

ВЛАДИМИР УШАКОВ

Радиоактивные ОТХОДЫ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ



Владимир Ушаков

**Радиоактивные отходы.
Технологические основы**

«Издательские решения»

Ушаков В. И.

Радиоактивные отходы. Технологические основы /
В. И. Ушаков — «Издательские решения»,

ISBN 978-5-44-904257-6

Рассматриваются основы экологической проблемы радиационных отходов и технологии обращения с ними применительно к решению задач обеспечения экологической радиационной безопасности. Материалы предназначены для специалистов в области обеспечения радиационной и экологической безопасности.

ISBN 978-5-44-904257-6

© Ушаков В. И.
© Издательские решения

Содержание

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
Сущность проблемы РАО	8
Экологические особенности проблемы РАО	9
Обострение проблемы РАО на современном этапе	11
Экономические и политические аспекты проблемы РАО	13
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ	14
РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, ИХ РАДИАЦИОННЫЕ	14
ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ	
Специфика понятия радиоактивных отходов	14
Общее количество и активность РАО	16
Удельная (массовая, объемная) активность РАО	16
Скорость спада активности РАО	17
Радионуклидный состав РАО	18
Срок захоронения РАО	19
Классификация РАО	19
ИСТОЧНИКИ ОБРАЗОВАНИЯ РАО	21
Общая характеристика источников образования РАО	21
Ядерные реакторы как источник образования РАО	22
Конец ознакомительного фрагмента.	25

Радиоактивные отходы Технологические основы

Владимир Игоревич Ушаков

© Владимир Игоревич Ушаков, 2018

ISBN 978-5-4490-4257-6

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

В настоящих материалах рассматриваются основы экологической проблемы радиационных отходов и технологии обращения с ними применительно к решению задач обеспечения экологической радиационной безопасности.

Материалы предназначены для специалистов в области обеспечения радиационной и экологической безопасности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АПЛ – атомная подводная лодка;
АЭС – атомная электростанция;
АЭУ —
ВВ – взрывчатое вещество;
ВМФ – Военно-морской флот;
ГРО – газообразные радиоактивные отходы;
ГСЭС – Государственная санитарно-эпидемиологическая служба;
ДМ – делящийся материал;
ДОА – допустимая объемная активность;
ДУ — допустимый уровень;
ЖКТ – желудочно-кишечный тракт;
ЖРО – жидкие радиоактивные отходы;
ЗИ – закрытый источник;
ИИ – ионизирующее излучение;
ИИИ – источник (и) ионизирующего излучения;
КПД – коэффициент полезного действия;
КУ – контрольный уровень;
ЛП – лучевое поражение;
МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии;
МЗА – минимально значимая активность;
МЗУА – минимально значимая удельная активность;
МКРЗ – Международная комиссия по радиационной защите;
НРБ – нормы радиационной безопасности;
ОБЭ – относительная биологическая эффективность;
ОИ – открытый источник;
ОПД – основной предел дозы;
ОРБ – обеспечение радиационной безопасности;
ОС – окружающая среда;
ОСП – основные санитарные правила;
ОСПОРБ – основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности;
ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;
ПГП – предел годового поступления;
ПЗРО – пункт захоронения радиоактивных отходов;
ПРЗ – противорадиационная защита;
ПЯД – продукты ядерного деления;
РА – радиационная авария;
РАО – радиоактивные отходы;
РБ – радиационная безопасность;
РВ – радиоактивное вещество;
РЗ – радиоактивное загрязнение;
РН – радиоактивный нуклид (радионуклид);
РОО – радиационно опасный объект;
РПА – радиоактивные продукты аварии;
РПВ – радиоактивные продукты ядерного взрыва;
СЗЗ – санитарно-защитная зона;
СИЗ – средства индивидуальной защиты;

СПО – специализированная организация по обращению с РАО;
СПОРО – санитарные правила обращения с радиоактивными отходами;
ТВС – тепловыделяющая сборка;
ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;
ТРО – твердые радиоактивные отходы;
ТУК – транспортный упаковочный комплект;
ТЭ – тротиловый эквивалент;
ТЭС – тепловая электростанция;
УВ – уровень вмешательства;
УМА – удельная массовая активность;
УОА – удельная объемная активность;
УПА – удельная поверхностная активность;
ЭРБ – экологическая радиационная безопасность;
ЯВ – ядерный взрыв;
ЯВВ – ядерное взрывчатое вещество;
ЯО – ядерное оружие;
ЯР – ядерный реактор;
ЯРОО – ядерно и радиационно опасный объект;
ЯТЦ – ядерный топливный цикл;
ЯЭУ – ядерная энергетическая установка.

ВВЕДЕНИЕ

Сущность проблемы РАО

Широкое внедрение радиоактивных веществ (РВ) и других источников ионизирующих излучений (ИИИ) в различные сферы производственно-технической деятельности породило экологическую проблему радиоактивных отходов.

При этом под радиоактивными отходами (РАО) понимаются радиоактивные вещества и материалы (в том числе ядерные, делящиеся), представляющие определенную (чаще – экологическую) опасность и дальнейшее использование которых не предполагается.

Кратко существо данной проблемы можно сформулировать следующим образом.

Большие масштабы и все возрастающие темпы накопления РАО, как правило, их высокая активность и другие вредные свойства обуславливают увеличивающуюся опасность РАО для экологии человека, для других экологических систем и требуют оперативного принятия адекватных мер для обеспечения экологической радиационной безопасности (ЭРБ).

К радиоактивным отходам, связанным с использованием РВ и других ИИИ можно отнести:

радиоактивные отходы предприятий оборонного комплекса по производству ядерных взрывчатых веществ (ЯВВ) – плутония-239, обогащенного урана (урана-235), радиоактивного трития;

отработавшее ядерное топливо подвижных объектов с ядерными двигателями (главным образом – отходы ядерных реакторов (ЯР) кораблей);

радиоактивные продукты, которые могут возникать при радиационных авариях и вызывать радиоактивное загрязнение (РЗ) окружающей среды (ОС);

контрольные ИИИ, которые использовались в радиационных приборах для проверки их работоспособности и срок эксплуатации которых истек; к этой же группе РАО могут быть отнесены градуировочные (эталонные, образцовые) ИИИ с истекшим гарантийным сроком пригодности, которые применялись в системе технического обслуживания радиационных приборов;

другие ИИИ, использованные в научно-исследовательских и прочих целях (в том числе в качестве атомных бортовых источников электроэнергии на космических аппаратах, в средствах противопожарной автоматической сигнализации и пожаротушения, в медицинском радиационном оборудовании и т.д.).

