



ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

№ 5-6(13-14)

2012

СЕРИЯ: АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

КОНЦЕПЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ И ПРИРОДОПОДОБИЯ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Современная ядерная энергетика, основанная на тепловых реакторах, имеет ряд нерешенных и отложенных проблем, влияющих на темпы развития, структуру, эффективность ядерной энергетике в мировом масштабе. Важнейшие из этих проблем:

по прогнозам минерально-сырьевая база по урану будет не в состоянии обеспечить устойчивое долговременное развитие ядерной энергетике только на тепловых реакторах, так как при этом используется незначительная часть уранового сырья;

отсутствуют технологии надежной изоляции от биосферы радиоактивных отходов, образующихся в ядерном топливном цикле, в первую очередь это касается высокоактивных долгоживущих отходов, к которым относится и облученное ядерное топливо, если предполагается его захоронение без переработки, и оно декларируется как отходы.

В ближайшей перспективе единственным технологически достижимым методом, способным обеспечить достаточную степень защиты населения и биосферы от высокоактивных и долгоживущих отходов в течение нескольких сотен лет, является удаление отходов в глубокозалегающие подземные хранилища. Идеология обращения с долгоживущими и высокоактивными отходами в этом случае заключается в их отверждении, длительном контролируемом хранении и последующем захоронении в глубокой геологической формации.

В нескольких странах в течение десятилетий разрабатываются программы по сооружению глубинных хранилищ для окончательного захоронения отработавшего ядерного топлива или высокоактивных долгоживущих отходов (Финляндия, Швеция, США). И хотя идея подземного глубинного захоронения отходов в целях их полной изоляции от биосферы выглядит очевидной, ни в одной стране не начата эксплуатация геологического хранилища.

Организация глубинного захоронения является очень сложной многофакторной проблемой, требующей выполнения в течение длительного времени огромного объема технических и научных работ. Однако основным препятствием является отсутствие абсолютных гарантий долговременной безопасности захоронения, а в настоящее время доказательства безопасности при решении любой экологической проблемы должны быть предельно прозрачны.

Согласно научным представлениям геологические хранилища для удаления долгоживущих высокоактивных отходов должны создаваться в геологических структурах, которые обладают долговременной стабильностью, водонепроницаемостью, хорошими сорбирующими свойствами для удержания радионуклидов и др. В качестве подходящих сред рассматривают глину, каменную соль, скальные породы: гранит, базальт, туф. При этом горная порода является главным естественным барьером на пути выхода радионуклидов в биосферу. Искусственными барьерами будут засыпка (буферный материал), пеналы и

контейнеры, в которые помещаются отходы, собственно твердая матрица (матрица топлива или матрица, в которую при отверждении инкорпорируются высокоактивные отходы).

В совокупности такая многобарьерная система должна изолировать отходы на длительный период времени – до тех пор, пока не произойдет распад опасных радионуклидов. Обычно это время оценивается как 10 периодов полураспада: для продуктов деления это примерно 300 лет, для актиноидов – более 100 тысяч лет. В этом и проявляется суть проблемы. Можно прогнозировать состояние могильника и интенсивность выхода нуклидов из него на несколько сот лет (хотя и в этом случае возникают вопросы при выборе сценариев эволюции, существуют неопределенности в описании процессов, неточности оценки параметров, неполнота знания геологической структуры и, как результат, ошибка в выборе площадки и др.).

Неопределенность в долговременных прогнозах состояния могильника и соответственно выхода из него радионуклидов приводит к тому, что в решении проблемы изоляции радиоактивных отходов важнейшим запрещающим фактором на современном этапе иногда становится социально-политический аспект. Подтверждением может служить ситуация с сооружением национального хранилища отработавшего ядерного топлива США Юкка Маунтин: при выборе площадки для хранилища ядерных отходов политические соображения перевешивают технические, и проект Юкка Маунтин оказывается под угрозой закрытия, при том, что затраты на разработку площадки за прошедшие десятилетия составили около 10 млрд. долларов.

Решение важнейших проблем атомной отрасли – обеспечение топливом и обращение с отходами – принципиально возможно только в крупномасштабной многокомпонентной ядерной энергетике, основанной на использовании быстрых реакторов в замкнутом ядерном топливном цикле с глубокой переработкой облученного ядерного топлива, извлечением индивидуальных радионуклидов или их групп для возврата в цикл ценного энергетического сырья, полезного использования некоторых изотопов, трансмутацией отдельных актинидов и захоронением неостребованных радионуклидов без нарушения природного радиационного баланса.

