

Рисунок 5 – Напряжение на выходе усилителя-дискриминатора

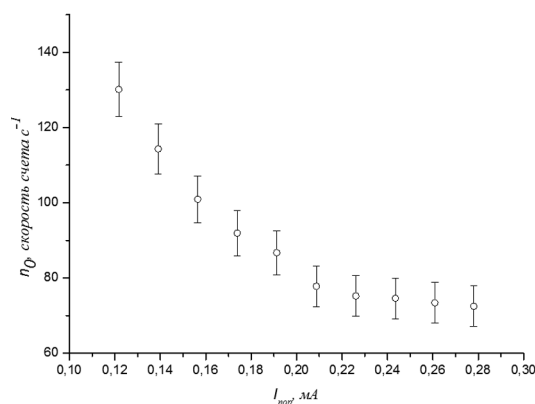


Рисунок 6 – График зависимости скорости счета блока детектирования от порога дискриминации

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Corsi, F. et al. Modeling a silicon photomultiplier (SiPM) as a signal source for optimum front-end design Nucl. Instr. and Meth. – 2007. – No. 572. – P. 416–418.
2. S13360 series MMPC® <http://www.hamamatsu.com>
3. Алексеев, Г. Д., Батурицкий, М. А., Дворников, О. В., Михайлов, В. А., Солин, А. А., Солин, А. В., Терехов, Г. С. Комплект восьмиканальных ИМС трансрезистивных усилителей Амр1-8.12 — Амр1-8.15 и компаратора Disc-8.15 для годоскопических систем // Тезисы докладов Четвертой международной конференции «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии» – ИСМАРТ-2014, 12–16 окт. 2014 г. – Минск, 2014. – С. 15–16.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

## ENSURING NUCLEAR AND RADIATION SAFETY UNDER MANAGEMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL

**О. Э. Муратов**  
**O. Muratov**

Общественный совет Госкорпорации «Росатом», г. Москва, Российская Федерация  
*oleg@twell.ru*  
Public Council of State Corporation "Rosatom", Moscow, Russian Federation

Представлены физико-химические характеристики отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и оценена ядерная и радиационная безопасность на разных стадиях обращения с ним. Высокая радиотоксичность ОЯТ в течение длительного времени крайне существенна в долгосрочных стратегиях обращения с ним и определяет стратегии – прямое захоронение или переработка. С другой стороны, ОЯТ содержит редкие и дефицитные элементы, спрос на которые постоянно растет. Согласно рекомендациям МАГАТЭ, переработка ОЯТ? помимо возврата делящихся радионуклидов в топливный цикл и выделения ценных изотопов для применения в различных областях? сокращает объемы образующихся радиоактивных отходов (РАО), не оставляя проблем будущим поколениям.

Physical and chemical characteristics of spent nuclear fuel (SNF) are presented. Nuclear and radiation safety at different stages of management of SNF is evaluated. High radiotoxicity of SNF over a long period of time is essential in long – term management strategies and determines strategies-direct disposal or recycling. On the other

hand, SNF contains rare and scarce elements, the demand for which is constantly growing. According to IAEA recommendations, in addition to the return of fissile radionuclides to the fuel cycle and the release of valuable isotopes for use in various fields, SNF processing reduces the amount of radioactive waste (RW) generated, leaving no problems for future generations.

*Ключевые слова:* ядерное топливо, радиоактивность, радионуклиды, актиниды, осколки деления, стратегия, захоронение, переработка, контейнеры, хранилища,

*Keywords:* nuclear fuel, radioactivity, radionuclides, actinides, fission fragments, strategy, disposal, recycling, containers, storage

Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) – это ядерные материалы (ЯМ) и продукты деления, находящиеся в составе облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС), после их использования. ОЯТ, содержащее до 98 % общей радиоактивности, вовлеченной в сферу человеческой деятельности, представляет особый вид радиоактивных материалов, подавляющее большинство из которых не существует в природе. Продукты деления  $^{235}\text{U}$  содержат около 300 изотопов различных элементов с массовыми числами от 30 до 164 и периодами полураспада от долей секунды до миллионов лет.

