

УДК 614.841.4:621.039

Исследования и разработки в области безопасности тритиевых технологий

**Л. Ф. Беловодский, В. Г. Киселёв, М. С. Панюшкин,
Л. К. Поротников**

Всероссийский НИИ Автоматики им. Н. Л. Духова, г. Москва, Россия
vniia4@vniia.ru

Рассмотрены проблемы выбросов техногенного трития в окружающую среду в результате аварий. Особое внимание обращено на пути воздействия трития на человеческий организм и опасности органически связанного трития. Даны классификация и категорирование радиационных аварий. Большая часть статьи посвящена методам ликвидации последствий аварий, мер безопасности в процессе ликвидации, техническому и приборному оснащению ликвидаторов. Материал статьи может быть полезен специалистам в области радиационной безопасности.

Потенциальные источники поступления техногенного трития в окружающую среду при аварии

Основными видами деятельности человека, при которых в обращении находятся значительные количества трития, являются:

- разработка и производство ядерного оружия [1];
- производство электроэнергии на атомных электростанциях (АЭС) (как побочный продукт) и переработка облученного топлива на радиохимических заводах [2, 3];
- научные исследования в области термоядерного синтеза. Перспектива создания термоядерного реактора привела к интенсификации научных исследований и созданию различных установок, на которых отрабатываются технологическое оборудование для работ с тритием [4], моделируются процессы взаимодействия трития с конструкционными материалами [5], исследуется поведение трития в окружающей среде [6] и др.;
- научные исследования:

- заполнение микромишеней для термоядерного синтеза с лазерным удержанием дейтерий-тритиевой смеси [7];
- создание оборудования и проведение исследований мюонного катализа при высоких давлениях и температурах изотопов водорода [8–11];
- создание твердотельных мишеней нейтронных генераторов [12];
- использование трития в фундаментальной науке (поиск магнитного момента [13] и массы [14] нейтрино, исследование нейтронно-избыточных ядер на границе нейтронной стабильности [15, 16] и др. [11, 16]);
- научные исследования и эксплуатация установок по извлечению и локализации трития из жидких и газообразных сбросов. Эта проблема актуальна в любой сфере деятельности, где приходится сталкиваться с большими количествами трития [11, 17, 18].

Незначительные количества трития используются также в научных исследованиях, где тритий используется в качестве изотопной метки (медицина, биология, физика, химия).

Виды деятельности и количества трития, находящегося в обращении представлены в табл. 1.

Таблица 1

Образование техногенного трития

Источник образования техногенного трития	Вид деятельности	Количество трития в работе	Примечание
1	2	3	4
Ядерные реакторы АЭС: тяжеловодный реактор (мощностью 3 ГВт)	Производство электроэнергии	26000 ТБк/год (~73 /год)	Остается в топливе [2] 95–99 %Т диффундирует в теплоноситель [2] Концентрация трития в воде 0,4 ТБк/л (11 Ки/л) [2]
реактор другого типа (мощность 3ГВт) – в топливе:		5550–22200 ТБк/год (0,15–0,60 МКи/год)	
РБН		55–115 ТБк/т (1,5–3,1кКи/т)	
ВВЭР и РМБК – в теплоносителе (H ₂ O, D ₂ O, He) и замедлителе (графит, D ₂ O): гелиевый теплоноситель; тяжеловодный реактор		26 ТБк/т (7,0кКи/т) 2100 ТБк/ГВт(э) (5,9 г/ГВт(э)) 2,2·10 ⁴ ТБк/ГВт(э) (62 г/ГВт(э))	

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Ядерные реакторы с каскадом термодиффузионных колонн	Производство трития и его конечное концентрирование для военного и мирного использования	$4,4 \cdot 10^8$ Бк/сут ($1,2 \cdot 10^{-2}$ Ки/сут) на 1 МВт тепловой мощности	[3]
Заводы по переработке облученного топлива	Переработка отработавших ТВЭЛов	$4 \cdot 10^4$ ТБк/год (110 г/год) для завода производительностью 1500 т/год	[2]
Заводы ядерного оружейного комплекса	Производство ядерных боеприпасов	$1,6 \cdot 10^8$ ТБк (450 кг) поступило в атмосферу в результате испытаний ядерного оружия	[1,3]
Korea Hydro & Nuclear Power (Южная Корея)	Очистка теплоносителя CANDU реакторов	259 ПБк/год (728 г/год)	[19]
Научные центры и лаборатории:			
LANL's Weapons Engineering Tritium Facility (WETF)	Исследования в интересах военных программ США	Категория опасности ядерных установок 2, более 30 г [20]	[21]
Savannah River National Laboratory (SRNL)	Извлечение трития из литиевых сборок, изготовление тритиевых компонент для ядерных боеголовок, исследования в интересах военных и мирных программ США	1,5–2 кг [1]	[22]
Tritium Laboratory, Karlsruhe – TLK (Германия)	Исследования по термоядерному синтезу, эксперимент KATRIN [14]	$1,4 \cdot 10^4$ ТБк (40 г)	[23]
Chalk River Nuclear Laboratory, Ontario (Канада)	Поставка трития заказчикам, исследования систем газоочистки, создание тритиевых батареек и др.	$3,6 \cdot 10^4$ ТБк (100 г)	[24]
РФЯЦ, Саров (Россия)	Моделирование топливного цикла ИТЭР	$3,6 \cdot 10^4$ ТБк (100 г)	[25]

Анализ данных, приведенных в табл. 1, а также информация о количестве трития доступного для термоядерных реакторов [26], позволяют сделать вывод, что в обращении находятся (10–30) кг трития. Тритий присутствует как в газовых смесях, так и в жидких сбросах. В случае разгерметизации установок и трубопроводов большая часть трития окажется в рабочем помещении. Для сбора жидких отходов в случае аварии обычно предусматриваются специальные емкости. Для удаления газообразного трития предусматривается мощная вентиляция. При работающей вентиляции основная масса выделившегося трития (90 %) удаляется из помещения, обеспечивая безопасный доступ персонала в рабочее помещение.

2. Факторы опасности при авариях с тритием

Специфика в организации безопасности работ с тритием и его соединениями обусловлена физико-химическими свойствами этого радионуклида.

Тритий (Т, НТ, ДТ) – радиоактивный изотоп водорода – является чистым бета излучателем со средней энергией β -частицы $\bar{E}_\beta=5,6$ кэВ (максимальная энергия β -частицы $E_{\beta_{\max}} = 18,6$ кэВ). В нормальных условиях тритий – это газ, поэтому он легко проникает через герметизирующие барьеры технологического оборудования (металлы, стекло, пластмассы, резины). Кроме того, при наличии кислорода и влаги, тритий окисляется до НТО или Т₂О (тритиевая вода) под действием собственного излучения [3].

Бета-частицы трития полностью поглощаются роговыми слоями кожи, поэтому внешнее облучение организма излучением трития и его соединений не представляет опасности. Следовательно, нет необходимости в специальной защите от излучения при работе с тритием и его соединениями. Однако попадание трития в организм представляет опасность, поэтому необходимо защищать персонал от попадания внутрь организма самого трития, его оксида (паров НТО) и тритийсодержащих аэрозолей [3].

Тритий, его оксид и аэрозоли могут поступать в организм с загрязненным воздухом через органы дыхания (ингаляционным путем), с питьевой водой и пищей (через желудочно-кишечный тракт), а также через кожу тела (перкутанно).

Тритий считается радионуклидом низкой токсичности. Экспериментально определенная по многим тестам относительная биологическая эффективность (ОБЭ) излучения трития лежит в пределах 0,7–2,4 [27].

Из-за низкой растворимости газообразного трития (НТ, ДТ, Т₂) в жидкой фазе организма обычно считают, что его оксид (НТО) представляет большую биологическую опасность, чем (газообразный) тритий.

Опасность газообразного трития в 10000 раз меньше опасности оксида. Только незначительная доля газообразного трития (0,04–0,10 %) задержива-

ется в организме вследствие непосредственного растворения и биологического окисления. При вдыхании же оксида трития организмом усваивается (в легких) до 100 % оксида [27].

При поступлении через желудочно-кишечный тракт НТО также практически полностью задерживается в организме [27].

Скорость поступления НТО в организм через кожный покров близка к его скорости поступления через легкие [27].

При поступлении трития и НТО в организм происходит изотопный обмен радионуклида с водородом, входящим в органические структуры. Доля обменивающегося с водородом трития составляет 0,5–4,0 %. Однако при хроническом поступлении трития эта доля может достигать 10 % [27].

