковский Р. В., Аракелян А. А., Степанов С. В., Болдырев К. А., Ремизова В. А., Соболев Д. А., Козлов П. В., Григорьев Ф. В., Лукин С. А., Блохин П. А., Лаптев А. С. Формирование системы обращения с йодсодержащими сорбентами на ФГУП «ПО «Маяк» // Радиоактивные отходы. 2026. № 2 (35). С. 43—54. DOI: 10 .25283/258 -9707-2026-2-43-54.

DEVELOPMENT OF A MANAGEMENT SYSTEM FOR IODINE-CONTAINING SORBENTS AT FSUE PA MAYAK

Shaidullin S. M.[1], Mulenkova E. V.[2], Pashkovsky R. V.[1], Arakelyan A. A.[2], Stepanov S. V.[1], Boldyrev K. A.[2], Remizova V. A.[1], Sobolev D. A.[2], Kozlov P. V.[1], Grigoriev F. V.[2], Lukin S. A.[1], Blokhin P. A.[2], Laptev A. S.[3]

[1] FSUE PO Mayak, Ozersk, Chelyabinsk Region, Russia

[2] Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[3] Rosatom State Corporation, Moscow, Russia

Article received on April 27, 2026

Spent sorbents applied in the off-gas treatment systems during the reprocessing of spent nuclear fuel from power reactors, namely, during the head-end stages of fuel reprocessing at the RT-1 plant, contain long-lived ^{129}I and are referred to RW Class 2. Their conditioning methods are currently being developed.

This article presents the methods selected to process spent sorbents from an off-gas treatment system capturing iodine and elaborates on their laboratory testing.

The feasibility of safe iodine-containing radioactive waste disposal in a deep repository has been assessed with relevant engineering designs developed to provide its safety: construction materials for the engineered safety barrier system and methods providing radioactive waste emplacement in the underground excavations of the disposal system were proposed.

A few options proposed to manage iodine-containing radioactive waste were compared between themselves based on the associated costs and their long-term disposal safety. This assessment confirmed the fundamental feasibility of disposing of such radioactive waste safely in a deep disposal facility with recommendations provided on the iodine-containing radioactive waste management options.

Keywords: *radioactive waste, disposal of iodine-containing radioactive waste, long-term safety, immobilization, deep disposal facility for radioactive waste, engineered safety barriers.*

This material was prepared under contract No .1/29241-D signed with the State Atomic Energy Corporation Rosatom on February 12, 2024 covering the topic Development of a Management Method for Spent Iodine-Containing Sorbents and the Safety Assessment of their Disposal in a Deep Disposal Facility for Radioactive Waste.

References

1 . Orlova E. K. *Ochistka otkhodyashchikh gazov pri pererabotke obluchennogo topliva. Vyp. 1. Ulavlivaniye yoda* [Off-gas Treatment During Spent Nuclear Fuel Reprocessing. Part 1. Iodine Recovery]. Overview Information. Moscow, TSNII "Atominform" Publ., 1979. 92 p.

2 . *Gigiyenicheskaya i radioekologicheskaya otsenka vybrosov i obosnovaniye PDV yoda-129 pri pererabotke obluchennogo yadernogo topliva* [Hygienic and Radioecological Assessment of Emissions and Substantiation of Iodine-129 MPEs during Spent Nuclear Fuel Reprocessing]: Report / Comp. D. I. Gusev. Inv. No .I-396. Leningrad, 1981. 56 p.

3 . Radioiodine Removal in Nuclear Facilities. IAEA — Techn. Reports Series № 201. Vienna, IAEA Publ., 1980. 98 p.

4 . Treatment of Volatile Fission Products. Nuclear Science NEA/NSC/R(2022)4. 2022.

5 . Asmussen R. M., Turner J., Chong S., Riley B. J. Review of recent developments in iodine wasteform production. Front. Chem., 2022, vol. 10, p. 1043653. DOI: 10 .3389/chem .2022 .104365 — URL: https://pmc .ncbi .nlm .nih v/articles/PMC9816813/ (accessed on: 20 .01 .2026

6 . Riley B. J. et al. Materials and processes for the effective capture and immobilization of radioiodine: A review. *Journal of Nuclear Materials,* 2016, vol. 470, pp. 307—326. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.11.038.

7 . NP-019-15. *Sbor, pererabotka, khraneniye i konditsionirovaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Collection, processing, storage and conditioning of liquid radioactive waste. Safety requirements]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2015. 22 p.

8 . Tanabe H. et al. Development of new waste forms to immobilize iodine-129 released from a spent fuel reprocessing plant. *Advances in science and technology,* 2011, vol. 73, pp. 158—170.

9 . Mokrov Yu. G. Rekonstruktsiya parametrov istochnikov vybrosa yoda-129 v atmosferu na FGUP "PO "Mayak" (1975—2000 gody) [Reconstruction of Parameters of I-129 Atmospheric Release Sources Existing at Mayak PA in 1975—2000]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2025, no. 3 (119), pp. 49—64.