В состав ОЯТ помимо невыгоревших  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  входят образующиеся изотопы актинидов:  $^{232,236}\text{U}$ ,  $^{239,240,241,242}\text{Pu}$ ,  $^{241,242,243}\text{Am}$ ,  $^{242,243,244}\text{Cm}$  и  $^{237}\text{Np}$ . Многие актиниды способны к спонтанному делению, и наличие в составе ОЯТ спонтанно делящихся изотопов накладывает существенные ограничения на технологии обращения с ОЯТ. Кроме осколков деления и трансурановых элементов, в общую радиоактивность ОЯТ вносят радионуклиды  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{58,60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$  и др., которые образуются под действием облучения в конструкционных материалах ТВС.

Радиоактивность плутония, америция, других трансурановых элементов и продуктов деления, на несколько порядков превосходящая активность природных радионуклидов, представляет радиоэкологическую опасность в течение тысячелетий. Следует отметить также высокую токсичность большинства актинидов. Кроме того, ОЯТ содержит в себе плутоний, включенный в основной список ЯМ, подлежащих учёту и контролю в целях нераспространения.

Большие периоды полураспада актинидов и некоторых продуктов деления крайне существенны в долгосрочных стратегиях обращения с ОЯТ. Оставаясь на длительный период высокоактивным материалом (рис. 1), ОЯТ представляют собой источник радиологической опасности для значительной территории как в случае техногенной аварии на хранилище, так и в случае террористической акции.

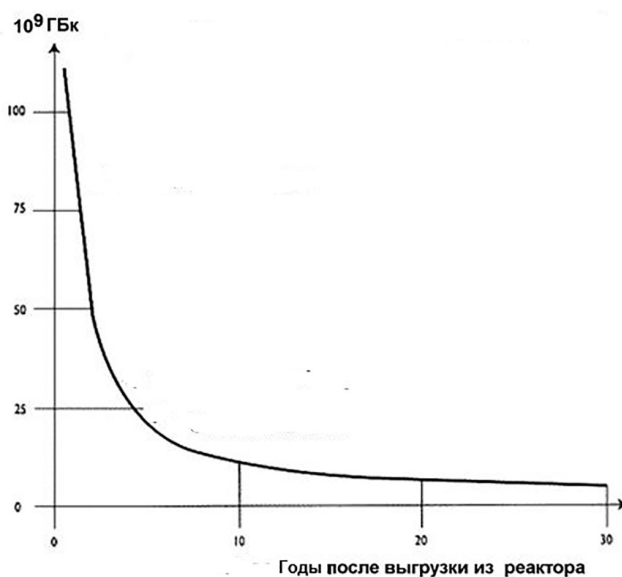


Рисунок 1 – Активность 1 т ОЯТ в течение времени

Поэтому их изоляция от окружающей среды (ОС), помимо сложности технических решений, требует больших финансовых затрат, а любое существенное нарушение в обращении с ОЯТ может привести к экологической катастрофе. Кроме радиоэкологических аспектов обращение с ОЯТ тесно связано с проблемой нераспространения ЯМ.

Обеспечение ядерной и радиационной безопасности при обращении с ОЯТ и его надежная изоляция от ОС являются главными аспектами общей проблемы обращения с ЯМ. Безопасное обращение с ОЯТ – ключевая проблема, от решения которой зависят масштабы развития ядерной энергетики (ЯЭ) и широкое внедрение ядерных и радиационных технологий.

Проблемы безопасного обращения с ЯМ и ОЯТ возникла с началом использования ядерных технологий, однако на начальных этапах их развития ядерные технологии использовались исключительно в военных целях.

Требовались скорейшая наработка оружейных ЯМ, наращивание ядерного потенциала и вопросам обеспечения ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ) при обращении с радиоактивными отходами (РАО), ЯМ и ОЯТ не уделялось должного внимания. Недостаток научных знаний также не способствовал исследованию проблем воздействия ядерных технологий на человека и природу.

В начальные годы развития мирной ЯЭ аспекты безопасности и экологических последствий приносились в жертву экономической и политической целесообразности, а проблемы обращения с ОЯТ считались второстепенными, и их решение откладывалось на потом во всех ядерных странах. Проблема обращения с ОЯТ с каждым годом все более обострялась потому, что, во-первых, накапливалась десятилетиями и, во-вторых, ЯЭ стала ширококомасштабной технологией.