Хроническое поступление трития в форме НТО в организм приводит к внедрению его в органические структуры. Данные, полученные по результатам анализа тканей 52 оленей (сердце, печень, почки, селезенка, мозг, мышцы), свидетельствуют о том, что отношение количества атомов трития к атомам H_2 как в жидкой фазе, так и в сухой ткани есть постоянная величина. Включение трития в органические молекулы приводит к тому, что фактическая доза облучения, получаемая организмом, увеличивается в 1,4–1,5 раза по сравнению с дозой, обусловленной тритием в жидкой фазе организма [3].

Наличие связанного тканями трития (ОСТ – органически связанного трития) приводит к тому, что выведение его из организма описывается функцией не с одним, а с тремя экспоненциальными участками. Вначале происходит интенсивное выведение трития ($T_{эф} \sim 10$ суток), которое связано с водным обменом организма. Скорость выведения ОСТ зависит от вида органа и ткани, эффективный период полувыведения превышает 5 лет [28]. В [28] описаны два случая, в которых наблюдали средний и длительный периоды полувыведения трития. В одном случае периоды равнялись 21 и 280 суткам, а в другом – 33 и 2020. По данным [29] ОСТ выводится с периодами полувыведения 550 и 2020 суток. По данным [30], длительный период полувыведения равен 230–255 суткам.

Помимо действия β -излучения трития, которое поглощается тканью тела в локализованной области, превращение трития в гелий-3 также может приводить к биологическим эффектам.

По мере развития атомной промышленности и изучения биологического действия трития и его соединений изменялись и нормы радиационной безопасности (табл. 2), и основные дозовые пределы облучения работников (табл. 3).

Классы работ с тритием представлены в табл. 4.

Таблица 2

Эволюция норм радиационной безопасности по тритию

Радионуклид	Дозовый коэффициент, Зв/Бк	Предел годового поступления ПГП перс.,	Допустимая среднегодовая объемная активность ДОО перс.	Источник
Тритий	–		$2,0 \cdot 10^{-8}$ Ки/л ($7,4 \cdot 10^5$ Бк/м ³)	[31]
Тритий-газ	–	$4,8 \cdot 10^5$ мкКи/год ($1,78 \cdot 10^{10}$ Бк/год)	$2,0 \cdot 10^{-6}$ Ки/л ($7,4 \cdot 10^7$ Бк/м ³)	[32]
НТО или T ₂ O		$1,2 \cdot 10^3$ мкКи/год ($0,44 \cdot 10^8$ Бк/год)	$4,8 \cdot 10^{-9}$ Ки/л ($1,78 \cdot 10^5$ Бк/м ³)	
Газ НТО или T ₂ O	–	$4,8 \cdot 10^5$ мкКи/год ($1,78 \cdot 10^{10}$ Бк/год)	$2,0 \cdot 10^{-6}$ Ки/л ($7,4 \cdot 10^7$ Бк/м ³)	[33]
		($0,44 \cdot 10^8$ Бк/год)	$4,8 \cdot 10^{-9}$ Ки/л ($1,78 \cdot 10^5$ Бк/м ³)	
Оксид (НТО, DTO, T ₂ O)	–	$2,0 \cdot 10^4$ мкКи/год ($7,4 \cdot 10^8$ Бк/год)	$1,0 \cdot 10^{-8}$ Ки/л ($3,7 \cdot 10^5$ Бк/м ³),	[34]
Газ (ТН, TD, T ₂)		$1,5 \cdot 10^8$ мкКи/год ($8,32 \cdot 10^{10}$ Бк/год)	$6,0 \cdot 10^{-5}$ Ки/л ($2,22 \cdot 10^9$ Бк/м ³)	
Пары тритированной воды НТО, DTO, T ₂ O	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^9$ Бк/год	$4,4 \cdot 10^5$ Бк/м ³	[35, 36]
Газ (НТ, DT, T ₂)	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$1,1 \cdot 10^{13}$ Бк/год	$4,4 \cdot 10^9$ Бк/м ³	
Тритированный метан	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{11}$ Бк/год	$4,4 \cdot 10^7$ Бк/м ³	

Таблица 3

Эволюция основных дозовых пределов облучения для профессиональных работников в СССР/России

Дата утверждения документа, №№	Наименование документа	Дозовые пределы
24.08.1948	Общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих на объектах А и Б	0,1 Р/день (30 Р/год) при аварии – 25 Р за 15 мин
10.02.1950	Временные общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих с РВ	30 Р/год при аварии – 25 Р за 15 мин
11.04.1954	Санитарные нормы проектирования предприятий и лабораторий	15 Р/год (0,05 Р/день) при аварии – 25 Р за 15 мин
25.06.1960	Санитарные правила работы с РВ и ИИИ	5 бэр/год (100 мбэр/нед.) при аварии 25 бэр/год
25.08.1969	Нормы радиационной безопасности (НРБ-69)	5 бэр/год (3 бэр/кв.) при ликвидации аварии – 25 бэр
07.06.1976	Нормы радиационной безопасности (НРБ-76, НРБ-76/87)	5 бэр/год при ликвидации аварии – 25 бэр
09.01.1996 № 3-ФЗ	Закон о радиационной безопасности населения	0,02 Зв/год средняя за 5 лет (max 0,05 Зв/год) при ликвидации аварии – 0,2 Зв
19.04.1996 ГН2.6.1-054-96	Нормы радиационной безопасности (НРБ-96, НРБ-99/2009)	20 мЗв/год средняя за 5 лет (max. 50 мЗв/год) при ликвидации аварии – 200 мЗв

Таблица 4

Классы работ с тритием

Класс работ	Суммарная активность трития и его соединений на рабочем месте, Бк (Ки)
I класс	более 10^{14} ($2,67 \cdot 10^3$)
II класс	от 10^{11} до 10^{14} ($2,67 - 2,67 \cdot 10^3$)
III класс	от 10^9 до 10^{11} ($2,67 \cdot 10^{-2} - 2,67$)

При хранении трития в хранилищах (складах) внутри контейнеров допускается увеличение активности в 100 раз. Значения дозовых коэффициентов, пределов годового поступления с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности в воздухе производственных помещений трития для персонала группы А представлены в табл. 5.

Таблица 5

Дозовые пределы поступления трития для персонала группы А

Вид соединений трития	Дозовый коэффициент при поступлении с воздухом $\epsilon_{\text{перс}}$, Зв/Бк	Предел годового поступления ПП перс., Бк/год	Допустимая среднегодовая активность в воздухе ДОО перс., Бк/м ³
Пары тритированной воды, НТО, DTO, T ₂ O, Г1*	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^9$	$4,4 \cdot 10^5$
Газообразный тритий (HT, DT, T ₂), Г2*	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$4,4 \cdot 10^9$
Тритированный метан (CH ₃ T), Г3*	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$4,4 \cdot 10^7$
Тритид лития			$1,9 \cdot 10^5$
Тритид урана			$3,7 \cdot 10^6$
Тритиды титана, итрия, лантана, гадолиния, гольмия, эрбия			$3,7 \cdot 10^3$

*СанПиН 2.6.1.2523-09 НРБ-99/2009 [45]; Г1 – НТО, Г2 – T₂, Г3 – тритированный метан.

Прогресс в области физико-математического моделирования стимулировал попытки создать модели поведения трития в объектах окружающей среды [37–39]. Для этих целей в МАГАТЭ была создана тритиевая рабочая группа BIOMASS (Biosphere Modelling and Assessment), в которую вошли представители России, США, ФРГ, Франции, Великобритании и др. Эта группа разработала типовые модели поведения трития в объектах окружающей среды на основе экспериментальных данных, представленных странами-участниками группы.

Аварийные ситуации с тритием и их последствия рассмотрены в работах [40–45]. Величины аварийных выбросов трития представлены в табл. 6.

Тритий, оказавшийся в окружающей среде, поступает в звенья экологической системы (почвенная вода – растительность – животное – человек). При этом количество выбрасываемого в окружающую среду трития – основной фактор, определяющий его содержание в звеньях экологической системы. Между тритием в форме оксида (НТО) и другими звеньями экологической системы достаточно быстро устанавливается равновесие [46]. Поэтому кон-

центрация трития в любом звене экологической системы не превышает его содержания в воде. Пары НТО поглощаются почвой лучше, чем газообразный тритий. Скорость осаждения НТО на почву составляет 0,35 см/с и практически на порядок превышает скорость осаждения газообразного трития. Газообразный тритий в почве практически мгновенно превращается в оксид за счет каталитического действия микроорганизмов в почве [46]. Упрощенные пути воздействия на человека выброшенных в атмосферу радиоактивных веществ показаны на рис. 1.