Сохранение природного радиационного баланса подразумевает, что через определенный исторически не слишком большой период времени суммарная радиотоксичность произведенных в результате эксплуатации АЭС и/или переработки облученного топлива и направляемых на захоронение отходов не будет превышать суммарной радиотоксичности уранового сырья, извлеченного из земной коры для обеспечения АЭС топливом.

Принцип радиационно-миграционной эквивалентности

Рассмотрение сценариев, моделей выхода радионуклидов из подземных хранилищ, а соответственно и получаемого риска, начинается с оценки радиотоксичности нуклидов, содержащихся в удаляемых отходах. Так как вероятность контакта отходов с водой является важнейшим фактором, который при глубинном захоронении может привести к отрицательному воздействию хранилища на безопасность окружающей среды и здоровье населения, для каждого радионуклида вводится понятие уровня вмешательства в воде биосферы, то есть предельно допустимая его концентрация. Радиотоксичность, которая определяется как отношение концентрации нуклида к уровню вмешательства, является основополагающей радиационной характеристикой радионуклида при захоронении. Если в захораниваемых отходах несколько нуклидов, то их радиотоксичности суммируются; начальным условием экологической приемлемости какого-либо решения является непревышение суммарной радиотоксичности значения единицы.

В качестве необходимого условия развития крупномасштабной многокомпонентной ядерной энергетике называется естественная, т.е. основанная на законах природы, безопасность ядерных реакторов и естественная безопасность всего ядерного топливного цикла. Очевидно, что естественная безопасность при обращении с радиоактивными отходами будет достигнута, если вредное воздействие на человека и биосферу захороненных

долгоживущих высокоактивных компонентов отходов на протяжении всего времени существования захоронения не будет превышать такого же воздействия потребленного природного урана. В этом случае различные эффекты воздействия захораниваемых отходов нужно соизмерять с точно такими же воздействиями природного урана, который может или мог бы располагаться в том же месте, что и отходы, в концентрации и количестве, которые встречаются в природе.

При развитии этой концепции в рамках подхода формулируются принципы естественной безопасности при окончательном удалении отходов:

радиационно-миграционная эквивалентность, основанная на сравнении суммарной эффективной радиотоксичности нуклидов с эффективной радиотоксичностью исходного природного урана;

баланс тепловыделения отходов и урана;

природоподобие и природные аналоги при определении мест, условий и материалов для захоронения.

Возможность следования этим принципам будет основываться на технологиях замкнутого ядерного топливного цикла. Его центральное звено – глубокая оптимальная радиохимическая переработка облученного топлива, то есть разделение на индивидуальные радионуклиды или их группы, которые могут быть или рециклированы в энергетических реакторах для получения дополнительной энергии, или использованы в других областях науки, техники, промышленности, а не востребованные – в конечном счете захоронены с соблюдением принципов радиационно-миграционной эквивалентности.

Глубокая переработка облученного топлива обеспечит выполнение одного из условий достижения радиационно-миграционной эквивалентности при захоронении – возврат в топливный цикл быстрых реакторов в дополнение к урану и плутонию выделенных при переработке актиноидов (кюриий, америций и др.).

Следующим необходимым условием будет являться длительное контролируемое хранение радиоактивных отходов, не востребованных на начальном этапе после переработки, в специальных приповерхностных хранилищах с отводом тепла естественной конвекцией воздуха. При этом необходимый срок хранения должен достигать 300-400 лет, если хранить все продукты деления, остаточные актиноиды и активированные нейтронами конструкционные элементы реакторов. Если извлеченные при переработке цезий и стронций будут храниться отдельной фракцией, срок выдержки перед захоронением оставшихся отходов значительно снизится. При этом в любой момент контролируемого хранения для полезного использования в народном хозяйстве могут быть востребованы и стронций, и цезий, и ряд других элементов – технеций, редкоземельные элементы или др.

Длительная контролируемая выдержка отходов перед их окончательным захоронением в приповерхностном хранилище с воздушным охлаждением обеспечит достижение состояния баланса между эквивалентной активностью долгоживущих компонентов высокоактивных отходов и активностью сырья. Так, в концептуальном проекте регионального хранилища для длительного контролируемого хранения долгоживущих высокоактивных отходов РФ предполагается, что подготовка порций отходов для загрузки в хранилище (один раз в 20 лет) в виде блоков остеклованных отдельных нуклидов будет проводиться на заводе по переработке топлива.