Наиболее существенную экологическую радиационную опасность (ЭРО) из этих источников РАО представляют: в условиях штатной эксплуатации – отработавшее ядерное топливо ЯР, а в чрезвычайных ситуациях – радиоактивные продукты радиационных аварий.

Одним из принципиальных положений по организации работ с РВ является требование по минимизации количества РАО, образующихся при технологических процессах (операциях), связанных с применением ИИИ.

Сразу следует оговориться, что не всегда продукты указанных выше источников (в частности, отработанное ядерное топливо и оружейный плутоний) относятся к категории РАО, поскольку в некоторых условиях они могут быть утилизированы. Поэтому правильнее их относить к возможным РАО, поскольку они иногда действительно в дальнейшем не будут использоваться и подлежат уничтожению.

Экологические особенности проблемы РАО

В отличие от других видов отходов РАО имеют существенную специфику, обуславливающую их особую экологическую значимость. К их числу особенностей РАО можно отнести следующие.

1. Высокая опасность большинства РАО. Так РАО в виде отработавшего топлива ядерных реакторов относятся к числу ИИИ с наиболее высокой удельной активностью.

Удельная массовая активность тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов к концу типового срока их эксплуатации (третьего года кампании) достигает 26 кКи/кг, что примерно соответствует 10^{15} Бк/кг (или 1 ПБк/кг).

Характерным для таких РАО является возрастание их активности в процессе работы реактора по сравнению с начальной: чем больше время работы, тем выше активность РАО, которая достигает максимального значения к моменту их выгрузки из реактора. Несколько в меньшей степени это свойство проявляется и при хранении оружейного плутония: в нем тоже происходит накопление со временем более активного америция-241 (по сравнению с плутонием-239).

2. Большой срок действия радиационной опасности РАО, что обуславливается большими периодами полураспада основной массы радионуклидов, входящими в состав РАО.

Так период полураспада плутония-239 составляет 24 100 лет, стронция-90 – 29,1 года, цезия-137 – около 30 лет. Периоды полураспада изотопов урана исчисляются миллионами лет (для урана-235 он равен 704 млн. лет, для урана-238 – 4470 млн. лет).

3. Трудность обезвреживания РАО. По-существу, единственным практическим способом обезвреживания РАО является их выдержка во времени на срок, пока активность не уменьшится вследствие естественного радиоактивного распада до допустимой величины. Как отмечалось, естественный распад радионуклидов РАО идет обычно очень медленно; изменить и как-то ускорить его принципиально нельзя. Поэтому срок выдержки для обезвреживания РАО может составлять десятки и сотни лет, а в ряде случаев достигать тысяч лет.

4. Возможность выделения при хранении и естественном распаде РАО радиоактивных веществ в газовой фазе с образованием радиоактивных аэрозолей. При этом происходит радиоактивное загрязнение воздуха и возникает дополнительная опасность внутреннего облучения персонала, работающего с РАО, а также населения. Эта опасность может усугубляться химической токсичностью некоторых радионуклидов (например, природного урана, урана-238, урана-235), при поступлении которых во внутренние органы и ткани они действуют как обычные сильные пищевые яды.

5. При складировании больших масс РАО высокой активности может выделяться значительное количество тепла, вследствие чего возможно интенсивное парообразование, повышение давления в замкнутых объемах и даже тепловой взрыв. В качестве одного из примеров проявления этого свойства РАО может служить Кыштымская радиационная авария (29.09.1957 г.), когда из-за неисправности системы теплоотвода в хранилище высокоактивных РАО произошел сильный взрыв с выбросом в ОС около 20 МКи радиоактивных веществ, и последствия которой ощущаются до сих пор.

6. Уникальность происхождения основной массы РАО: почти все они относятся к искусственным радионуклидам, в естественной природе их практически нет. Нет и никогда не было ранее в природе такой высокой концентрации радиоактивности на ограниченных площадях, какая в настоящее время иногда создается человеком.

7. Особыми свойствами обладают РАО, содержащие делящиеся материалы (ДМ). Сосредоточение ДМ в ограниченных объемах может привести к формированию критической массы и возникновению цепной ядерной реакции с большим выделением ядерной энер-

гии. Это обуславливает особую потенциальную опасность РАО данного вида и необходимость соблюдения особых мер предосторожности при работах с ними.

8. Многообразие источников образования РАО, на что ниже обратим особое внимание.

Обострение проблемы РАО на современном этапе

Современные условия характеризуются возрастающим обострением проблемы РАО и актуальностью ее решения, что обусловливается целым рядом причин.

Во-первых, накоплением большой массы РАО. Оценки показывают, что общая активность обычных РАО, накопленных к концу 90-х годов прошлого века в нашей стране, и отработанного ядерного топлива (а оно, как отмечалось, тоже может рассматриваться как потенциальный РАО) уже в то время составляла более 260 ЭБк (7 млрд. Ки).

Еще одним источником накопления РАО длительное время была верхняя атмосфера – стратосфера. В ней скопилось значительное количество РВ, попавших туда в результате ядерных испытаний при проведении наземных, воздушных и высотных ядерных взрывов. Слабая вертикальная циркуляция воздуха в стратосфере обусловила стабильные условия для накопления в ней радиоактивности. Хотя такие взрывы уже давно не проводятся (по мораторию 1963 года), радиоактивные выпадения из стратосферы наблюдаются до сих пор.

Во-вторых, опережающие темпы накопления РАО по сравнению со скоростью их ликвидации. Самое большое количество РАО поставляют предприятия ядерно-топливного цикла (ЯТЦ). Темп накопления таких отходов оценивается средней величиной примерно в 10 тыс. тонн в год. Замена ТВЭЛов в ядерных реакторах производится регулярно через каждые 3 – 4 года, так что пополнение этих РАО идет непрерывно. Расчетное время эксплуатации ядерных реакторов ограничивается 25 – 30 годами, после чего должен осуществляться их демонтаж с выгрузкой РАО. Однако существующие мощности предприятий по выгрузке и обработке РАО не позволяют своевременно справляться с данной задачей, в результате чего происходит скопление РАО и создается опасная радиационная ситуация.