Таблица 6

Аварийные выбросы трития

Место аварии	Тип аварии	Последствия аварии
1. Завод Саванна Ривер, США, 1974 г.	Выброс трития в атмосферу $5,1 \cdot 10^5 \text{Ки}$	
2. Завод Саванна Ривер, США, 1975 г.	Выброс трития в атмосферу $4,8 \cdot 10^5 \text{Ки}$	
3. Завод Саванна Ривер, США, 1984 г.	Выброс трития в атмосферу $5,1 \cdot 10^5 \text{Ки}$	Доза на границе завода 0,06 мбэр
4. Завод Саванна Ривер, США, 1983 г.	Выброс трития в атмосферу $5,1 \cdot 10^5 \text{Ки}$	Доза на границе завода 0,04 мбэр
5. Завод ВНИИЭФ, СССР, 1967 г.	Выброс трития в атмосферу $8,0 \cdot 10^4 \text{Ки}$	Доза на границе завода 250 мбэр*
6. Ливерморская лаборатория, США, 1970 г.	Выброс трития в атмосферу $2,9 \cdot 10^5 \text{Ки}$	
7. ИТЭР, Кадараш, Франция (прогноз)	Выброс трития в атмосферу $5,0 \cdot 10^5 \text{Ки}$	
8. Ядерная лаборатория Чак Ривер, Онтарио, Канада, 1988 г.	Разлив тяжелой воды в фундаменте реактора 4000 кг	Вода загрязнена тритием
9. Завод Саванна Ривер, США, 1989 г.	Выделение трития из первичной системы охлаждения во вторичную и сброс в реку	Во вторичной системе содержание трития в сотни раз выше нормы

* – выброс трития в форме оксида (НТО).

Удаление НТО из почвы происходит вследствие испарения. Наиболее быстрое удаление НТО наблюдается в первые несколько суток после осаждения (от 1 до 18 % в час при температуре 20 °С в зависимости от типа почвы и влажности воздуха [46]). В дальнейшем интенсивность удаления уменьшается до 0,25...1,5 % в час в связи с заглублением НТО в почву. В период быстрого выведения НТО в основном находится в верхнем 10-сантиметровом слое почвы. Характерное проникновение НТО на глубину 10...15 см составит более 100 час. Период полувыведения НТО в начальный момент, в зависимости от влажности и водного режима почвы изменяется от 7,4 до 27 суток. В этот период из почвы выводится до 80 % НТО. Для оставшихся 20 % НТО характерный период полувыведения составляет 27 месяцев [37]. Более 50 % НТО поглощается на расстоянии до 1000 км от источника выброса и кинетика процессов обмена почва – воздух должна заметно влиять на содержание НТО

в воздухе на расстоянии 100...1000 км. Вблизи источника выброса загрязнение сельскохозяйственных растений и водоемов может оказаться значительным. При осаднении НТО в водоемах происходит ее быстрое разбавление, и удельная концентрация НТО в парах воды из водоемов уменьшается, поэтому вторичного загрязнения воздуха практически не происходит [41]. На рис. 2 показаны упрощенные пути воздействия на человека радиоактивных веществ, сбрасываемых в грунтовые и поверхностные воды.

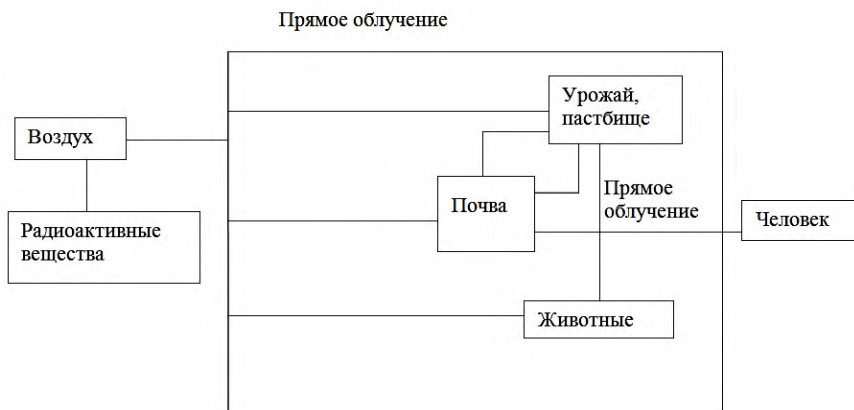


Рис. 1. Упрощенные пути воздействия на человека выброшенных в атмосферу радиоактивных веществ

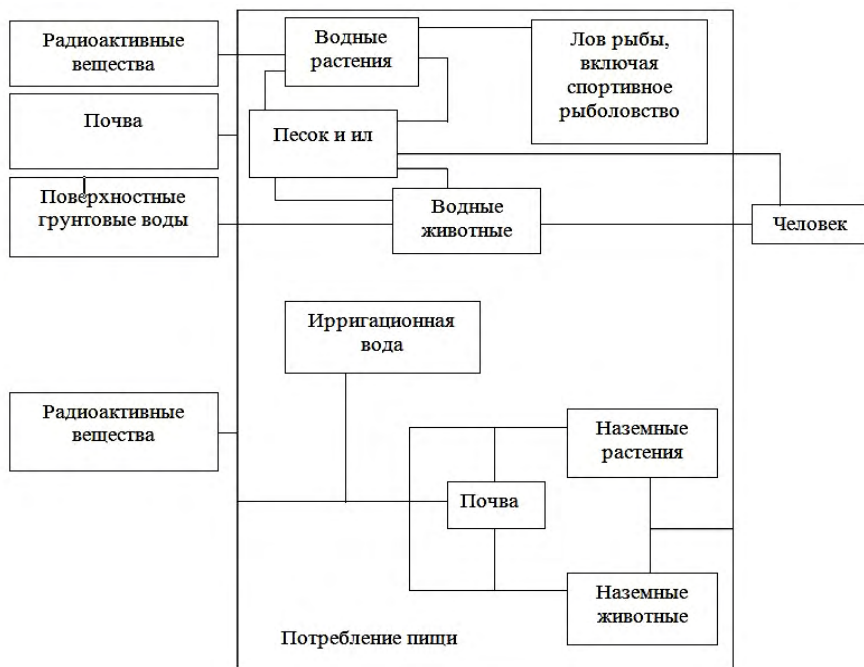


Рис. 2. Упрощенные пути воздействия на человека радиоактивных веществ, сбрасываемых в грунтовые воды и поверхностные воды

Радиоактивные вещества, выбрасываемые в окружающую среду, привлекаются в сложные серии физических, химических и биологических процессов [47–49]. Некоторые из этих процессов приводят к существенному разбавлению, а другие – к физическому или биологическому повторному концентрированию в результате переноса радионуклидов по различным и отчасти независимым путям, ведущим к человеку.

Из представленных путей воздействия на человека выброшенных (сброшенных) в окружающую среду радиоактивных веществ видно, что дозобразующими факторами являются внешнее (прямое) облучение и внутреннее (применительно к НТО) за счет вдыхания (ингаляция) и потребления загрязненной воды и пищи.

Любые выбросы радиоактивных веществ в окружающую среду можно разделить на 4 категории [28]. Во-первых, различают планируемые и непланируемые выбросы. Планируемые выбросы ограничены и устанавливаются из непревышения доз облучения населения с учетом всех путей воздействия радионуклидов на человека [29].

Непланируемые выбросы учитываются при составлении аварийных планов и могут приводить к превышению пределов доз, установленных для населения.

С 1944 по 1988 гг. на предприятиях, занятых работами с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, произошло 296 аварий, сопровождавшихся выбросами радиоактивных веществ [46], в том числе три аварии, связанные с выходом трития (табл. 7).

Таблица 7

Классификация атомных аварий по типу в период 1944–1988 гг.

1. Критическое состояние	
1.1. Критическое состояние агрегатов	5
1.2. Реакторов	8
1.3. Химических процессов	5
2. Источники излучения	131
2.1. Закрытые источники излучения	63
2.2. Ускорители	14
2.3. Генераторы радаров	1
3. Радиоизотопы	
3.1. Трансурановые	27
3.2. Тритий	3
3.3. Продукты деления	10
3.4. Утечки радия	2
3.5. Диагностика и терапия	23
4. Прочие	4
Всего	296

Начиная с середины 1990-х годов, появилось много экспериментальных данных (например, [28, 29]) о роли ОСТ в воде, почве, растительности, в пищевых продуктах, в организме человека и т. д. Из этих экспериментальных данных следует, что ОСТ опаснее НТО. Влияние ОСТ отражено в регламен-

тирующих документах, в частности в [45]: уровень вмешательства (УВ) для ОСТ меньше в 2,3 раза, чем для НТО.

Существующий регламент и системы контроля трития не обеспечивают контроль ОСТ в воздухе. В воздухе контролируется только тритий в виде НТ и, как следствие частичного замещения водорода тритием в воде – НТО во влаге воздуха.