Поступающая в хранилище порция актиноидов или продуктов деления предварительно будет перемешана и будет иметь одинаковое тепловыделение – это облегчит охлаждение блоков остеклованных отходов. Выдержанные долгоживущие компоненты высокоактивных отходов будут окончательно упакованы с концентрированием активности, что сократит объем глубинного хранилища. Создание подобного хранилища позволит снизить на длительный срок интенсивность работ по поиску и обоснованию глубинного геологического хранилища и при этом примерно в несколько раз сократить его объем.

Динамика изменения во времени важнейших радиационных характеристик высокоактивных отходов разных типов, иллюстрирующая целесообразность

предварительной выдержки, представлена в таблице (состав высокоактивных отходов зависит от технологий переработки облученного ядерного топлива).

Таблица – Динамика изменения во времени энерговыделения (Вт/кг) и потенциальной биологической опасности (Зв) высокоактивных отходов

Тип отходов	Время			
	3 года	30 лет	100 лет	200 лет
Энерговыделение отработавшего топлива ВВЭР и некоторых высокоактивных отходов, Вт/кг				
Отработавшее топливо ВВЭР	2,9	0,74	0,3	0,17
Высокоактивные отходы с остаточным количеством Pu 0,1 %	2,7	0,54	0,11	0,019
Высокоактивные отходы с остаточным количеством U, Pu, Am, Cm 0,1 %; Sr, Cs, Te, I 1 %	1,6	0,011	0,0014	0,00035
Радионуклиды: $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	0,434	0,228	0,043	0,004
$^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$	0,525	0,282	0,056	0,0055
^{135}Cs	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Потенциальная биологическая опасность, Зв				
Отработавшее ядерное топливо	$2,64 \cdot 10^5$	$1,25 \cdot 10^5$	$6,03 \cdot 10^4$	$3,84 \cdot 10^4$
Высокоактивные отходы с остаточным количеством Pu 0,1 %	$2,13 \cdot 10^5$	$7,18 \cdot 10^4$	$1,56 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^3$
Высокоактивные отходы с остаточным количеством U, Pu, Am, Cm 0,1 %; Sr, Cs, Te, I 1 %	$4,29 \cdot 10^4$	$1,33 \cdot 10^3$	$1,87 \cdot 10^2$	52

В соответствии с принципом радиационно-миграционной эквивалентности для корректного сравнения различных эффектов воздействия захораниваемых отходов и исходного природного урана необходимо учитывать различия в условиях вмешательства для отходов и урана, в их подвижности, сорбционной способности, способности матриц фиксировать радионуклиды и др.

Радиационно-миграционная эквивалентность формулируется с использованием характеристик миграции каждого нуклида, определенных для конкретного изучаемого места захоронения (принцип локальной радиационно-миграционной эквивалентности). Для каждого нуклида рассчитывается эффективная радиотоксичность, учитывающая активность радионуклида, уровень вмешательства, фактор задержки движения нуклида с подземными водами (который, в свою очередь, учитывает химическую форму нуклида, включает коэффициент его распределения между твердой породой и водой за счет сорбции-десорбции). Факторы задержки переноса радионуклидов существенно зависят от состава и проницаемости горных пород, состава вод и др. Аналогично вводится эффективная радиотоксичность природного урана, востребованного для изготовления топлива, из которого впоследствии извлекаются отходы.

Сумма отношений эффективных радиотоксичностей всех нуклидов в отходах к эффективной радиотоксичности природного урана называется индексом эффективной радиотоксичности отходов. Если индекс меньше единицы, то предполагается, что радиационное воздействие отходов будет меньше, чем исходного природного компонента.

Индекс эффективной радиотоксичности является функцией времени, прошедшего с момента захоронения отходов. Если в нулевой момент времени индекс превосходит единицу, то со временем вследствие распада нуклидов он уменьшится, и по прошествии некоторого времени T сравняется с единицей. Это и есть время достижения радиационно-миграционной эквивалентности отходов и урана. Его значение принципиально: если $T = 200-300$ лет можно считать приемлемым, поскольку защиту в течение такого времени легко обеспечить инженерными средствами, то при больших значениях T обеспечить безопасность захоронения проблематично. Радиационно-миграционная эквивалентность облученного ядерного топлива без переработки достигается в течение гораздо большего промежутка времени, так как доминирующие нуклиды в топливе имеют слишком большой период полураспада, предварительная выдержка топлива до захоронения в течение такого срока нереальна.

