

РАДИАЦИОННЫЕ АВАРИИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ТРИТИЕМ. ЛИКВИДАЦИЯ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Л. Ф. Беловодский, доктор технич. наук, А. С. Ханов, В. Г. Киселев, М. С. Панюшкин

ФГУП «ВНИИА», г. Москва

Введение

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 [1]:

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 тяжёлым 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 счёт 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.

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

– производство трития и его концентрирование для военного и мирного использования;

– производство и эксплуатация ядерного оружия;

– производство электроэнергии на АЭС (как побочный продукт) и переработка облучённого топлива на радиохимических заводах;

– научно-технические исследования в области термоядерного синтеза. Перспектива создания термоядерного реактора (ИТЭР) привела к интенсификации научных исследований и разработок технологического оборудования для работ с тритием. При этом моделируются взаимодействия трития с конструкционными материалами, поведения трития в окружающей среде и др.;

– научные исследования и эксплуатация установок по извлечению и локализации трития из жидких сбросов и газообразных выбросов;

– незначительные количества трития используются также в научных исследованиях, где тритий используется в качестве

изотопной метки (медицина, биология, физика, химия и др.).

Применительно к ядерным боеприпасам (ЯБП) и их компонентам 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. 1).

Таблица 1
Последствия возможных аварий с тритием [2]

Тип объекта	Радионуклиды	Возможные типы аварий
Производство и переработка трития и его соединений	Тритий	Водородные взрывы, пожары, утечка паров НТО, разрушение оборудования и коммуникаций с выбросом Т в окружающую среду
Сборка-разборка ЯБП и его составных частей	U, Pu, тритий	Взрывы ВВ, пожары, выброс Pu и U в атмосферу, СЦР взрывного типа, утечка Т из комплекующих узлов
Транспортирование трития и изделий его содержащих	Тритий	Взрывы, пожары, утечки трития из узлов

Наиболее характерными аварийными ситуациями являются:

- падение специзделий (ЯБП) при проведении монтажных, прогрузочно-разгрузочных и других работ;
- столкновения и опрокидывания транспортных средств со специзделиями и их компонентами;
- пожары в сборочных помещениях и на транспортных средствах;
- авария носителей и компонентов ядерного оружия;
- затопление в морской воде (и других водоёмах);

– воздействие обычных средств поражения (пули, осколки);

– стихийные бедствия (землетрясения, наводнения, удары молний и т.д.).

По условиям возникновения радиационной аварии с ЯБП условно подразделяют на 4 типа [3]:

I – повреждение ЯБП в результате нерегламентированного воздействия на него, приводящее к нарушению целостности изделия, физической защиты ДМ вплоть до его фрагментирования, но не сопровождающегося диспергированием делящегося материала (ДМ);

II – пожар (выгорание ВВ ЯБП), сопровождающийся высокотемпературным диспергированием ДМ без инициирования цепных реакций деления;

III – взрыв химических взрывчатых веществ ЯБП, сопровождающийся взрывным диспергированием ДМ без инициирования цепных реакций деления;

IV – Аварийный взрыв ЯБП, сопровождающийся инициированием цепных реакций деления.

Действующими радиационными факторами при авариях I типа являются слабоинтенсивное фотонное излучение широкого спектрального диапазона и нейтронное излучение с энергией в диапазоне от 0,1 до 1,0 МэВ, а также бета-излучение трития.

Действующие факторы при авариях II типа обусловлены радионуклидами, поступающими в окружающую среду (изотопы урана, плутония, омериция-241, и для некоторых видов ЯБП – тритий). Основное радиационное воздействие – внутреннее облучение.

При авариях II, III, IV типа с некоторыми типами ЯБП возможно поступление в окружающую среду трития. В этом случае наиболее вероятное химическое соединение трития – оксид. Основное радиационное воздействие на человека – внутреннее облучение. Пути поступления в организм – ингаляционный, перкутантный и пероральный. Внутреннему облучению подвергается

всё тело. Следует отметить, что оксид трития в ЯБП не используется, оксид образуется при нахождении ЯБП в условиях пожара, когда разгерметизируется узел, содержащий тритий, и выделяющийся тритий окисляется на воздухе до Т₂О (НТО, ДТО).

1. Факторы опасности при авариях с тритием

По своим радиационно-гигиеническим характеристикам тритий как потенциальный источник внешнего облучения относится к наименее опасной группе [1]. Однако тритий представляет значительную опасность при попадании его в организм (через органы дыхания, кожу или при приёме пищи и воды). Период полувыведения трития при поглощении в виде газа составляет 3,3 мин, а в виде воды (НТО) – 10 суток. Среднегодовые объёмные активности газообразного трития и его оксида существенно различны: газообразный тритий в 10⁴ раз менее токсичен, чем НТО. Однако под действием собственного излучения тритий легко окисляется, а также окисляется при взаимодействии с почвой (за счёт микроорганизмов в почве). Поэтому выбросы трития в форме газа следует считать такими же опасными, как и в виде НТО.