Кроме трития ОСТ, содержит углерод и кислород, т. к. тритий замещает водород в первую очередь в цепочке О-Н. В сбросах французских АЭС углерод (С-14) и тритий измеряют всегда вместе. В США, Канаде и некоторых других странах в районах размещения ядерных объектов также проводится одновременный мониторинг трития и углерода-14, целью которого является исследование значимости ОСТ, учитывая продолжительное время его удержания в живых организмах. В Российской Федерации такие работы ведутся в Федеральном медико-биологическом центре (ФМБЦ) им. А. И. Бурназяна [11, 50].

Характеристикой воздействия источника внутреннего облучения является величина активности соединений трития, поступивших в течение года в организм человека с воздухом рабочих помещений через органы дыхания и через кожу тела: газа НТ, аэрозолей с тритидами металлов, паров тритированной воды с НТО, соединений ОСТ. Величина этого поступления определяет величину годовой эффективности дозы внутреннего облучения, D :

$$D = \sum \Pi_i \Phi_i, \quad (1)$$

где D – суммарная эффективная доза от поступления соединений трития в организм, Зв; Π_i – величина активности i -го соединения трития, поступившего в организм человека в течении года, Бк/год, $i = 1, 2, 3, 4$ (для НТ, НТО, ОСТ и аэрозолей с тритидами металлов); Φ_i , Зв/Бк – дозовый фактор для i -го соединения трития [36].

В качестве наиболее критичной дозы для населения выделяется доза от перорального поступления ОСТ:

$$D^{\text{ОСТ}} = \Pi \Phi = C^{\text{ОСТ}} M \Phi^{\text{ОСТ}}, \quad (2)$$

где $C^{\text{ОСТ}}$, Бк/кг – среднегодовое содержание ОСТ в продуктах; M , кг/год – суммарные годовые поступления продуктов; $\Phi^{\text{ОСТ}} = 1,2 \cdot 10^{-10}$ Зв/Бк (из НРБ-99/09 для ОСТ).

Годовые потребления продуктов можно принять в соответствии с данными единой межведомственной информационно-статистической системы, которые представлены в табл. 8.

Оксид T могут накапливать не только продукты, выращенные на загрязненной местности, но и «чистые» продукты, хранящиеся в атмосфере, загрязненной НТО. Поступление НТО в продукты будет происходить за счет обмена атмосферной влаги, содержащей НТО, и воды, содержащейся в продуктах.

Годовое поступление трития в форме ОСТ продуктов питания для Балаковской АЭС при среднегодовом содержании $C^{\text{ОСТ}} = 100$ Бк/кг составляет 53100 Бк. Тогда для населения $D^{\text{ОСТ}} = 6,4$ мкЗв/год.

Таблица 8

Годовое потребление продуктов питания на душу населения для Саратовской, Тверской и Ростовской областей за 2012 год

АЭС	Годовое потребление на душу населения, кг/год			Сумма, кг/год
	Хлеб, крупы	Мясо, рыба	Овощи, фрукты	
Балаковская	309	68	154	531
Калининская	278	70	176	524
Ростовская	278	71	213	562

В тоже время годовое ингаляционное поступление трития при объемной активности ОСТ 1 Бк/м³ (соответствует ~100 Бк/л во влаге воздуха) оцениваются в 8100 Бк, т. е. примерно в 7 раз меньше, чем при пероральном поступлении.

В табл. 9 представлены данные исследований распределения трития в продуктах питания человека [3].

Таблица 9

Тритий в пище и человеке г. Акита (Япония)

Вид пробы	Тритий в свободной воде пробы, Бк/л	Органически связанный тритий (ОСТ), Бк/л	Суточное поступление трития, Бк/сутки
Сырая пища:			
– рис	2,5	1,8	0,279
– овощи	1,0–1,4	1,7–1,8	0,307
– рыба, моллюски	0,49	1,0	0,055
– мясо	1,3	1,8	0,094
– молоко	2,0	2,1	0,241
– яйца	1,7	2,1	0,068
Водопроводная вода	1,9	–	2,25
Суточное поступление:			
– человек	1,7	1,9	
– мозг	1,6	1,7	
– легкие	1,6	1,9	
– печень	1,6	1,8	

На основании этих исследований было определено, что общее суточное поступление трития у японца составляет 4,95 Бк, из которых 1,7 Бк относится к пище, 0,4 Бк к водяному пару и 2,25 к питьевой воде.

Согласно данным табл. 9 количество трития в воде человека (43 кг жидкости) составляет 1,6 Бк/л и ОСТ в мягкой ткани – 1,8 Бк/кг. При равномерном распределении в мягкой ткани человека (63 кг) концентрация трития равна 1,67 Бк/кг, тогда для существовавшей в 80-х годах прошлого столетия окружающей среды (до аварии в Фукусиме) японцы облучались тритием в дозе, равной 0,048 мкЗв/год.

3. Радиационные аварии

Авария радиационная – потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей свыше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды.

Различают следующие типы радиационных аварий [36]:

Проектная авария – авария, исходные события которой устанавливаются действующей нормативно-технической документацией данной установки. Для такой аварии техническим проектом предусматривается обеспечение радиационной безопасности персонала и населения.

Максимальная проектная авария – проектная авария с наиболее тяжелым исходным событием, установленным для каждого типа установок, реакторов, производств.

Гипотетическая авария – авария, для которой проектом не предусматриваются технические меры, обеспечивающие радиационную безопасность персонала и населения. Защита персонала и населения в случае гипотетической аварии предусматривается за счет разработки и осуществления на территории промышленной площадки и окружающей территории плана мероприятий по защите населения и персонала.

По границе распространения выделившихся радиоактивных веществ радиационные аварии классифицируются следующим образом:

1. Локальная авария – авария в пределах одного помещения (здания, сооружения), не связанная с радиоактивным загрязнением среды за его пределами.

2. Зональная авария – авария с радиоактивным загрязнением местности в пределах санитарно-защитной зоны.

3. Масштабная авария – авария с радиоактивным загрязнением местности за пределами санитарно-защитной зоны.

Применительно к содержащим тритий изделиям (СТИ) и их составным частям под аварией понимается повреждение, разрушение или взрыв, сгорание в результате аварийного воздействия. При этом аварийное воздействие – событие, вызванное попаданием в аварийную ситуацию, которая приводит или может привести к аварии (табл. 10).

Таблица 10

Последствия возможных аварий с тритием

Тип объекта	Радионуклиды	Возможные типы аварий
Производство и переработка трития и его соединений	Тритий	Взрывы, пожары, утечка паров НТО, разрушение оборудования и коммуникаций с выбросом Т в окружающую среду
Сборка-разборка СТИ и его составных частей	Тритий	Взрывы, пожары, утечка Т из комплектующих составных частей
Транспортирование трития и СТИ	Тритий	Взрывы, пожары, утечки трития из узлов

Наиболее характерными аварийными ситуациями являются:

- падение СТИ при проведении монтажных, прогрузочно-разгрузочных и других работ;
- столкновения и опрокидывания транспортных средств с СТИ и их компонентами;
- пожары в сборочных помещениях и на транспортных средствах;
- затопление в морской воде (и других водоемах);
- стихийные бедствия (землетрясения, наводнения, удары молний и т. д.).

По условиям возникновения радиационной аварии с СТИ условно подразделяют на 4 типа:

I – повреждение СТИ в результате нерегламентированного воздействия на него, приводящее к нарушению целостности изделия;

II – пожар;

III – взрыв;

IV – аварийный взрыв.

Поступление трития в окружающую среду возможно при авариях II–IV типов. Основное радиационное воздействие – внутреннее облучение тритием за счет его поступления в организм ингаляционным, перкутанным и пероральным путями. Внутреннему облучению подвергается все тело. Следует отметить, что оксид трития образуется при нахождении СТИ в условиях пожара, когда разгерметизируется узел, содержащий тритий, и выделяющийся тритий окисляется на воздухе до T_2O (НТО, ДТО).

Потенциальная опасность радиационного объекта определяется его возможным радиационным воздействием на население при радиационной аварии.

По потенциальной радиационной опасности, в соответствии с ОСПОРБ-99 устанавливается четыре категории объектов работ с тритием и его соединениями.

К I категории относятся радиационные объекты, при аварии на которых возможно их радиационное воздействие на население и могут потребоваться меры по его защите.

У объектов II категории радиационное воздействие при аварии ограничивается территорией санитарно-защитной зоны.

К III категории относятся объекты, радиационное воздействие при аварии которых ограничивается территорией объекта.

К IV категории относятся объекты, радиационное воздействие при аварии от которых ограничивается помещениями, где проводятся работы с источниками излучения.

В случае возникновения аварии должны быть приняты меры по прекращению развития аварии, восстановлению контроля над источником излучения и сведения к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения тритием производственных помещений и окружающей среды, экономических и социальных потерь, вызванных аварией.