В параметре локальной радиационно-миграционной эквивалентности фигурирует относительная концентрация, и отсутствуют какие-либо ограничения на абсолютную концентрацию нуклидов, поэтому принцип локальной радиационно-миграционной эквивалентности дополняется требованиями на концентрацию и суммарную активность отходов в сравнении с теми же характеристиками урановых месторождений. Радиоактивность, а также нуклидный состав захораниваемых отходов должны быть такими, чтобы температура, стабильность захораниваемого материала и степень риска миграции нуклидов с учетом их опасности были бы подобны таковым или не хуже, чем природных урановых месторождений.

Этот принцип разбивается на две составляющих. Первая должна учитывать физические и физико-химические факторы захоронения, связанные с радиоактивностью: энерговыделение, температурные условия, влияние радиоактивности на устойчивость, стабильность захораниваемых материалов и другие факторы, вторая – физико-химические и геохимические факторы, обусловленные поведением отдельных радионуклидов в длительный период времени, особенностью их миграции в прилегающих к захоронению породах и т.д.

Баланс тепловыделения отходов и урана

При распаде и природного урана, и захораниваемых нуклидов выделяется тепло, пропорциональное количеству урана или отходов. Тепловыделение является важнейшей технологической нагрузкой при подземной изоляции отходов. Тепловая нагрузка существенно влияет на размеры и конструктивные особенности захоронения, ухудшает прочностные и гидрогеологические характеристики массива пород в ближайшей зоне захоронения, а также изолирующие свойства матричных и буферных материалов. Кроме того, тепловыделение может способствовать ускорению водообмена (за счет геотермального подъема глубинных вод), а с ним – и миграции радионуклидов.

Принцип радиационно-миграционной эквивалентности может предполагать на заключительной стадии захоронение радиоактивных отходов в те же места, откуда берется уран, но не обязательно в те же рудники, откуда был взят исходный уран, а в рудники, действующие на момент захоронения (в принципе, можно захоронить радиоактивные отходы и в старые рудники). Желательно, чтобы захораниваемые радиоактивные отходы имели стойкость к размыванию и уносу грунтовыми водами не ниже, чем добываемые на руднике руды.

Однако рекомендация о захоронении в урановый рудник не является обязательной для принципа радиационно-миграционной эквивалентности. Его можно трактовать более широко, как радиационную эквивалентность взятой из земной коры активности и помещенной туда. Может оказаться более предпочтительным захоронение выдержанных радиоактивных отходов в стабильные и неразмываемые геологические формации, т.е. брать урановую руду из мест, где могут быть велики потоки грунтовых вод и велика сейсмичность, а захоронить радиационно эквивалентную активность в сухие и стабильные формации.

При захоронении отходов тепловыделение ограничивается чаще всего максимальной температурой стенки емкости с захораниваемыми отходами, а не суммарным энерговыделением. Это ограничение определяется требованием сохранения стабильности вмещающей породы, изолирующих свойств матрицы и буферных материалов. Так, например, для скважинных вариантов захоронения в скальных породах стальных бидонов с остеклованными высокоактивными отходами (разработки российских ученых) предполагалось ограничение температуры стенки бидона значением 170°C. Столь высокая допустимая температура не подобна природным условиям, так как в природе в приповерхностных слоях месторождений урана до глубины около 1 км нет такой температуры.

Представление о допустимых уровнях тепловыделения захораниваемых отходов можно получить, рассматривая вариант захоронения отходов в старые урановые разработки, то есть в те же места, откуда берется уран (это был бы наиболее идеальный вариант

размещения отходов на заключительной стадии). Так, например, общее количество урана условного богатого месторождения в 300 тыс. т на 1 км² (максимальное содержание урана в месторождении на одном квадратном километре ~ 130 тыс. т, однако существует неравномерность распределения – и в таком месторождении есть участки с большей в 2 раза концентрацией на сотне квадратных метров) будет выделять только 30 кВт тепла. Исходя из таких оценок, можно в первом приближении ориентироваться на допустимые уровни тепловыделения при захоронении отходов.