В настоящее время в мире эксплуатируется 449 ядерных энергоблоков, и, при средней наработке от 20 (легководные ВВЭР, PWR, BWR) до 140 т/год (тяжеловодные CANDU), из них ежегодно выгружается ~10,5 тыс. т ОЯТ. На начало 2019 г. в мире остановлено и находится в разных стадиях вывода из эксплуатации 156 ядерных энергоблоков, большая часть ОЯТ которых находится в пристанционных хранилищах, а всего в мире накоплено более 400 тыс. т ОЯТ.

В мире приняты три концепции обращения с ОЯТ [1]:

1. Размещение во временные хранилища (отложенное решение);
2. Переработка.
3. Прямое захоронение.

Мировые практики обращения с ОЯТ и его количества при каждой стратегии приведены на рис. 2.

МАГАТЭ не отдает предпочтений ни одному из указанных способов обращения с ОЯТ и не устанавливает каких-либо норм относительно способов и сроков его хранения. Стратегия обращения с ОЯТ в каждой стране определяется политическими и экономическими аспектами, проблемами гарантий нераспространения и защиты ОС. Стратегия обращения с ОЯТ и количество накопленного ОЯТ в странах с развитой ЯЭ приведены в табл. 1. Необходимо отметить, что ни одна страна в мире не рассматривает длительное наземное хранение ОЯТ как безопасное и долгосрочное (более 100 лет).

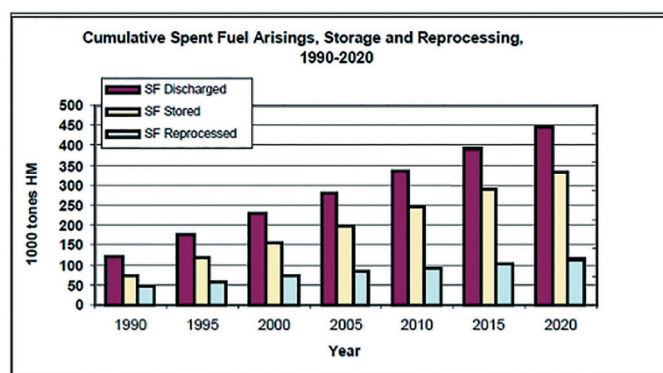


Рисунок 2 – Накопление, хранение и переработка ОЯТ

Таблица 1 – Стратегия обращения с ОЯТ в некоторых странах с развитой ЯЭ

№	Страна	Накоплено ОЯТ, тыс. т	Стратегия обращения с ОЯТ
1	США	105,0	Прямое захоронение
2	Канада	37,3	Прямое захоронение
3	Россия	23,7	Частичная переработка
4	Япония	19,0	Переработка
5	Франция	13,5	Переработка
6	Корея	10,9	Хранение с неопределенным будущим
7	Германия	5,9	Прямое захоронение
8	Великобритания	5,8	Переработка с неопределенным будущим
9	Швеция	5,4	Прямое захоронение
10	Финляндия	1,6	Прямое захоронение

В настоящее время в мире отсутствуют объекты окончательного захоронения ОЯТ. Признано, что могильники ОЯТ должны размещаться в геологических хранилищах на глубинах в несколько сотен метров, а ОЯТ размещаться в специальных контейнерах при контролируемых условиях. Однако во всех рассматриваемых вариантах глубинного геологического захоронения остаются большие неопределенности, связанные с поведением ОЯТ в течение длительного времени.

Среди стран, приверженцев окончательного захоронения ОЯТ, Финляндия является пионером в строительстве долговременных подземных хранилищ для его окончательной изоляции. Могильник для хранения контейнеров с ОЯТ после его выдержки в течение 30 лет в пристанционных хранилищах будут располагаться в скальной

поруде на глубине более 500 метров под дном Балтийского моря. Ядерная и радиационная безопасность захороненного ОЯТ обеспечивается несколькими степенями защиты, но разработанная система предусматривает возможность извлечения замурованного глубоко под землей ОЯТ.

Высокая стоимость создания долговременных глубинных хранилищ и неопределенности в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности привели к тому, что проекты создания могильников практически во всех странах, выбравших стратегию прямого захоронения ОЯТ, не вышли за пределы концептуальных решений и предпроектных исследований [2]. Например, в Германии более 30 лет ведутся исследования возможности создания могильника ОЯТ и высокоактивных РАО в различных геологических породах (солевые формации, бывшие железорудные шахты), а в США остановлен проект Юкка Маунтин.