Проектные решения, направленные на обеспечение радиационной защиты персонала и населения при радиационных авариях должны быть основаны на результатах анализа безопасности производства, включающего:

- определение исходных событий и вероятности возникновения радиационной аварии;
- определение временной последовательности и возможных путей развития радиационной аварии.

4. Ликвидация последствий радиационных аварий

Целью действий реагирования на аварии является защита населения и ограничение последствий аварий. При этом ответные действия на аварии включают оповещение об аварии и приведение в действие аварийных команд для ликвидации последствий аварии (ЛПА) и восстановление (деактивация) окружающей среды.

Штатные аварийные формирования не предотвращают аварии, они призваны существенно снизить масштабы аварии и наносимый ущерб за счет своевременного реагирования на аварию и принятия действенных мер по защите населения и предотвращения распространения радиоактивного загрязнения из очага аварии на незагрязненную территорию.

Постановлением Правительства РФ от 25.03.1993 г. № 246 «О создании аварийно-технических центров для ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах ядерного комплекса Российской Федерации» в Министерстве Российской Федерации по атомной энергии (в настоящее время – Росатом) созданы два штатных аварийно-технических центра (АТЦ) для ликвидации последствий аварий.

Штатные аварийные формирования также созданы для АЭС (Нововоронежская АЭС) и для радиохимических производств (СХК г. Северск).

Создание АТЦ потребовало разработки правовой, нормативно-методической и руководящей документации, регламентирующей деятельность аварийных формирований при ЛПА.

Вероятность аварии с СТИ составляет 10^{-4} случаев в год на одно изделие. Однако не все аварии с СТИ приводят к катастрофическим последствиям, связанными с загрязнением местности радиоактивными веществами. Так, по данным экспертов России вероятность возникновения взрыва или сгорания СТИ в аварийных ситуациях составляет $10^{-5} - 10^{-6}$, следовательно, вероятность аварий, сопровождающихся радиоактивным загрязнением местности составляет $10^{-9} - 10^{-10}$ случаев в год на одно СТИ.

Наибольшую опасность с точки зрения аварий представляют этапы транспортирования (аварии, пожары транспортных средств).

При транспортировании на расстояния 1600 км вероятность аварий составляет: автомобилем – $4,2 \cdot 10^{-2}$, железнодорожным транспортом – $3,0 \cdot 10^{-4}$, самолетом – $1,8 \cdot 10^{-4}$.

Только в непосредственной близости от места аварии (~100 м) дозы облучения могут достигать 100 мЗв при плотности загрязнения местности НТО ~ 4 ТБк/м², а на расстоянии более 1 км – уровни облучения за счет НТО не превышают 10 мЗв [51–53]. Ниже в табл. 11 представлены виды защитных мероприятий при авариях с тритием.

Эвакуация представляет собой перемещение людей из загрязненной зоны для полного исключения или снижения острых доз облучения от облака или от воздействия высоких уровней загрязнения местности. Эвакуация предполагает возвращение людей в прежние места проживания через определенный

промежуток времени после нормализации остановки или после проведения дезактивационных работ.

Таблица 11

Защитные мероприятия при радиационных авариях с тритием

Потенциальный путь облучения	Фаза аварии	Защитные меры
Выделение трития, содержащегося в облаке	Ранняя	Укрытие Эвакуация Контроль доступа
Загрязнение кожи и одежды		Укрытие Эвакуация Контроль доступа
Вдыхание повторно взвешенных (ресуспензирование) ТСМ	Поздняя	Переселение Дезактивация почвы и сооружений
Употребление загрязненной пищи и воды		Контроль пищи и воды

Переселение применяется для удаления групп населения из загрязненных зон с целью исключения хронического облучения. При этом возвращение людей в эту зону через какое-либо время не предусматривается. Могут создаться условия, при которых некоторым группам, переселенным в ходе аварии, может быть разрешено возвратиться.

Работы по ЛПА представляют сложный комплекс организационно-технических мероприятий и осуществляются в три этапа в соответствии с действующей документацией Росатома, а также нормативно-методической документацией МАГАТЭ. В табл. 12 показано разделение территории на зоны в зависимости от радиационной обстановки [53].

Таблица 12

Зонирование территории при проведении работ по ликвидации последствий аварии

Наименование зоны	Параметр радиационной обстановки	
	Мощность дозы, мЗв/ч (мР/ч)	Объемная активность Т ₂ О(НТО) в воздухе, МБк/м ³ (Ки/л)
Зона А	Менее 0,0012 (1,5)	Менее 0,44 (1,12·10 ⁻⁸)
Зона Б	0,012–3,3 (1,5–430)	0,44–120 (1,12·10 ⁻⁸ –3,24·10 ⁻⁶)
Зона В	3,3–33 (430–4300)	120–1200 (3,24·10 ⁻⁶ –3,24·10 ⁻⁵)
Зона Г	Более 33 (4300)	Более 1200 (> 3,24·10 ⁻⁵)

Радиационная разведка и зонирование территорий в районе аварии должны обеспечивать получение достоверной информации:

- об уровне воздействия основных радиационных факторов, обусловленных аварией;
- о масштабе и картографической привязке радиоактивного загрязнения территории;

• о необходимых мерах защиты персонала и населения в зависимости от уровня воздействия поражающих факторов радиационной природы.

Для достижения поставленной цели необходимо оценить:

- концентрацию и состав радиоактивных веществ (в том числе и оксида трития) в воздухе (либо в газодымовой струе, если к моменту прибытия САФ к месту аварии продолжится горение СТИ, либо за счет вторичного подъема РВ);
- плотность загрязнения и состав РВ на местности и поверхности зданий, сооружений и техники.

В районе аварии производится зонирование территории с целью выявления участков местности, на которых должны устанавливаться определенные регламенты проведения работ, по признаку уровня воздействия радиационных факторов.

На первом этапе (продолжительностью до 1–2 суток) проводится оповещение об аварии и задействуются оперативные подразделения аварийных формирований (бригады быстрого реагирования), находящиеся в постоянной готовности, осуществляющие круглосуточное дежурство. В ходе выполнения работ первого этапа выполняются следующие задачи:

- проведение радиационной разведки места аварии (аэросъемка, автомобильная, пешеходная);
- проведение спасательных и неотложных работ в очаге аварии;
- категорирование (классификация) аварии и определение необходимых сил и средств для проведения работ второго этапа;
- организация охраны (оцепление) места аварии и поврежденных СТИ;
- установление связи с вышестоящими организациями и организациями взаимодействия, с местными органами власти;
- зонирование места аварии и выдача рекомендаций по защите населения (экстренная эвакуация, укрытие и др.) в районе аварии;
- обеспечение доступа и фиксация поврежденных СТИ.

В ходе выполнения работ второго этапа (продолжительностью до 7 суток) задействуются основные силы и средства аварийных формирований Росатома, а также при необходимости привлекаются силы и средства РСЧС (МВД, МЗРФ и др.) на этом этапе решаются следующие задачи:

- картографирование радиационной обстановки (уровней загрязнения) и уточнение режимов защиты населения;
- диагностика состояния поврежденных СТИ и их составных частей;
- упаковка и удаление с места аварии поврежденных СТИ и их составных частей, транспортирование их к месту обезвреживания;
- дезактивация оборудования, техники и транспортных средств;
- осуществление радиационного и дозиметрического контроля при выполнении работ по ЛПА;
- участие в разработке плана ЛПА третьего этапа.

Третий этап (восстановительный) является переходным от аварийного к нормальному с отменой аварийных ограничений и реэвакуаций населения. Он может продолжаться несколько лет и даже десятки лет. К выполнению ра-

бот третьего этапа могут привлекаться силы и средства министерств и ведомств, входящих в РСЧС.

На этом этапе проводятся широкомасштабные плановые дезактивационные и восстановительные работы, дополнительно уточняются дозы облучения населения и уровни загрязнения окружающей среды (воздух, почва, вода, растительность, продукты питания). Вырабатываются и реализуются мероприятия по использованию сельхозугодий и производимой на них продукции. Проводится постоянный контроль радиационной обстановки. При этом на аварийные формирования возлагается дозиметрическое сопровождение плановых дезактивационных работ, контроль радиационной обстановки и участие в проведении работ по восстановлению нормальной жизнедеятельности в районе аварии.

Существует еще один этап – до аварии. На этом этапе проводится прогноз последствий возможных аварий, расчет сил и средств для работ по ЛПА, а также осуществляется постоянный контроль радиационной обстановки на потенциально опасных объектах и окружающей их территории. Осуществляется контроль за транспортированием СТИ и радиоактивными материалами (отслеживание местонахождения транспортных средств) и поддерживается постоянная связь с группами сопровождения грузов и с группами реагирования на аварии по маршрутам передвижения опасных грузов. Эта работа выполняется расчетами в составе штатных аварийных формирований.