Ограничение потенциальной биологической опасности захоронения уровнем опасности урановых месторождений

Важной составляющей принципа эквивалентности захораниваемых долгоживущих компонентов отходов урановым месторождениям является ограничение потенциальной биологической опасности захораниваемых отходов на основе сравнения с таковой от урановых (и ториевых) месторождений. В природе имеют место только эти месторождения радиоактивных элементов, т.е. места локального длительного сохранения значимого количества радионуклидов высокой концентрации. В связи с постоянным радиоактивным распадом урана и тория эти места одновременно содержат и дочерние радиоизотопы семейства распада: радон, протактиний, радий, торий. Именно наличие разнообразных радионуклидов с различными химическими свойствами, с разной степенью миграции и опасности определяет целесообразность аналогии захоронения радиоактивных отходов в местах таких месторождений.

Если сравнивать поведение радионуклидов отходов с поведением собственно урана, то достигнуть природоподобной радиационно-миграционной эквивалентности крайне трудно. Не уран в жестких условиях залегания определяет основной риск попадания радионуклидов в активный водообмен, а члены его радиоактивного семейства: ²³¹Pa – член семейства распада ²³⁵U, ²²⁶Ra (T_{1/2} = 1640 лет), ²²⁹Th (T_{1/2} = 45 тыс. лет). Как известно, существуют радоновые источники, выходят на поверхность радийсодержащие воды, но очень редко растворы урана.

По оценкам, для снижения риска при захоронении до общепринятых значений 10⁻⁶/год необходим индивидуальный подход к обращению с разными продуктами деления: например, количество захораниваемого ¹²⁹I надо уменьшить примерно в 1000 раз, технеция, селена и цезия – в 100 раз, олова – в 10 раз. Более точно степень извлечения доминирующих нуклидов перед захоронением с обеспечением природоподобия можно оценить из сравнения миграции природного радия, находящегося в равновесии со своим материнским ураном, с миграцией доминирующих продуктов деления в одинаковых условиях.

Другим решением является применение природоподобных матриц, позволяющих снизить растворимость, например, тех же технеция, селена и олова во столько же раз. Матрицы для иммобилизации высокоактивных и долгоживущих отходов должны быть аналогичны вмещающей породе захоронения, в крайнем случае, геологически подобны. Принцип аналогии природоподобной матрицы отходов может быть сформулирован следующим образом: необходимо стремиться к тому, чтобы материал матрицы максимально соответствовал природным материалам, содержащим наиболее нерастворимые соединения радионуклидов. В природе вулканические стекла – обсидианы – сохраняются миллионы лет.

В качестве основного материала для матриц отходов рассматриваются определенные виды стекол – фосфатные или боросиликатные. Однако к настоящему времени имеется только краткосрочная информация об устойчивости таких радиоактивных стекол; работа в этом направлении продолжается – разрабатываются синтетические медленно растворимые материалы, каждый для определенной фракции радионуклидов. При варианте размещения оставшихся долгоживущих нуклидов в малорастворимые матрицы (стекло, минералоподобные) риск потенциальной опасности захоронения будет не выше риска от месторождения урана в равновесии с его дочерним рядом семейства распада.

Принцип радиационно-миграционной эквивалентности состоит в возврате в землю количества радионуклидов, эквивалентного по радиотоксичности добытому из земли

урановому сырью. Когда возвращаются в землю долгоживущие радионуклиды, то их главная опасность – миграция. Если возвращать в землю такие нуклиды в большем количестве, чем диктуется радиационной эквивалентностью, но в таком качестве, что за счет крайне малой растворимости в период всего срока хранения их миграция будет минимальна, то это будет реализацией принципа концентрационной радиационно-миграционной эквивалентности. Нерастворимость матрицы длительный срок будет обеспечиваться природоподобной устойчивостью ее материала.

Получение при переработке облученного ядерного топлива фракций отдельных нуклидов (например, технеция) либо групп (цезия, стронция) позволяет подобрать для них индивидуальные матрицы, обеспечивающие и устойчивость, и малую растворимость. И до, и после помещения этих радионуклидов в синтетический нерастворимый материал целесообразно разместить их на длительное контролируемое хранение, так как со временем эти техногенные материалы могут быть востребованы.

Принципы природоподобия и аналогии природным месторождениям при определении мест, условий, материалов для захоронения отходов

Рассматривая радиационно-миграционные принципы, необходимо учитывать группу принципов и критериев захоронения отходов, учитывающих природоподобие по временным, географическим, геологическим, геохимическим факторам выбираемого для захоронения региона и конкретных участков захоронения. При этом основной является общая цель: не изменять геологического и геохимического природного равновесия, стремиться к подобию природным условиям образования и сохранения месторождений, сохранности минералов, использовать стабильные природные структуры, находить необходимые аналогии в природе и сравнивать с ними принимаемые решения, стараясь максимально приблизиться к ним.