В последние годы достигнут значительный прогресс в области физико-математического моделирования поведения трития в объектах окружающей среды [4, 5, 6]. Для этих целей в МАГАТЭ создана тритиевая рабочая группа BIOMASS (BiosphereModellingandAssessment), в которую входят представители России, США, Англии, Франции, Германии и др. Эта группа разрабатывает типовые модели поведения трития в объектах окружающей среды на основе экспериментальных данных, предоставляемых странами-участниками группы.

Аварийные ситуации с тритием и их последствия рассмотрены в работах [7–12] и представлены в табл. 2.

Таблица 2
Аварийные выбросы трития из атомных центров

Место аварии	Тип аварии	Последствия аварии
1. Завод Саванна Ривер, США, 1974 г.	Выброс трития в атмосферу 5,1·10 ⁵ Ки	
2. Завод Саванна Ривер, США, 1975 г.	Выброс трития в атмосферу 4,8·10 ⁵ Ки	
3. Завод Саванна Ривер, США, 1984 г.	Выброс трития в атмосферу 5,1·10 ⁵ Ки	Доза на границе завода 0,06 мбэр
4. Завод Саванна Ривер, США, 1983 г.	Выброс трития в атмосферу 5,1·10 ⁵ Ки	Доза на границе завода 0,04 мбэр
5. Завод ВНИИЭФ, СССР, 1967 г.	Выброс трития в атмосферу 8,0·10 ⁴ Ки	Доза на границе завода 250 мбэр*
6. Ливерморская лаборатория, США, 1970 г.	Выброс трития в атмосферу 2,9·10 ⁵ Ки	
7. ИТЭР, Кадараш, Франция (прогноз)	Выброс трития в атмосферу 5,0·10 ⁵ Ки	
8. Ядерная лаборатория Чолк Ривер, Онтарио, Канада, 1988 г.	Разлив тяжёлой воды в фундаменте рекатора 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).

Тритий, сброшенный в окружающую среду, 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 [13]. Поэтому концентрация трития в любом

звене экологической системы не превышает его содержания в воде. Пары НТО поглощаются почвой лучше, чем тритий. Скорость осаждения НТО на почву составляет 0,35 см/с и практически на порядок превышает скорость осаждения трития. Газообразный тритий в почве практически мгновенно превращается в оксид за счёт каталитического действия микроорганизмов в почве [13].

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 [13]). 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 [4]. 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 водоёмов может оказаться значительным. При осаждении НТО в водоёмах происходит её быстрое разбавление, и удельная концентрация НТО в парах воды из водоёмов уменьшается, поэтому вторичного загрязнения воздуха практически не происходит [8].

Радиоактивные вещества, выбрасываемые в окружающую среду, вовлекаются в сложные серии физических, химических и биологических процессов [14, 15, 16]. 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. Упрощённые пути воздействия на человека выброшенных (сброшенных) в окружающую среду радионуклидов представлены на рис. 1 и рис. 2 [17].