Примечание. Особенно напряженная в этом отношении обстановка складывается в Военно-морском флоте с атомными подводными лодками (АПЛ). В годы холодной войны в Советском Союзе было построено больше всех в мире кораблей с ядерными энергетическими установками: примерно 250 атомных подводных лодок, 5 надводных кораблей с мощным ракетно-ядерным вооружением (крейсеров типа «Адмирал Ушаков») и др. Было спущено на воду 8 атомных ледоколов («Ленин», «Арктика», «Сибирь», «Россия», «Севморпуть» и др.). Сейчас многие из них отслужили гарантийный срок и выведены из эксплуатации (например, ледокол «Ленин» в 1990 г.), их ядерные энергетические установки подлежат демонтажу, отработавшее ядерное топливо – выгрузке. Однако вовремя о создании необходимой инфраструктуры для проведения указанных работ не позаботились. В результате возникла накапливающаяся очередь по обработке РАО, главным образом АПЛ, насчитывающая более сотни с десятками единиц субмарин. Ежегодно из эксплуатации выводится примерно 10 лодок, а разгружается не более 6. Часть АПЛ ожидает своей очереди выгрузки отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) уже в течение нескольких лет.

В-третьих, все более очевидной становится тенденция к дальнейшему все возрастающему накоплению РАО как в настоящее время, так и в перспективе. Эта тенденция обусловливается безальтернативностью перехода к ядерной энергетике в глобальном масштабе.

Примечание. На путь интенсивного использования ядерной энергии встали уже многие страны. В настоящее время все острее проявляется превосходство ядерной энергетике перед традиционной, основанной на органическом топливе, в том числе и по экологическим показателям. Практическое отсутствие выбросов в атмосферу загрязняющих ее химических веществ – яркое свидетельство экологичности атомных электростан-

ций (АЭС). Не случайно АЭС «Сайзуэлл Б» (Великобритания) – первое в мире предприятие, внесенное в регистр благополучных экологических организаций. Экологически чистым окном Европы называют Францию, электроэнергетика которой основана на АЭС. Размеры отчуждаемой земли для размещения АЭС примерно в 4 раза меньше, чем для тепловых электростанций (ТЭС). Как ни удивительно на первый взгляд, при сжигании органического топлива в трубу ТЭС выбрасывается активности естественных радионуклидов несгоревшего топлива больше, чем при работе АЭС. В отличие от ТЭС, для выделения тепла в ЯР не требуется кислорода. Следовательно, его природные ресурсы на Земле сберегаются. Себестоимость электроэнергии, получаемой на АЭС (2,2 – 3 цент. / кВт-ч), сравнима, а порой и ниже аналогичной величины для энергетики на органическом топливе (2,5 – 4 цент. / кВт-ч в зависимости от энергоносителя).

Таким образом, масштабы использования ядерной энергии в мире и в нашей стране объективно должны возрастать. Вместе с ядерной энергетикой будет расти и количество связанных с ней РАО.

В-четвертых, нерешенность проблемы РАО является определенным тормозом для развития ядерной энергетики как в нашей стране, так и в ряде других государств. Тяжелые экологические последствия радиационной аварии на Чернобыльской АЭС и возрастающее радиоактивное загрязнение природы породили у многих людей чувство недоверия к энергии атома, которое зачастую лишь в популистских, спекулятивных целях подогревается средствами массовой информации. В значительной мере по этим причинам ядерная энергетика в стране топталась на месте. Образно проблему РАО называли бичом ядерной энергетики.

Экономические и политические аспекты проблемы РАО

Помимо экологической значимости, проблема РАО затрагивает экономические и даже политические вопросы общественной жизни.

С экономической точки зрения РАО сильно отличаются от обычных отходов своей высокой начальной стоимостью. В производство РВ, особенно ДМ, вкладываются очень большие средства. Достаточно вспомнить колоссальные затраты, которые потребовались на строительство гигантских заводов по получению ЯВВ, по обогащению урана и выделению плутония в период создания ядерного оружия (ЯО). Для решения этих задач были привлечены почти все экономические ресурсы страны.

Ликвидация РАО в свою очередь тоже требует больших материальных и трудовых затрат, связанных с проведением комплекса сложных технологических операций, строительством дорогостоящих хранилищ, обеспечением радиационной безопасности персонала и населения. В то же время подряды на ликвидацию РАО сулят большие экономические выгоды, поскольку высоко оплачиваются.

Политический аспект проблемы РАО связан не только с созданием партий «зеленых», ставящих в основу своей политической платформы экологические проблемы, в том числе и отношение к данной проблеме.

В последнее время проблема РАО вышла на международную арену и в связи с ядерными программами Ирана и Северной Кореи. Политический аспект проблемы РАО в последнее время получил новое развитие в связи с возрастанием угрозы радиационного терроризма и использованием в этих целях РАО. Как отмечалось, некоторые РАО отличаются очень высокой удельной активностью, что позволяет изготовить компактные (часто практически невидимые) ИИИ, представляющие смертельную опасность для человека. В целях политического шантажа возможно использование угрозы организации аварий на РОО с сильным РЗ ОС радиоактивными продуктами аварии, которые, по-существу, тоже являются РАО.

Таким образом, проблема РАО не мелкая и ограниченная по целям, объему и технологии чисто техническая задача, а категория глобального масштаба, имеющая большое экологическое значение и затрагивающая ряд жизненно важных общественных интересов.

Рассмотрению основных вопросов этой проблемы и посвящен данный материал.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, ИХ РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Специфика понятия радиоактивных отходов

Как отмечалось, под радиоактивными отходами (РАО) понимаются радиоактивные вещества и материалы (в том числе ядерные, делящиеся), представляющие определенную опасность и дальнейшее использование которых не предполагается.

Таким образом, специфика самого понятия РАО включает в качестве одного из отличительных признаков, помимо их радиоактивной природы, наличие определенной опасности таких отходов. Если радиационная опасность отходов не проявляется, то они могут быть отнесены к стабильным веществам, и обращение с ними будет регулироваться по общим правилам работы с обычными отходами. При исследовании экологических проблем логично принимать во внимание, прежде всего, опасность РАО для экологических систем, для экологии человека.

Оценка опасности или безопасности РВ и других ИИИ для человека в настоящее время регламентируется такими общими официальными документами как НРБ и ОСПОРБ. Требования этих документов распространяются на ИИИ, отвечающие определенным критериям, которые устанавливают самую нижнюю границу опасной (включая экологически опасной) радиоактивности. Распространяются они и на РАО.