Кроме факторов, связанных с наличием в отходах радионуклидов, которые могут изменить температурное поле, при захоронении большую роль играют химические, геологические, геохимические факторы, определяющие многолетнюю устойчивость захоронения и миграцию радионуклидов в водоактивные горизонты, связанные с питьевыми системами. И только одновременный учет этих факторов с радиационными и миграционными факторами может обеспечить естественную безопасность захоронения.

Условия захоронения отходов должны быть аналогичны природным местам длительного расположения ископаемых (урана, угля, солей) в необводненных породах. В качестве одного из барьеров захоронение должно иметь природную малопроницаемую породу (глину, соли, непористые скальные породы, даже вечную мерзлоту). Поэтому осадочные урановые, угольные, солевые месторождения, особенно образовавшиеся на непроницаемых горизонтальных породах, в первую очередь глиняных и нетрещиноватых скальных, могут явиться как аналогом для захоронения, так и непосредственно использоваться для захоронения высокоактивных отходов.

Химические и электрохимические условия захоронения (наличие или отсутствие кислорода как окислителя, рН среды – кислая, щелочная или нейтральная, наличие восстановителей в среде захоронения, в том числе в системе техногенных барьеров, например, металлического железа) тоже определяют устойчивость захоронения. Как техногенные, так и природные защитные барьеры, не только механически защищающие захоронение от проникновения вод и выщелачивания нуклидов, но и химически, замедляя выщелачивание и миграцию, – обязательное условие при захоронении отходов.

Глубина захоронения, важная не сама по себе, должна обеспечивать недоступность к захоронению окислительных и кислых сред из коры выветривания, с поверхности земли. Именно окислительная среда вызывает раскисление и миграцию радионуклидов урановых месторождений (на этой основе проводится добыча урана кислотным подземным выщелачиванием). В связи с этим необходимо будет учитывать дополнительные факторы: например, пока еще немногочисленные, но важные доказательства поведения техногенного плутония – так, при наличии окислителей (значительной концентрации солей нитратов)

подвижность этого обычно пассивного, но чрезвычайно радиационно опасного нуклида увеличивается.

Следует отметить, что при реализации принципа радиационно-миграционной эквивалентности вследствие значительного снижения при этом радиоактивности возможно значительное изменение требований к захоронению, в том числе и для долгоживущих радионуклидов. Возможно, при определенных условиях будет допускаться захоронение оставшихся высокоактивных отходов в приповерхностных слоях земли, например, если на глубине ниже 100 м мала трещиноватость, нет окислительных условий и др.



Для каждой страны вне зависимости от масштабов ядерно-энергетической программы проблема утилизации радиоактивных отходов является одной из важнейших. В силу физической природы радионуклидов наиболее полное и радикальное решение этой проблемы возможно только в рамках реализации замкнутого ядерного топливного цикла при развитии крупномасштабной многокомпонентной ядерной энергетики, на основе рационального комбинирования традиционных методов обращения и новых технологий.

Для подготовки информационного бюллетеня использованы следующие источники:

1. Радиоактивные отходы. Проблемы и решения. М.: Ядерное общество, 2002. Ч.1
2. Ганев И.Х. Радиационная эквивалентность при обращении с высокоактивными отходами ЯТЦ. / И.Х. Ганев // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, вып. 4. – С. 303-308.
3. Габараев Б.А. Региональное хранилище для длительного контролируемого хранения долгоживущих высокоактивных РАО. / Б.А. Габараев, И.Х. Ганев и др. // Препринт НИКИЭТ. – М., 2000.

Материал подготовили: Брылева В.А., Войтецкая Е.Ф., Нарейко Л.М.

Адреса для контактов:

ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси, 220109, Минск, ул. академика А.К. Красина, 99
тел.: 299-47-61, 299-45-56, факс: 299-43-55, E-mail: <http://www.sosny.bas-net.by>
E-mail: valentina.bryliova@yandex.by

Для получения данного информационного бюллетеня просим подать заявку в электронном виде с указанием своего электронного адреса

©При перепечатке ссылка обязательна

По заказу Министерства энергетики Республики Беларусь