Цель переработки ОЯТ – минимизация его радиационной опасности и выделение полезных веществ дальнейшего использования. Помимо невыгоревшего урана и наработанного плутония продукты деления содержат множество различных широко используемых в медицине, промышленности и науке изотопов, а также большое количество редкоземельных элементов и платиноидов. Радиохимическая переработка ОЯТ обеспечивает возврат делящихся материалов в топливный цикл, фракционирование РАО, их контролируемое хранение и наработку изотопов.

Первоначально радиохимическая технология переработки ОЯТ применялась с целью получения оружейного плутония. Впоследствии Франция и Великобритания развивали производства, в том числе и для нужд мирной ЯЭ. В 1960-х гг. многие страны, развивающие ЯЭ, начали переработку ОЯТ, которая рассматривалась, главным образом, как способ получения урана и плутония для производства нового топлива. Однако непредвиденно высокая стоимость переработки, технические трудности в реализации радиохимической технологии, ужесточение требований к сбросам РАО и невысокая стоимость природного урана приостановили дальнейшие работы и большинство опытных производств были остановлены.

В настоящее время промышленная переработка ОЯТ ведется лишь в пяти странах мира – Франции, Великобритании, России и Индии (табл. 2). Китай планирует ввести в эксплуатацию завод по переработке ОЯТ в 2020 г.

Таблица 2 – Действующие в мире предприятия по переработке ОЯТ

№	Страна	Завод	Год ввода в эксплуатацию	Местоположение	Производительность, т/год
1	Франция	UP-2	1994	Ла-Аг	1000
2	Франция	UP-3	1989	Ла-Аг	1700
3	Великобритания	THORP	1994	Селлафилд	1200
4	Россия	РТ-1	1977	Озерск	400
5	Япония*	Tokai	1981	Токай Мура	100
6	Япония*	Rokkasho	2010	Аомори	800
7	Индия	Trombay	1964		60
8	Индия	PREFRE-1	1974	Тарапур	100
9	Индия	PREFRE-2	1998	Калпаккам	100

**Примечание:** \*Опытный перерабатывающий завод Токай был остановлен после аварии на Фукусиме, опытная эксплуатация завода Rokkasho началась в 2006 г., а его ввод в промышленном масштабе планировалось начать в 2010 г. Все работы были остановлены после аварии на Фукусиме.

Мировые лидеры по переработке ОЯТ используют регенерированный уран и выделенный плутоний для изготовления смешанного уран-плутониевого топлива (МОКС-топливо), которое в настоящее время используется на 33 реакторах в Западной Европе и Японии. На заводах UP-2 и UP-3 перерабатывается не только ОЯТ французских АЭС, но и заключены многомиллиардные контракты на переработку ОЯТ с энергокомпаниями Германии, Японии, Швейцарии, Бельгии, Нидерландов и Тайваня. Зарубежное ОЯТ перерабатывается и на заводе THORP в Великобритании, который был построен за счет контрактов на переработку.

Все перерабатывающие предприятия используют водно-экстракционные технологии. После механического размельчения отработавшие тепловыделяющие сборки растворяют в азотной кислоте и получают раствор, содержащий уран, плутоний, нептуний и продукты деления. Для выделения из раствора ценных компонентов, их разделения и очистки от примесей применяются экстракционные методы с использованием в качестве экстрагента трибутилфосфата в органическом разбавителе. Схемы переработки на каждом предприятии отличаются только набором применяемых реагентов, последовательностью отдельных технологических стадий и аппаратурным оформлением.

Несмотря на то, что Россия является убежденным сторонником переработки ОЯТ, перерабатывается ~30 % нарабатываемого ОЯТ. Завод РТ-1 на ПО «Маяк», созданный на базе радиохимического завода по наработке оружейного плутония, был введен в эксплуатацию в 1977 г. До недавнего времени на трех технологических линиях в промышленном масштабе завод перерабатывал ОЯТ реакторов ВВЭР-440 и БН-600, транспортных и некоторых исследовательских реакторов [3]. После масштабной реконструкции в 2015–2017 гг. производительность завода была увеличена и расширена номенклатура перерабатываемого ОЯТ. В настоящее время перерабатываются практически все виды ОЯТ (реакторов ВВЭР-1000 и АМБ, дефектное топливо РБМК-1000, уран-циркониевое, нитридное и др.).