Таковыми критериями являются:

превышение создаваемой источником индивидуальной эффективной дозы облучения лиц из населения основного предела дозы (ОПД), равного 1 мЗв в год;

превышение создаваемой источником коллективной эффективной дозы облучения лиц из населения установленной величины, равной 1 чел.-Зв в год, когда индивидуальная эффективная годовая доза облучения меньше ОПД для населения, однако превышает 10 мкЗв.

Смысл второго критерия заключается в необходимости учета экологически опасной ситуации облучения не отдельных людей, а достаточно больших групп людей (популяции).

Например, в предельном случае, когда эффективная доза облучения равна 10 мкЗв, численность облучаемых лиц должна быть не менее: $1 \text{ чел.-Зв} / 10 \text{ мкЗв} = 100 \text{ тыс. чел.}$

Критерии применяются как вместе, так и по отдельности. Они ориентированы на оценку нижней границы опасности РАО. Практически чаще используются производные критерии, основанные на оценке удельных уровней активности для РАО различных агрегатных состояний. На этот счет существуют международные рекомендации; в Российской Федерации вопрос об отнесении отходов к виду радиоактивных решается в соответствии с «Санитарными правилами обращения с радиоактивными отходами (СПОРО)». Следует лишь отметить, что эти правила не распространяются на облученное ядерное топливо и ядерные материалы, производственные отходы с повышенным содержанием природных радионуклидов, на захоронение жидких РАО в глубокие геологические горизонты.

Критерии, по которым оценивается принадлежность отходов к виду радиоактивных, установлены отдельно для газообразных, жидких и твердых отходов.

К газообразным радиоактивным отходам (ГРО) относятся газовые и воздушные смеси, содержащие радионуклиды в виде газа или аэрозольных образований, которые не могут быть использованы в хозяйственных целях и если их удельная объемная активность превышает допустимую во вдыхаемом воздухе для населения величину. Допустимые объемные активности (ДОВА) установлены для каждого радионуклида; они приводятся в таблицах НРБ (например, для плутония-239 эта величина равна $2,5 \text{ мБк/м}^3$). Следовательно, если объемная активность плутония в газовом выбросе превышает данное значение, этот выброс считается радиоактивным).

К жидким радиоактивным отходам (ЖРО) относятся не подлежащие дальнейшему использованию любые радиоактивные жидкости (растворы органических и неорганических веществ, технологические пульпы и другие сжиженные образования), если в них удельная массовая активность (УМА) радионуклидов более чем в 10 раз превышает так называемые значения уровней вмешательства (УВ). Под уровнем вмешательства понимается такое значение уровня радиационного фактора (в данном случае – удельной массовой активности), при превышении которого следует проводить определенные противорадиационные защитные мероприятия. Для гарантии безопасности величина УВ несколько меньше допустимого значения УМА. Табличные значения уровней вмешательства приводятся в нормативной литературе.

Например, для раствора плутония-239 в питьевой воде УВ равен $0,56 \text{ Бк/кг}$, и такой раствор может быть отнесен к категории ЖРО, если УМА в нем по плутонию-239 превысит $5,6 \text{ Бк/кг}$.

К твердым радиоактивным отходам (ТРО) относятся отработавшие свой ресурс радионуклидные источники; не предназначенные для дальнейшего использования радиоактивные материалы; изделия, оборудование, биологические объекты, загрязненные предметы внешней среды, отвержденные жидкие отходы, если УМА радионуклидов в таких отходах превышает значение минимально значимой удельной активности (МЗУА), установленной НРБ. Например, согласно НРБ фрагмент конструкции, содержащий плутоний – 239 (для него МЗУА равна 1 кБк/кг), может квалифицироваться как ТРО, если замер его УМА превысил эту величину.

При работах с РВ объекты ОС (в том числе оборудование, принадлежности, инструменты и т.п.) могут подвергаться опасному РЗ. Для последующего использования они должны пройти операцию дезактивации. Однако нередко дезактивация оказывается неэффективной или нецелесообразной, и от нее отказываются. При этом такие радиоактивно загрязненные предметы тоже попадают в категорию твердых РАО.

Во всех рассмотренных выше случаях общая величина активности в исследуемых отходах должна превышать минимально значимую активность (МЗА). Под МЗА понимается такая наименьшая величина активности любого ИИИ, которая считается еще опасной. Если активность меньше МЗА, с радиационной опасностью такого источника можно не считаться, она полагается пренебрежимо малой. По формальному признаку для работы с источниками, активность которых меньше МЗА, официального разрешения на их использование и работу с ними не требуется.

Следовательно, если радиоактивность каких-либо отходов меньше МЗА, они не должны считаться РАО. Для работ с источниками и РАО, активность которых превышает пороговые значения МЗА и МЗУА, требуется оформление лицензии. Табличные значения МЗА приводятся в НРБ (вместе с данными по МЗУА, о которых речь шла выше) для каждого радионуклида. Например, для плутония-239 величина МЗА равна 10 кБк .

Если в состав отходов входит не один, а несколько радионуклидов с разной активностью, их принадлежность к РАО определяется по особым правилам.

При известном радионуклидном составе в отходах они считаются радиоактивными, если сумма отношений удельной активности каждого радионуклида к соответствующей минимально значимой удельной активности для данного радионуклида превышает единицу, где суммирование производится по всем известным нуклидам, входящим в отходы.

При неизвестном радионуклидном составе твердые отходы считаются радиоактивными, если их удельная активность больше:

100 кБк/кг – для бета-излучающих радионуклидов;

10 кБк/кг – для радионуклидов, являющихся источниками альфа-излучения;

1 кБк/кг – для трансурановых радионуклидов.

Гамма-излучающие отходы неизвестного состава считаются радиоактивными, если мощность поглощенной дозы в воздухе у поверхности (0,1 м) отходов превышает 0,001 мГр/ч над фоном.

Следует также заметить, что понятие «отходы» зависит от уровня развитых технологий, т.к. со временем, обладая потенциальной потребительской ценностью, они могут выступать в роли вторичных ресурсов, и поэтому входящие в их определение слова о невозможности использования относятся к текущему времени.

Общее количество и активность РАО

Характерной особенностью РАО, представляющих экологическую значимость, является их большое количество. Поэтому массу твердых РАО принято измерять в тоннах (высокоактивных – иногда в килограммах), а жидких и газообразных – в кубометрах (жидких высокоактивных – иногда в литрах).