10 . *Oborudovanie dlya obrashcheniya s RAO bazovoi tekhnologicheskoi linii opytno-demonstratsionnogo tsentra FGUP "GKHK"* [Equipment for RW management of the basic technological line of the experimental demonstration center of FSUE "GCK"] . — URL: https://sosny .ru/oborud vanie-dlya-obrashheniya-s-rao/oborudovanie-dlya-obrashheniya-s-tro-bazovoj-texnologicheskoj-linii-odcz-fgup-vinchagxkvincha .html (a cessed on: 16 .01 .2026

11 . Kalinin N. N., Elizarova A. N., Shchebetkovsky V .N., Kuznetsov Yu. L., Isupov V. K. Issledovaniye vyshchelachivaniya yoda iz tsementnykh i bitumnykh kompaundov na osnove razlichnykh soyedineniy yoda [Study of iodine leaching from cement and bitumen compounds based on various iodine compounds]. *Radiokhimiya — Radiochemistry,* 1983, no. 4, pp. 537—542.

12 . Varlakov A. P., Barinov A. S. Konditsionirovaniye tvordykh radioaktivnykh otkhodov s ispol'zovaniyem tsementnykh matrits [Conditioning of Solid Radioactive Waste Using Cement Matrix]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive waste,* 2020, no. 4 (13), pp .71—79. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-71-79.

13 . Cicconi M. R. et al. Iodine solubility and speciation in glasses. *Scientifi Reports.* 2019, vol. 9, no. 1, p .7758. DOI: 10 .1038/s41598-019-44274-4

14 . Garino T. J. et al. Low–temperature sintering Bi–Si–Zn–oxide glasses for use in either glass composite materials or core/shell ^{129}I waste forms. *Journal of the American Ceramic Society,* 2011, vol. 94, no. 8, pp .2412—2419. DOI: 10 .1111/j .1551-2916 .2011 .0454

15 . Maddrell E., Gandy A., Stennett M. The durability of iodide sodalite. *Journal of Nuclear Materials,*

2014, vol. 449, no. 1—3, pp. 168—172. DOI: 10 .1016/j jnucmat .2014 .03 .0
16 . Trill H., Eckert H., Srdanov V. I. Mixed halide sodalite solid solution systems. Hydrothermal synthesis and structural characterization by solid state NMR. *The Journal of Physical Chemistry B,* 2003, vol .107, no. 34, pp. 8779—8788.
17 . Jubin R. T., Bruffey S. H., Patton K. K. Expanded analysis of hot isostatic pressed iodine-loaded silver-exchanged mordenite. No. ORNL/LTR-2014/476. Oak Ridge, TN (United States), Oak Ridge National Lab. Publ., 2014.
18 . Jubin R. T., Bruffey S. H. High-temperature pressing of silver-exchanged mordenite into a potential iodine waste form. In Proc. WM2014 Conference, Phoenix, Arizona, USA, 2—6 March 2014. Pp. 2—6.
19 . Hyatt N. C. et al. Zeolite-salt occlusion: A potential route for the immobilisation of iodine-129? *MRS Online Proceedings Library,* 2003, vol. 807, pp. 212—217. DOI: 10 .1557/P OC-807-359.

Information about the authors

Shaidullin Sergey Minullovich, PhD in Technical Sciences, Leading Process Engineer of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Mulenkova Ekaterina Viktorovna, Chief Specialist, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: mulenkova@ibrae .ac .r

Pashkovsky Roman Vladimirovich, Process Engineer of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: romantike90@gmail.com.

Arakelyan Aram Aikovich, PhD in Technical Sciences, Head of the Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: arakelyan@ibrae .ac .r

Stepanov Sergey Viktorovich, Process Engineer of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Boldyrev Kirill Aleksandrovich, PhD in Technical Sciences, Leading Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kaboldyrev@ibrae .ac .r

Remizova Valeria Alexandrovna, Process Engineer of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Sobolev Denis Andreevich, Technician, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sobolev@ibrae .ac .r

Kozlov Pavel Vasilyevich, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research Laboratory of the Central Factory Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: kozlov_pavel@inbox .ru

Grigoriyev Fedor Vladimirovich, Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: grig-fedor@ibrae .ac .r

Lukin Sergey Alexandrovich, Deputy Head of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Blokhin Pavel Anatolievich, PhD in Technical Sciences, Head of the Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: blokhin@ibrae .ac .r

Laptev Alexander Sergeevich, Expert of the Project Offi e, Rosatom State Corporation (24 Bolshaya Ordynka st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: AlekSLaptev@rosatom .ru

Bibliographic description

Shaidullin S. M., Mulenkova E. V., Pashkovsky R. V., Arakelyan A. A., Stepanov S. V., Boldyrev K. A., Remizova V .A., Sobolev D. A., Kozlov P. V., Grigoriev F. V., Lukin S. A., Blokhin P. A., Laptev A. S. Development of a Management System for Iodine-Containing Sorbents at FSUE PA MAYAK. *Radioactive Waste,* 2026, no .2 (35), pp. 43—54. DOI: 10 .25283/258 -9707-2026-2-43-54. (In Russian).