Кроме расширения номенклатуры перерабатываемого ОЯТ, усовершенствованы технологии обращения с РАО. Для остекловывания ВАО введена в эксплуатацию новая печь ЭП-500 производительностью 500 л/ч. Для

переработки жидких НАО и САО сооружены установки очистки вод спецканализации и создан комплекс цементирование жидких и гетерогенных САО.

Одной из проблем современных технологий переработки ОЯТ (пожалуй, самой главной) является образование большого количества жидких РАО, и крупнейшие в мире перерабатывающие заводы сбрасывают их в северные моря. Французские UP-2 и UP-3 низкоактивные ЖРО, содержащие тритий и йод, сбрасывают в Ла-Манш, а британский THORP – в Ирландское море.

В соответствии с ужесточающимися экологическими требованиями существующие методы переработки ОЯТ необходимо модифицировать. Технологии должны быть экологически безопасными, исключая попадание в ОС жидких и газообразных РАО [4]. Для развития радиохимической промышленности и отработки новых способов переработки ОЯТ с минимизацией образования ЖРО на Горно-химическом комбинате создается опытно-демонстрационный центр, который в оптимальных условиях позволит отработать сразу несколько технологий многоуровневой радиохимической переработки ОЯТ, позволяющих эффективно отделить на головных операциях тритий и йод для их исключения из сбросных потоков.

В заключение следует отметить, что переработка ОЯТ обеспечивает ЯРБ заключительных стадий ядерных технологий и позволяет вовлечь в ЯТЦ выделенные при переработке уран и плутоний и использовать ОЯТ в качестве сырья для радиоизотопной продукции, а также нарабатывать редкие и дефицитные элементы для различных отраслей промышленности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. IAEA-TECDOC-1587. Spent Fuel Reprocessing Options. – Vienna: IAEA, 2008. – 144 p.
2. Никитин, А. К. и др. Ядерные делящиеся материалы / Никитин А. К. и др. – Санкт-Петербург: Экологическое объединение «Беллона», 2012. – 116 с.
3. Муратов, О. Э. Технический отчет NNW-GW 1/2014 «Формирование опытно-демонстрационных центров по выводу из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов» / Санкт-Петербург, 2015. – 45 с.
4. Гаврилов, П. М. Красноярский край территория перспективных разработок атомной отрасли / П. М. Гаврилов // VII Региональный форум-диалог «Атомные производства, общество, безопасность – 2014»: Материалы форума-диалога. – Красноярск, 2015

## ОТРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ TRYING OUT DETERMINATION METHODS FOR RADIOACTIVE GASES IN THE AMBIENT AIR WHEN MANAGING SNF

**Л. В. Тимонова<sup>1</sup>, О. Н. Ляхова<sup>1</sup>, С. С. Бабешкин<sup>2</sup>**  
**L. Timonova<sup>1</sup>, O. Lyakhova<sup>1</sup>, S. Babeshkin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК,  
г. Курчатов, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК,  
г. Курчатов, Республика Казахстан  
Timonova@nnc.kz

<sup>1</sup>Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” NNC RK, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Branch “Institute of Atomic Energy” NNC RK, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

В настоящее время в процессе обращения с ОЯТ осуществляется контроль за уровнем радиационного фона. Одним из процессов обращения является долговременное контейнерное хранение ОЯТ. С целью осуществления комплексной радиационной оценки и возможности выполнения долгосрочных прогнозных оценок радиационной ситуации не менее важно осуществлять контроль за эманацией радиоактивных газов в атмосферу. В связи с этим необходимо разработать и внедрить соответствующие методы исследования и контроля за содержанием радиоактивных газов в воздухе в процессе обращения с ОЯТ. В данной работе представлены результаты исследований и аппаратурно-методическое обеспечение, которое может успешно применяться для оценки радиоактивности воздуха в процессе обращения с ОЯТ.

At the present time radiation background level is controlled when handling SNF. One of SNF handling methods is long-term storage in containers. For the purpose of comprehensive radiological assessment and to make long-term predictive estimates for radiological situation it is also important to control emission of radioactive gases into the atmosphere. Therefore, it is necessary to develop and introduce respective methods to research and control concentration of radioactive gases in the air while handling SNF. This paper provides research results and methodical and hardware support that can be successfully used in assessment of air radioactivity when handling SNF.