Для безопасного выполнения задач и функций персонала аварийно-спасательных формирований, а также для защиты населения при авариях, потребовалось создание нормативно-методических основ медико-гигиенического обеспечения радиационной безопасности.

Нормативно-методическая документация создавалась на основе выполненных ранее в России (СССР) и за рубежом результатов исследований по данной проблеме, а также на основе экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, выполненных по этой тематике. Разработка документов проводилась как на федеральном, так и на межведомственном уровнях.

Для выполнения задач по ликвидации последствий аварии АТЦ оснащается необходимой техникой и оборудованием в том числе:

- средствами оповещения и связи;
- автоматизированными системами контроля и прогноза радиационной обстановки;
- средствами и приборами радиационной разведки (воздушной, автомобильной, пешеходной), контроля радиационной обстановки и индивидуального дозиметрического контроля;
- робототехническими комплексами и дистанционно управляемыми системами для ведения инженерной и радиационной разведки, разборки завалов и других работ в очаге аварии;
- комплектом оборудования и инструментов для обеспечения доступа к поврежденным СТИ (резак, домкраты и др.);
- системами диагностики состояния поврежденных СТИ (волоконно-оптические зонды);
- средствами индивидуальной защиты, оборудованием для дезактивации персонала, механизмов и транспортных средств.

На рис. 3–5 представлены средства контроля радиационной обстановки индивидуального дозиметрического контроля.



Рис. 3. Прибор обнаружения трития 750 SBAGC (Франция)

Прибор позволяет производить непрерывный контроль содержания трития в воздухе путем прокачки его пробы через ионизационную камеру объемом 750 см^3 . Диапазон измерения объемной активности: $0-10^4 \text{ МБк/м}^3$.



Рис. 4. Пассивный воздушный пробоотборник трития и его соединений

Пробоотборник позволяет получить осредненную пробу концентрации трития в воздухе для последующего определения в лабораторных условиях средней за время экспозиции объемной активности оксида трития в воздухе.



Рис. 5. Спектрометр излучений человека (СИЧ)

Комплекс «WBC» (СИЧ) предназначен для определения прижизненного содержания в организме человека радионуклидов в том числе трития, поступивших в результате радиационных аварий, при выполнении работ по ЛПА. Лаборатория «WBC» смонтирована в виде компактного модуля на базе железнодорожного контейнера длиной 12 м. В лаборатории имеются два измерительных отсека, один из которых оборудован жидкостным сцинтилляционным анализатором трития.

На рис. 6 представлен фотоснимок контейнера АТ601.



Рис. 6. Универсальный супер контейнер АТ601 (Россия)

Контейнер предназначен для транспортирования к месту захоронения поврежденного СТИ. Контейнер оборудован системой стравливания и очистки газов от аэрозолей трития.

Для оснащения АТЦ разработан проект мобильной лаборатории радиационного контроля трития и его соединений (рис. 7).

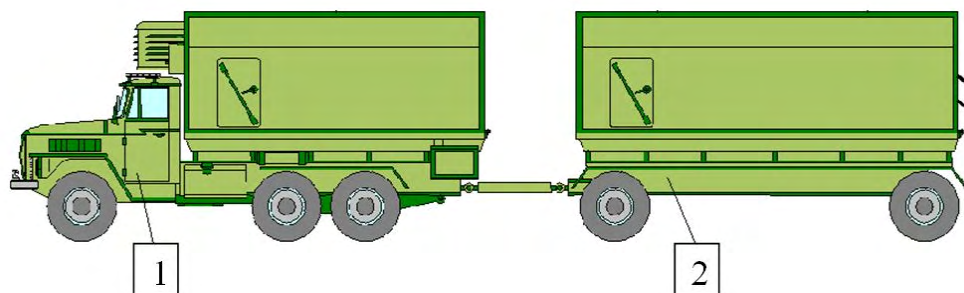


Рис. 7. Мобильная лаборатория радиационного контроля: 1 – тягач; 2 – фургон

В составе тягача расположены:

- бытовой отсек;
- автономный источник питания;
- жидкостной сцинтилляционный анализатор;
- шкаф для хранения подготовленных к работе водных и атмосферных пробоотборников;
- персональная ЭВМ для обработки и хранения информации.

В фургоне размещены:

- установка для термовакuumной десорбции;
- вытяжной шкаф для подготовки проб к измерениям;
- переносные приборы для оперативного контроля трития в воздухе;
- набор химреактивов и посуды;
- установка для отбора проб конденсата выдыхаемого воздуха;
- емкость для сбора и временного хранения отходов;
- комплекты спецодежды и средств индивидуальной защиты (СИЗ).

5. Проектные аварии

Схема проектных аварий с выходом трития из технологического оборудования в рабочее помещение и во внешнюю среду представлена на рис. 8.

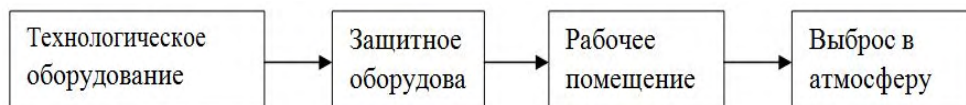


Рис. 8. Схема протекания возможных проектных аварий

Пример защитного оборудования представлен на рис. 9.

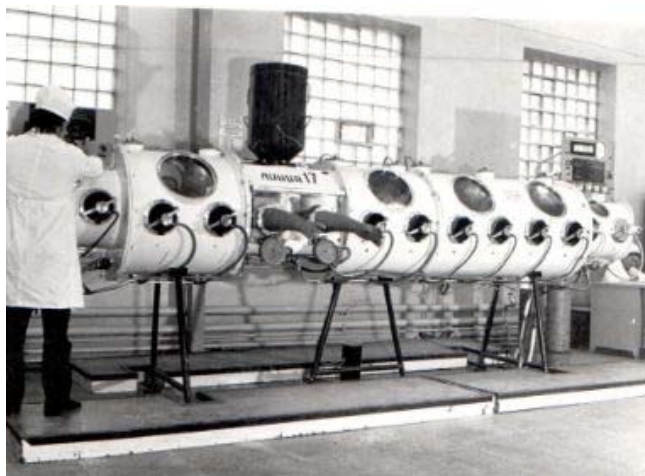


Рис. 9. Перчаточный бокс

Для извлечения трития из объема защитного оборудования разработаны пассивные и активные способы (устройства). Для извлечения трития из объема защитного оборудования предпочтительнее использовать химические методы сорбции, основанные на каталитическом превращении трития в НТО. Для этих целей могут быть использованы промышленные платиновые и палладиевые катализаторы на носителях, являющихся хорошими сорбентами влаги (например, Al_2O_3).

При отсутствии поглотителей скорость наполнения трития в объеме контейнера (бокса) $\frac{dQ}{dt}$ равна

$$\frac{dQ}{dt} = q, \quad (3)$$

а при наличии поглотителей –

$$\frac{dQ'}{dt} = q - \alpha_0 S_0 C, \quad (4)$$

где α_0 – относительная скорость поглощения трития единицей поверхности (Ки·см²/ч)/(Ки/л).

Для цеолитов NaA $\alpha_0 = 0,85$ [3], для алюмопалладиевых катализаторов типа АП-56[3] – $\alpha_0 = 0,65$; S_0 – поверхность поглотителя, см²; C – концентрация трития, Ки/л.

Поглотители с размерами $S_0 = (0,4...0,5) \text{ м}^2$ по эффективности эквивалентны установке газоочистки, работающей с производительностью $(3...5) \text{ м}^3/\text{ч}$, и позволяют снизить концентрацию трития или его оксида во внутренней полости контейнера (бокса) объемом 1 м^3 в течение 1 ч в 24 раза, а за 6 ч – в 10–20 раз по сравнению с работой без поглотителей [3].

Для извлечения Ти НТО из объемов контейнеров в процессе хранения в них СТИ и отходов разработаны сорбционные элементы (рис. 10), размещаемые в контейнерах.



Рис. 10. Сорбционные элементы, размещаемые в боксе (контейнере)

Эффективность работы этих элементов представлена в табл. 13.

Таблица 13

Эффективность поглощения НТО сорбционными элементами

Продолжительность опыта, ч	Концентрация НТО в контейнере, Ки/л		Эффективность извлечения НТО, %
	Отходы	Отходы с сорбентом	
10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	98,0
20	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	99,0

При работе в полевых условиях извлечение трития из оборудования (контейнеров) может осуществляться по следующей схеме (рис. 11) с использованием системы эвакуации газа (СЭГ).