Примечание. В качестве примера можно привести следующие сведения: в Научном центре «Курчатовский институт» на хранении и захоронении в 1996 г. находилось 135 т твердых РАО. В это же время в НИИ атомных реакторов на глубоком захоронении было 2,1 млн. кубометров жидких РАО.

Однако массовые и объемные параметры РАО существенны только в частных случаях и обычно используются лишь при определении требований, например, к грузоподъемности средств их транспортировки, к габаритам хранилищ и т. п. Они еще ничего не говорят о радиационной опасности РАО. Поэтому массовые и объемные характеристики дополняются сведениями об их общей активности, которую в Международной системе единиц СИ принято измерять в беккерелях (Бк) или (во внесистемных единицах) в кюри (Ки): $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Иногда приводятся данные не по общей активности РАО, а по активности отдельных радионуклидов.

Удельная (массовая, объемная) активность РАО

Удельная массовая активность РАО (a_m) характеризуется величиной общей активности (A) всех радионуклидов (или активностью отдельных радионуклидов), содержащихся в единице массы РАО (m) на определенный момент времени: $a_m = A/m$. Если период полураспада радионуклида большой, время замера активности обычно не указывается.

Примечание. При этом под «массой РАО» понимается их общее количество, включающее и неактивные примеси. Например, удельная массовая активность отработанного реакторного ядерного топлива к концу срока его использования (к концу 3-го года кампании) составляет примерно 26 кКи/кг (~1ПБк/кг).

Аналогично определяется удельная объемная активность РАО (a_V) только в расчете не на единицу массы, а на единицу (V) объема (обычно в Бк/м³ для жидких или газообразных РАО): $a_V = A/V$.

Скорость спада активности РАО

Скорость спада активности РАО характеризует насколько быстро со временем уменьшается их радиационная опасность. Она определяется периодами полураспада радионуклидов, составляющих РАО, и для отдельного радионуклида описывается экспоненциальным законом с постоянной распада, являющейся табличной индивидуальной характеристикой данного радионуклида. Для смеси радионуклидов скорость спада активности описывается законом Вей-Вигнера: $a(t) = a_0 (t/t_0)^{-n}$, где $a(t)$ – активность РАО к моменту времени t ; a_0 – начальная активность в момент времени t_0 ; n – показатель скорости спада активности.

Из формулы следует: $n = \lg(a_0/a) / \lg(t/t_0)$.

Для РАО, являющихся радиоактивными продуктами аварий (РПА) взрывного типа на ядерных энергетических установках (ЯЭУ) $n = 1,2$; для аварий с продолжительным выбросом РПА (типа радиационной аварии (РА) на Чернобыльской АЭС) $n = 0,29$. Следовательно, в первом случае за счет большего содержания короткоживущих радионуклидов спад активности идет много быстрее, чем во втором случае, когда сильнее сказывается влияние дольше живущих радионуклидов (рис. 1).

Например, через промежуток времени, равный 100 единичным начальным интервалам, расчет дает в первом случае снижение активности примерно в 250 раз, а во втором случае – не более 4 раз.

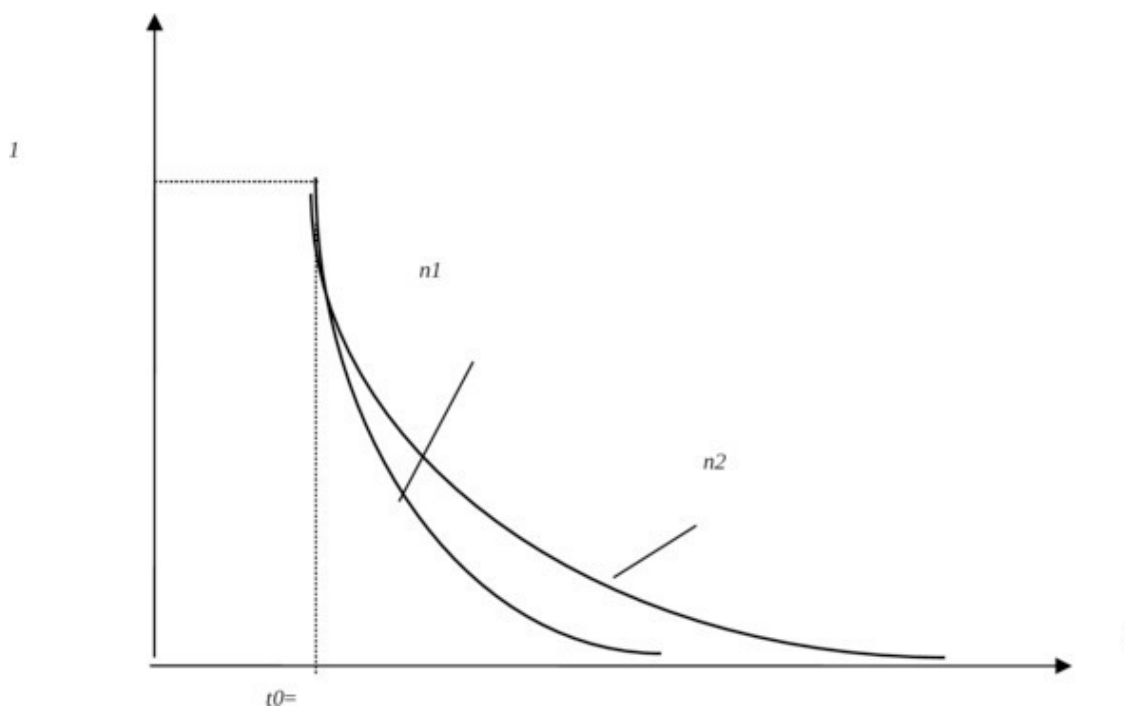


Рис.1. Изменение относительной активности РАО со временем (когда степенной показатель $n1 > n2$)

Радионуклидный состав РАО

Радионуклидный состав РАО, наряду с активностью, определяет степень их радиационной опасности, поскольку при одинаковой активности разные радионуклиды оказывают различное радиационное воздействие на организм человека.

Состав РАО может быть самым разнообразным и включать от одного радионуклида до сотен единиц. Наиболее сложным составом характеризуются РПА взрывного типа, возникающие на ЯЭУ: в этом случае в состав РАО может входить до 240 радионуклидов 35 химических элементов с самыми разными периодами полураспада от ничтожных долей секунды до миллионов лет.