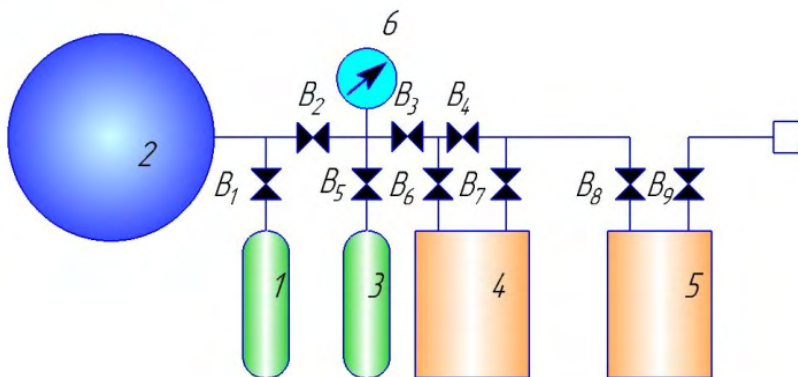


Рис. 11. Принципиальная схема СЭГ: 1 – емкость откакумированная; 2 – емкость технологическая; 3 – баллон; 4 – ловушка; 5 – ловушка; 6 – манометр; В1–В9 – вентили

Порядок работы:

Сначала газ из технологической емкости (2) перепускают в емкость (1) СЭГ для снижения избыточного давления в (2). Затем газ из (1) подается на поглотитель (4), представляющий собой ловушку с таблетированным титан-молибденом ($Ti+30\% Mo$). Проскок газа улавливается ловушкой (5) с PdO на оксиде алюминия. Оксид палладия эффективно окисляет водород при комнатной температуре. Баллон (3) с аргоном служит для «промывки» технологической емкости системы эвакуации газа. На рис. 13 не показаны адсорбер, поглощающий НТО после ловушки (5), прокачивающее устройство, обеспечивающее движение очищаемой среды в системе, ресивер и прибор, измеряющий концентрацию трития.

В случае появления трития в объемах технологического оборудования (боксы, контейнеры, контрольные емкости и др.) предусматривается сброс трития в ресиверы (рис. 12).



Рис. 12. Ресиверы

Ресиверы предварительно откачивают до ~ 10 мм рт. ст. Они оборудованы ионизационными камерами, а также системой проботбора для контроля содержания в них трития. Извлечение трития (очистка) осуществляется установкой М2, характеристики которой достаточно подробно представлены в [39]. Эта установка позволяет производить очистку при содержании изотопов водорода до 10 % объемных.

Эффективность извлечения трития из ресиверов понятна из данных, представленных в табл. 14. Указанные данные относятся к работе в режиме рециркуляции.

Таблица 14

Эффективность извлечения трития из ресиверов

№ п/п	До очистки, Ки	После очистки, Ки	Коэффициент очистки, К
1	1200	0,2	$6,0 \cdot 10^3$
2	1350	0,2	$6,8 \cdot 10^3$
3	40125	0,4	$10,3 \cdot 10^3$
4	22010	0,7	$31,4 \cdot 10^3$

В процессе работ не исключается выход трития из технологического оборудования в рабочие помещения. Для очистки воздуха от трития по контракту с Лос-Аламосской лабораторией США разработана установка МАУГОС [39].

Установка МАУГОС работает в режиме рециркуляции с производительностью 1000 м³/ч (рис. 13–15). Эффективность извлечения трития и НТО составляет не менее 99,9 %. Объем катализатора и абсорбента в установке ~100 л.



Рис. 13. Общий вид установки МАУГОС

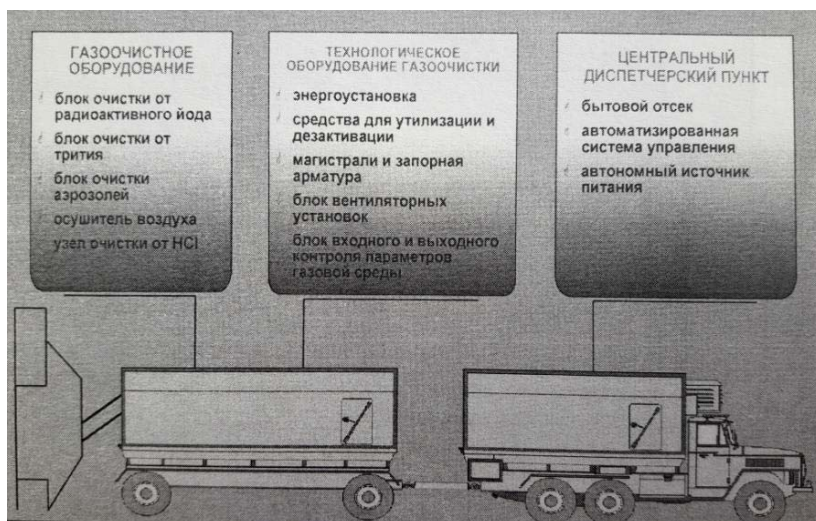


Рис. 14. Компоненка установки МАУГОС

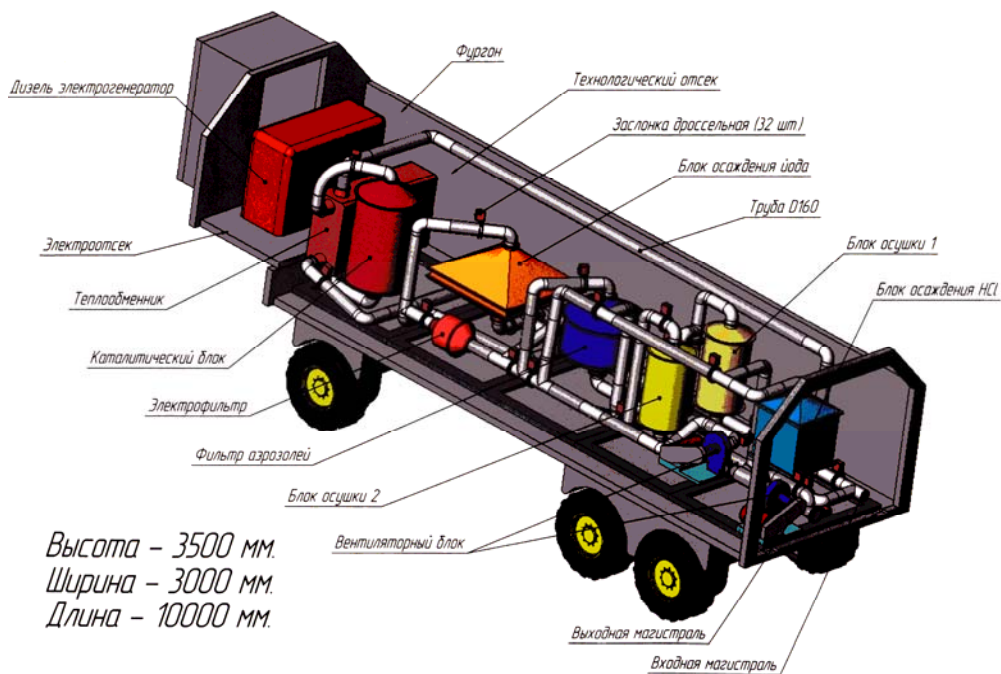


Рис. 15. Технологический отсек МАУГОС

Эта установка на международной выставке изобретений (Женева, 2016 г.) была награждена двумя золотыми медалями (Genevainventions и Hong Kong Science & Technology).

Заключение

Представленные материалы свидетельствуют о том, что в настоящее время разработаны и используются в промышленной практике методы и оборудование для извлечения трития и его оксида из газовых смесей и воды. Эти методы позволяют ликвидировать аварии при обращении с тритием в производственных условиях.

В связи с перспективой создания термоядерного реактора (ITER), где предполагается использовать значительно большие количества трития, чем в существующих производствах, производится адаптация существующих методов и оборудования применительно к условиям ITER, а также разработка новых методов и оборудования.