С течением времени радионуклидный состав изменяется: сокращается число короткоживущих радионуклидов, все большую значимость в активности и в формировании дозы облучения приобретают долгоживущие радионуклиды. Уже через год после образования основной вклад в активность РАО дают лишь такие долгоживущие радионуклиды, как плутоний-239, уран-235, стронций-90, цезий-137.

По радионуклидному составу РАО могут быть подразделены на две группы: на трансурановые элементы и на осколки деления.

Трансурановые элементы образуются при захвате нейтронов ураном и его дочерними продуктами распада. Они могут существенно различаться по периодам полураспада: одни живут тысячи и миллионы лет, другие, как правило, недолго – от секунд до нескольких десятков лет. В силу различия в элементном составе они поддаются разделению химическим путем. По своим ядерным свойствам они близки к плутонию. Удивительного в этом ничего нет, они тоже перенасыщены нейтронами и имеют усиленную тенденцию к делению (известно, например, что критическая масса у кюрия-245 много меньше, чем у плутония-239). В принципе эти радионуклиды могут найти применение в составе ядерного топлива в реакторах на быстрых нейтронах; при ненадобности они подлежат захоронению.

Осколки деления являются обычными РАО. Их состав в определенной мере является типовым, хотя несколько зависит от вида делящихся материалов и энергии нейтронов, на которых происходит деление. Эта зависимость может быть проиллюстрирована М-образной кривой Ферми, характеризующей относительный выход определенного осколочного нуклида от массового числа M осколков деления (рис. 2). Здесь Y – выход продуктов деления (определяется отношением числа ядер данного радионуклида, образовавшихся при делении, к общему числу разделившихся ядер; обычно выражается в процентах).

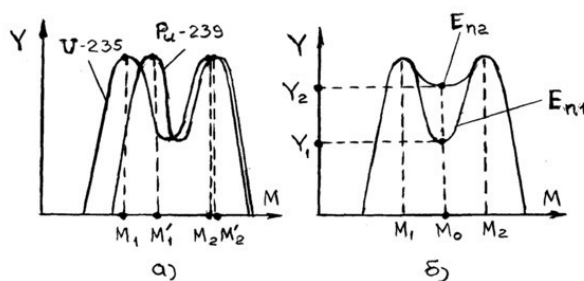


Рис. 2. Характер зависимости выхода осколков деления от их массового числа: а – для разных видов делящихся материалов; б – для нейтронов с различной энергией

Из рис. 2 следует, что наиболее заметно проявляется различие в выходе «легких» осколков (соответствующих левому пику): при делении урана-235 он располагается левее, чем при

делении плутония-239. Выход радионуклидов с массовыми числами в области «провала» М-образной кривой зависит от энергии нейтронов: с увеличением энергии нейтронов E_n , вызывающих деление, глубина «провала» уменьшается (рис.2б, где $E_{n2} > E_{n1}$) и распределение осколков по массе стремится к более симметричному.

Основные экологически значимые нуклиды РАО и их радиотоксичные характеристики рассмотрим ниже.

После выдержки осколки деления подлежат окончательному захоронению на определенный срок.

Срок захоронения РАО

Срок захоронения определяется промежутком времени от момента закладки РАО на длительное хранение (захоронение) до момента, когда активность РАО снизится до допустимой регламентированной величины. Этим параметром фактически определяется время изоляции РАО от ОС.

Необходимый срок захоронения РАО зависит от их активности и может быть оценен по формуле, следующей из закона Вей-Вигнера (4): $t_{\text{зax}} = t_0 (a_0/a_{\text{дон}})^{1/n} = t_0 (P_0/P_{\text{дон}})^{1/n}$, где a_0 – активность РАО в момент захоронения t_0 ; $a_{\text{дон}}$ допустимая величина активности к моменту окончания срока захоронения; $P_0, P_{\text{дон}}$ – мощности поглощенной дозы в воздухе над РАО в момент захоронения и к концу срока захоронения соответственно индексам, мкГр/ч; n – показатель скорости спада активности.

Например, если мощность дозы $P_0 = 500 \text{ мГр/ч}$ на время $t_0 = 1 \text{ ч}$, то при $P_{\text{дон}} = 0,1 \text{ мкГр/ч}$ с учетом $n = 1,2$ получим: $t_{\text{зax}} = 1 (500 \text{ мГр/ч} / 0,1 \text{ мкГр/ч})^{1/1,2} = 3,63 \times 10^5 \text{ ч} = 41,5 \text{ лет}$.

Срок захоронения РАО во Франции, Швеции и ряде других стран принят равным 50 годам, в России – до 10 лет.

Классификация РАО

По своему агрегатному состоянию, как отмечалось, РАО подразделяются на три вида: на твердые, жидкие и газообразные. Наиболее распространенными и экологически значимыми являются жидкие и твердые (в том числе жидкие, отвержденные) отходы.

В настоящее время согласно ОСПОРБ в основу классификации РАО всех видов положено их разделение на категории по степени радиационной опасности, которая, в свою очередь, характеризуются уровнем удельной активности РАО.

По данному критерию все РАО подразделяются на три категории: низкоактивные, среднеактивные и, самые опасные, – высокоактивные.

Классификация жидких и твердых РАО по удельной массовой активности с учетом вида радионуклидов и испускаемого ими доминирующего ИИ представлена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация жидких и твердых РАО по удельной радиоактивности

Категория отходов	Удельная активность, кБк / кг		
	Бета-излучающие радионуклиды	Альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	102...103	101...102	1...101
Среднеактивные	103...107	102...106	101...105
Высокоактивные	>107	>106	>105

В случае, когда по приведенным в табл. 1 характеристикам радионуклидов отходы относятся к разным категориям, для них устанавливается наиболее высокое значение категории отходов.

Для предварительной сортировки твердых РАО рекомендуется использовать критерии по уровню радиоактивного загрязнения (табл. 2).

Таблица 2

Классификация твердых РАО по уровню радиоактивного загрязнения

Категория отходов	Уровень радиоактивного загрязнения, част./ (см ² ·мин)		
	Бета-излучающие радионуклиды	Альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	5 · 102...104	5 · 101...103	5...102
Среднеактивные	104...107	103...106	102...105
Высокоактивные	>107	>106	>105

Для РАО с гамма-излучающими радионуклидами классификация производится по мощности поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе на расстоянии 0,1 м от поверхности отходов.