Список литературы

1. Rowberg R. E., Lau C. K. 97002: The Department of Energy's Tritium Production Program [Электронный ресурс]// GlobalSecurity.org URL: <https://www.globalsecurity.org/wmd/library/report/crs/97-002.htm> (дата обращения: 01.04.2020).
2. Андреев Б. М., Зельвенский Я. Д., Катальников С. Г. Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике. – М.: Энергоатомиздат. 1987, 455 с.
3. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. – М.: Энергоатомиздат. 1985.
4. Перевезенцев А. Н., Розенкевич М. Б. Технология трития для термоядерного реактора. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2019.
5. Юхимчук А. А. Актуальные задачи тематики «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами». Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 2009, № 3, с. 49–55.
6. Голубев А. В., Голубева В. Н. Ожидаемые экологические последствия долгосрочного использования трития – полученный опыт. Сборник докладов 13^{ой} Международной Школы для молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'19». Саров, 2020, с. 251.
7. Veselov A. V. et al. ICF Target Technology at the Russian federal nuclear center. Fusion Technology. 1995, т. 28, № 12, с. 1838.
8. Yukhimchuk A. A. et al. Facility for preparation of gas mixture in muon catalyzed fusion experiments, Hyperfine Interactions, 1999, vol. 119, N 1–4, p. 341–344.
9. Perevozchikov V. V. et al. High-pressure tritium targets for research in muon-catalyzed fusion. Fusion Science and Technology, 2005, vol. 48, p. 310–313.
10. Bom V. R. et al. Experimental investigation of muon-catalyzed DT fusion in wide ranges of D/T mixture conditions, Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2005, vol. 100, N 4, p. 663–687.
11. Юхимчук А. А. Тритиевая наука и технологии в России, Химическая промышленность сегодня, 2019, № 3, с. 40–47.
12. Kharov A. S., Grishechkin S. K., Kiselev V. G. A Uranium Bed with Ceramic Body for Tritium Storage. Fusion science and Technology, 2015, vol. 67, N 2, p. 412–415. DOI: 10.13182/FST14-T41.
13. Neganov B. S. et al. 40-MCi Tritium Source of Antineutrinos, Physics of Atomic Nuclei, 2001, vol. 64, N 2, p. 261–265.
14. Bornschein B. et al. Status of the neutrino mass experiment KATRIN, Fusion science and Technology, 20015, vol. 67, N 2, с. 274–277. DOI:10.13182/FST14-T9.
15. Григоренко Л. В. Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, УФН, 2016, т. 186, № 4, с. 337–386.

16. Юхимчук А. А. и др. Научно-экспериментальные комплексы для безопасного обращения с тритием и его соединениями в интересах фундаментальных и прикладных исследований. ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез, 2013, № 36, с. 26–52.
17. Zucchetti M. et al. Progress in international radioactive fusion waste studies. Fusion Science and Technology, 2019, vol. 75, N 5, p. 391–398.
18. Растунова И. Л. Детритизация и иммобилизация низкоактивных тритийсодержащих водных отходов. Диссертация на соискание уч. степени д.т.н. 2019, Москва, РХТУ им. Д. И. Менделеева.
19. Chung H. et al. Development of tritium technologies at KAERI. Fusion Science and Technology. 2015, vol. 67, Nos. 2&3, p. 304–307.
20. DOE Handbook. Tritium handling and safety storage. 1999. DOE-HDBK-1129-99.
21. Marsden C. S., Meyer B. Activities and capabilities at LANL's Weapons Engineering Tritium Facility (WETF). Program book of the 12th International Conference on Tritium Science and Technology, April 22–26, 2019, p. 250.
22. National Security – Tritium Stewardship [Электронный ресурс] // Savannah River National Laboratory URL: https://srnl.doe.gov/science_innovation/trit_stewardship.htm (дата обращения: 01.04.2020).
23. Tritium Laboratory Karlsruhe (TLK) of the Institute for Nuclear Physics (IKP) [Электронный ресурс] // Tritium Laboratory Karlsruhe (TLK) URL: <https://www.ikp.kit.edu/tlk/english/index.php> (дата обращения: 01.04.2020).
24. Suppiah S., Thomas S. Program book of the 12th International Conference on Tritium Science and Technology, April 22–26, 2019, p. 159.
25. Yukhimchuk A. A. Tritium activities in Russia. Fusion Science and Technology, 2002, vol. 41, N 3 path II, p. 334–338.
26. Kovari M. et al. Tritium resources available for fusion reactors. Nuclear Fusion, 2017, vol. 58, N 2. DOI 10.1088/1741-4326/aa9d25.
27. Окись трития (под редакцией Москалева). – М.: Атомиздат, 1968.
28. Mogissi A. A., Carter M. W., Liberman R. Long-term evaluation of the biological half-Life of tritium. Health Phys. 1971, vol. 21, p. 57.
29. Богданов К. М., Романовская Л. Л. Биофизические закономерности обмена тритиевой воды в организме. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
30. Wylil K. F. Tritium [urine analysis following exposure], Health Phys., 1973, vol. 24, N 6, p. 683.
31. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. – М.: Госатомиздат, 1960.
32. НРБ-69. – М.: Атомиздат, 1972.
33. НРБ-76. – М.: Энергоиздат, 1981.

34. НРБ-76/87. – М.: Энергоиздат, 1988.
35. НРБ-99, СП2.6.1.758-99. – М.: Минздрав России, 1999.
36. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09. М., 2009.
37. Беловодский Л. Ф., Верещага А. Н., Голубев А. В. и др. Моделирование реэмиграции НТО из почвы в атмосферу в окрестности постоянно действующего источника трития. «Потенциал российских ядерных центров в тритиевых технологиях», ВНИИЭФ, Саров, 2000 г., с. 155.
38. Алейников А. Ю., Беловодский Л. Ф., Голубев А. В. и др. Моделирование кинетики и механизма вымывания окиси трития из атмосферы осадками. «Потенциал российских ядерных центров в тритиевых технологиях», ВНИИЭФ, Саров, 2000 г., с. 171.
39. Беловодский Л. Ф., Верещага А. Н., Голубев А. В. и др. Модель дисперсии трития грунтовыми водами. «Потенциал российских ядерных центров в тритиевых технологиях», ВНИИЭФ, Саров, 2000 г., с. 176.
40. Champ D. R., Brown R. M., Cooper E. L. et al. Emergency response to spill of tritiated heavy water – the interface between emergency response, routine monitoring and research. IAEA, Vienna. 1990. 657 p. p. 23–28.
41. Evance A. G., Hoel D. D., Kantelo M. V. Environmental aspects of a tritium release from the Savannah River Plant on March 23, 1983. Du Pont de Nemours (E.I.) and Co., Aiken, SC (USA). Savannah River Lab. Jan. 1985, 148 p.
42. Garret A. J., Zeigler C. C., Carver D. R., Stevenson D. A. Environmental aspects of a tritium release from the Savannah River Plant on March on July 16, 1983. Du Pont de Nemours (E.I.) and Co., Aiken, SC (USA). Savannah River Lab. Oct. 1983, 46 p.
43. Crawford T. V. Savannah River Laboratory environmental transport and effects research. Du de Nemours (E.I.) and Co. Aiken, SC (USA). Annual report. 1976. May 1977. p. 35–37.
44. Environmental monitoring in the vicinity of the Savannah River Plant. Du Pont de Nemours (E.I.) and Co., Aiken, SC (USA). Annual report. 1975. p. 45.
45. Дудин А. В. Анализ аварий при обращении с тритием. Проект МНТЦ 1139, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2001 г.
46. Беловодский Л. Ф., Киселев В. Г., Панюшкин М. С., Хапов А. С. Радиационные и радиэкологические последствия выбросов трития в атмосферу. Аналитический обзор. Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. ИИИИМ'15 Junior, Саров, 2016 г. с. 208–223.
47. Куликов Н. В., Молчанова Н. В., Книжников В. А. и др. Радиэкология почвенно-растительного покрова. УрО АН СССР, Свердловск, 1990 г.
48. Марей А. Н., Бархударов Р. М., Книжников В. А. и др. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека. – М.: Атомиздат, 1980 г.

49. Орлов В. С., Малинина М. С., Матузова Г. В. и др. Химическое загрязнение почв и их охрана. Словарь-справочник. – М.: Атомиздат, 1991 г.
50. Барчуков В. Г. Дифференцированный подход к оценке поступления трития и его соединений в организм человека. Сборник докладов 13^{ой} Международной Школы для молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'19». Саров, 2020, с. 16.
51. Выброс радионуклидов в окружающую среду. Расчет доз облучения человека. Публикация № 29 МКРЗ, – М.: Атомиздат, 1980 г.
52. Артамонова Н. Е., Бондарев А. А., Карпов В. И. и др. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы. – М.: Атомиздат, 1989 г.
53. Авдохин В. Г. Ликвидация последствий промышленных аварий, связанных с выбросом радиоактивных веществ. «Гражданская оборона», № 5, 1990 г. с. 48.

R&D for safe tritium technologies

L. F. Belovodsky, V. G. Kiselev, M. S. Panushkin,
L. K. Porotnikov

All Russian Research Institute of Automatics
named after N. L. Dukhov
vniia4@vniia.ru

The article runs about the man-made tritium release to the environment caused by accidents. A special draw is paid to ways of tritium impact on the man's health. The authors attached very much importance to the role of organically bound tritium (OBT) effect on the health damage.

The important portion of the article deals with radioactive accidents, their classification and sorting, liquidation of tritium accident consequences, protection measures during liquidation activities, necessary equipment and tooling.

The exhibited material could be useful for those employees whose job is radioactive safety.