Если мощность дозы лежит в диапазоне от 0,001 до 0,3 мГр/ч, отходы относятся к категории низкоактивных. Для среднеактивных отходов определен диапазон от 0,3 до 10 мГр/ч. Когда мощность дозы превышает 10 мГр/ч, отходы классифицируются как высокоактивные.

Классификация газообразных РАО производится по удельной объемной активности. К низкоактивным относятся ГРО, у которых удельная объемная активность менее 3,7 Бк/м³. Среднеактивными считаются ГРО, у которых удельная объемная активность лежит в диапазоне от 3,7 до 3,7·10⁴ Бк/м³. Если удельная объемная активность ГРО превышает 3,7·10⁴ Бк/м³, они относятся к высокоактивным.

Важным моментом классификации РАО является период полураспада входящих в них радионуклидов. По этому признаку они разделяются на отходы с короткоживущими (период полураспада меньше нескольких лет) и долгоживущими радионуклидами. Это в значительной степени влияет на технологии их хранения и захоронения. Иногда выделяются не две, а три группы РАО по периоду полураспада радионуклидов: группу РАО с короткоживущими радионуклидами (период полураспада менее одного года), группу РАО со среднеживущими радионуклидами (период полураспада от года до 100 лет) и группу РАО с долгоживущими радионуклидами (период полураспада у которых равен 100 и более лет).

Согласно ОСПОРБ отходы с короткоживущими радионуклидами подразделяются на две подгруппы: РАО с радионуклидами, период полураспада у которых не превышает 15 суток (включительно), и подгруппу, период полураспада радионуклидов которой превышает 15 сут. Обращение с отходами этих подгрупп производится по разным правилам.

ИСТОЧНИКИ ОБРАЗОВАНИЯ РАО

Общая характеристика источников образования РАО

Как отмечалось, одной из экологических особенностей проблемы РАО является многообразие источников их образования, что в значительной мере предопределяет масштабность проблемы. РАО образуются при эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов ЯТЦ, атомных электростанций, судов с ядерными энергетическими установками и иными радиационными источниками; при использовании РВ в производственных, научных организациях и медицине; при реабилитации территорий, загрязненных РВ, а также при радиационных авариях. По своей экологической значимости наиболее существенную роль в РЗ ОС имеют следующие источники РАО:

- ядерные реакторы как источники реакторных РАО;
- предприятия горнодобывающей и обрабатывающей урановой промышленности;
- ядерное оружие как источник оружейных РАО;
- ядерные испытания и радиационные аварии;
- другие источники.

К категории «другие источники» могут быть отнесены отработавшие свой срок радионуклидные источники целевого назначения: градуировочные и контрольные ИИИ, использованные в системе технического обслуживания и при эксплуатации радиационных приборов, медицинские источники и радиоактивные препараты, радиоактивно зараженные объекты биологической природы, источники промышленной дефектоскопии, сельскохозяйственного предназначения, пожарной сигнализации и т. п.

Примечание. В качестве одного из примеров опасности РАО подобного типа можно привести случай массового облучения населения в городе Гояния (Бразилия, 1987 г.), когда в результате небрежного хранения медицинский цезиевый источник активностью 51,8 ТБк был выброшен на свалку и найден местными жителями как металлолом. Когда вскрыли свинцовый контейнер, внутри обнаружили «светящийся голубой порошок», который дети и взрослые стали наносить на свое тело. От него тело начинало светиться и искриться. Чудесный порошок раздавали друзьям и знакомым, он беспрепятственно распространялся по городу в течение недели. Лишь когда обратились в клинику и поставили диагноз лучевой болезни, была поднята тревога. Пострадали 244 человека, у 9 из них дозы внешнего облучения превысили 5 Гр, у 5 развилась ОЛБ тяжелой степени. Внешнее облучение сопровождалось внутренним облучением и кожными поражениями.

К этой же категории могут быть отнесены атомные энергетические установки (АЭУ) радионуклидного типа. Работа АЭУ радионуклидного типа основана на использовании тепловой энергии, выделяющейся при распаде радиоактивных нуклидов, имеющих, как правило, достаточно длительный период полураспада и высокое удельное энерговыделение. В этих целях обычно используются плутоний-238, полоний-210 и др. Такие АЭУ удобно применять на космических аппаратах для решения задач обеспечения электропитанием аппаратуры спутников. В этом случае масса радионуклидных АЭУ не выходит за пределы нескольких десятков килограммов.

Примечание. В 1964 г. широкий общественный резонанс вызвал случай РЗ атмосферы из-за аварии советского метеорологического спутника над Канадой, в результате которой

он сгорел и в воздух было выброшено около 600 ТБк плутония-238, входившего в состав бортового генератора электроэнергии. В 1970 г. такого же рода аварийное устройство вошло в атмосферу без разрушения и упало в Тихий океан. Еще один генератор после взрыва упал в воду вблизи Калифорнии в 1986 г.

Основная масса РАО образуется при эксплуатации ядерных реакторов и получении ядерного топлива для их работы. Всего больше (по количеству) получается РАО на начальных стадиях ядерного топливного цикла; основная величина активности РАО формируется на стадии сжигания ядерного топлива в реакторе.

Под ядерным топливным циклом (ЯТЦ) понимается вся совокупность повторяющихся производственных процессов с урановым топливом, начиная с добычи урановой руды и кончая (после использования урана) переработкой или захоронением его РАО. Промежуточными стадиями ЯТЦ являются: изготовление уранового концентрата (в форме октооксида урана U_3O_8 или диураната натрия $Na_2U_2O_7$); конверсия этого концентрата (производство гексафторида урана UF_6 и его обогащение ураном-235); непосредственное изготовление ядерного топлива, его сжигание в реакторах с целью производства тепловой и электрической энергии; переработка отработанного топлива и обращение его в РАО. РАО практически получаются на всех стадиях указанного ЯТЦ.

Всего на отходы ЯТЦ приходится до 99,9% общего количества образующихся РАО и именно они вызывают наибольшую озабоченность общества.

Ядерные реакторы как источник образования РАО

Ядерным реактором называется устройство, в котором осуществляется контролируемая самоподдерживающаяся цепная реакция деления атомных ядер некоторых тяжелых элементов под действием нейтронов. В результате данной реакции выделяется ядерная энергия. Эта энергия преобразуется в другие виды (сначала в тепловую, затем в механическую, электрическую и др.), которые и используются в практических целях.

Исходным ядерным топливом для работы ядерных реакторов является природный уран, обогащенный одним из изотопов урана, а именно – ураном-235. Самоподдерживающаяся реакция деления происходит только в уране-235. Ядро урана-235 распадается под действием поглощенного нейтрона, в результате чего образуются два – три новых нейтрона, продолжающих реакцию. Однако естественное содержание урана-235 в природном уране (0,71% по массе) мало и не достаточно для развития цепной реакции. Только при увеличении этого содержания (обогащении) до определенного уровня (более 2 – 3%) создаются условия для начала реакции, ее развития и выделения ядерной энергии.

Вместе с тем по мере работы реактора количество урана в нем уменьшается, качество ядерного топлива ухудшается за счет его загрязнения продуктами деления, в том числе радиоактивными.

Примечание. Оценки показывают, что в ядерном реакторе мощностью 1 МВт ежедневно расщепляется около 100 г делящихся материалов; столько же образуется радиоактивных продуктов деления (РПД), в том числе около 740 ПБк (20 МКи) радионуклида йод-131, 440 ПБк (12 МКи) инертных радиоактивных газов и 7,4 ПБк (0,2 МКи) стронция-90. При этом на газообразную форму приходится около 20% РПД, из которых примерно 0,1 – 1% попадает в ОС.

При этом возрастают потери нейтронов, эффективность процессов деления ядер урана и энергоотдачи реактора в целом падает. Поэтому через определенное время ядерное топ-

ливо подлежит замене. В среднем ежегодно необходимо менять примерно одну третью часть общего количества ядерного топлива реактора (то есть полная замена должна идти через 3 – 4 года). Извлеченная из реактора остаточная часть отработавшего ядерного топлива и составляет основу реакторных РАО. Конечно, стремятся к тому, чтобы она была возможно меньшей, но пока она является неизбежной.

Таким образом, основным видом реакторных РАО является ОЯТ, обладающее огромной активностью и высокой радиационной опасностью. В реакторах, работающих по схеме открытого (разомкнутого) ЯТЦ, отработавшее ядерное топливо вместе с остаточнымиделяющимися материалами исключаются из дальнейшего использования и подлежат хранению или захоронению как РАО. Поэтому разомкнутый ЯТЦ характеризуется низкой эффективностью использования природного урана (до 1%).

Однако, как отмечалось, безоговорочно относить ОЯТ к категории РАО нельзя. Оно содержит «невыгоревший» уран, накопленный плутоний и многие другие полезные компоненты. Возможность повышения эффективности использования урана и вовлечения в ЯТЦ плутония как нового энергоносителя являются основными аргументами в пользу закрытого (замкнутого) цикла. В реакторах, работающих по схеме закрытого ЯТЦ, отработавшее топливо поступает на переработку для повторного использования. В этом случае оно уже не является РАО.

Переработка ОЯТ обходится дорого и связана с большими трудностями, необходимостью его длительной выдержки для заданного спада активности, с повышенной радиационной опасностью технологических процессов. Кроме того, при радиохимической переработке ОЯТ происходит образование огромного количества РАО. Поэтому в разных странах выбор схемы ЯТЦ решается по-разному. Следовательно, по-разному решается и вопрос о том, является ли ОЯТ отходом.

Примечание. Так, в США, Бельгии, Канаде, Швеции и многих других странах принята схема открытого ЯТЦ, в России, Франции, Великобритании, Японии и др. – закрытого ЯТЦ. Лишь 5 государств (Индия, Япония, Великобритания, Россия, Франция) перерабатывают (или намереваются перерабатывать) ОЯТ на своих предприятиях. Большинство же стран предпочитают либо хранить ОЯТ, пока не будет найден эффективный метод его переработки, либо передают ОЯТ на переработку другим странам.

Конструктивно урановое ядерное топливо размещается в герметичных тонкостенных цилиндрах. Поскольку обычно используемая часть ядерной энергии в реакторе выделяется в тепловом виде, цилиндры с ядерным топливом называются тепловыделяющими элементами (ТВЭЛами). Совокупность объединенных ТВЭЛов называется тепловыделяющей сборкой (ТВС). В состав ТВС может входить до 120 – 320 ТВЭЛов в зависимости от типа реактора. Таким образом, непосредственными носителями реакторных РАО оказываются отработавшие свой срок ТВЭЛы и ТВС (рис. 3).

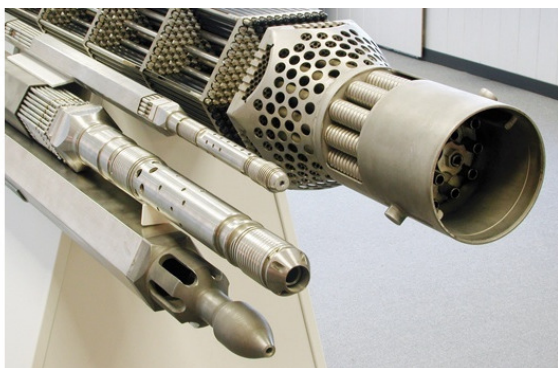


Рис. 3. ТВЭЛ и ТВС

Вторым источником реакторных РАО являются газо-аэрозольные выбросы радионуклидов в атмосферу (жидкие сбросы в водоемы), образование которых возможно при неисправностях системы теплоотбора и теплоотвода реакторов.

При нормальном режиме работы реактора, т.е. пока обеспечивается достаточный теплосъем с ТВЭЛов, накапливаемые в них продукты деления (в том числе газообразные) надежно удерживаются внутри этих элементов. Однако, следует иметь в виду, что эксплуатация ТВЭЛов протекает в очень жестких условиях: при повышенном давлении образующихся газов, при высокой температуре, которая во внутренней области достигает 2000°C , а на поверхности – $350 - 500^{\circ}\text{C}$. При этом допускается определенная конструктивная газовая негерметичность оболочек ТВЭЛов (в реакторах типа ВВЭР – до 1%, а степень негерметичности, при которой возможен прямой контакт теплоносителя с делящимся материалом, до 0,1%). Для реакторов типа РБМК эти коэффициенты на порядок меньше.

За счет наведенной активности под воздействием нейтронов, при неисправности оболочек ТВЭЛов (утрате их герметичности), трубопроводов и вентилях системы теплосъема может происходить РЗ теплоносителя и воздуха. На этот случай предусмотрена многоступенчатая фильтрация воздуха и его выброс в ОС. Фильтроматериалы включаются в состав твердых РАО, радиоактивные выбросы формируют газовую составляющую реакторных отходов.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.