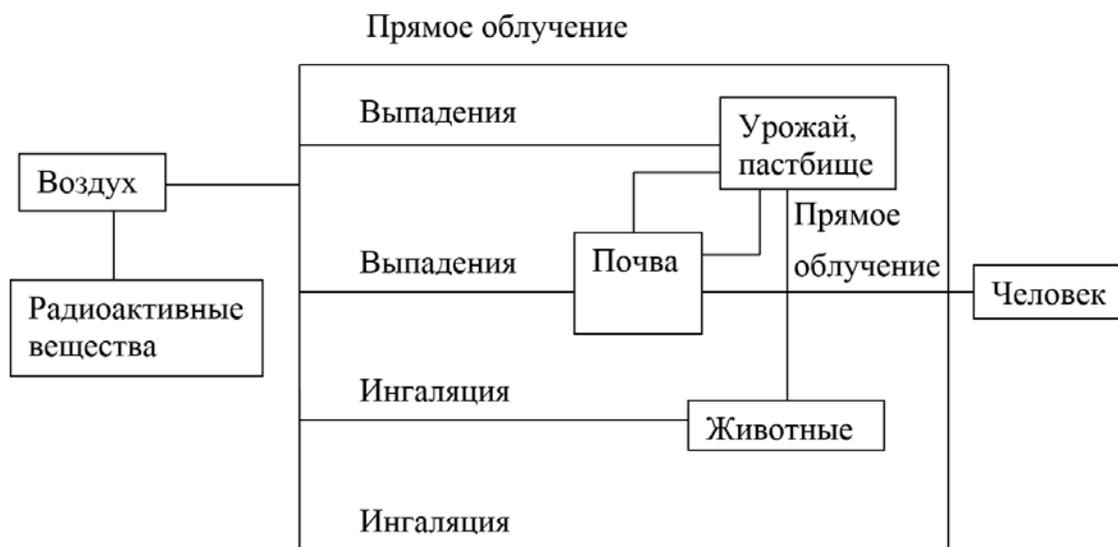


Рис. 1. Упрощённые пути воздействия на человека выброшенных в атмосферу радиоактивных веществ

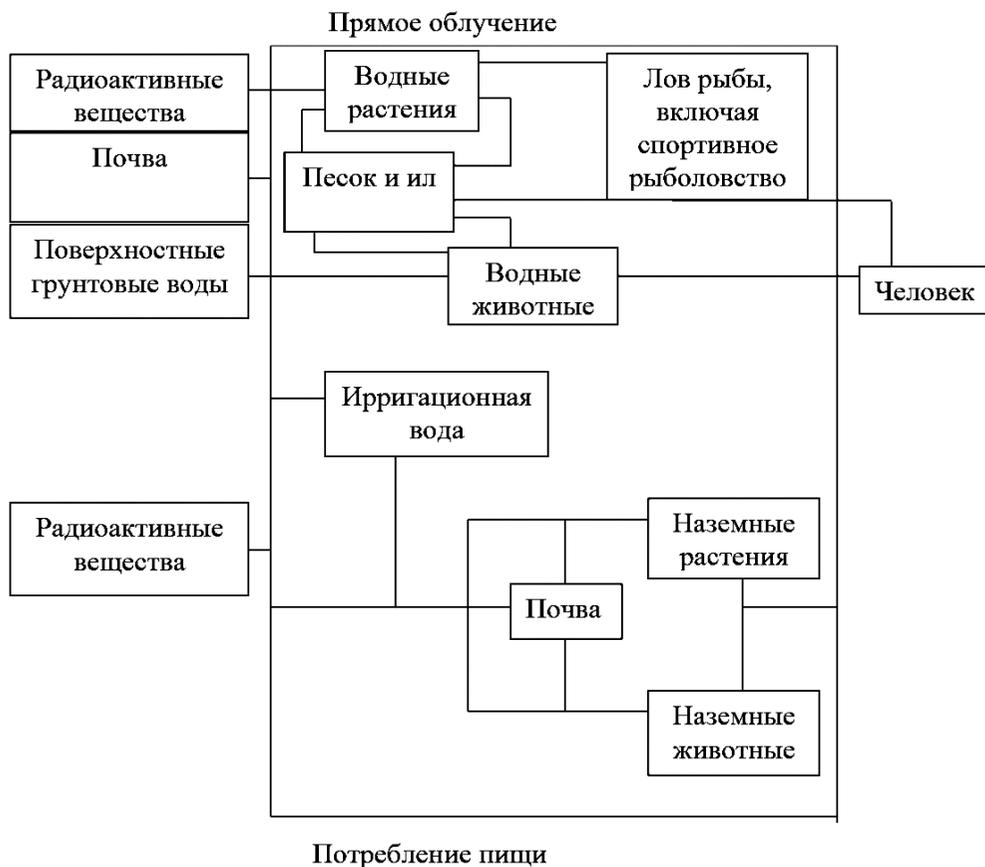


Рис. 2. Упрощённые пути воздействия на человека радиоактивных веществ, сбрасываемых в грунтовые воды и поверхностные воды

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

Любые выбросы радиоактивных веществ в окружающую среду классифицируются на 4 категории [17]. Во-первых, различают планируемые и непланируемые выбросы. Планируемые выбросы ограничены и устанавливаются из неперевышения доз облучения населения с учётом всех путей воздействия радионуклидов на человека [18]. Непланируемые выбросы учитываются при составлении аварийных планов и могут приводить к превышению пределов доз, установленных для населения.

Во-вторых, планируемые и непланируемые (аварийные) выбросы подразделяются на два типа в зависимости от их продолжительности. Выбросы могут быть длительными (хроническими), т.е. достаточно непрерывными, хотя и имеют ежедневные или ежегодные колебания, а также разовыми (острыми), в виде непродолжительных выбросов, связанных либо с отдельным случаем, либо с кратковременной серией событий. Большинство выбросов (сбросов) радиоактивных отходов ядерных предприятий планируется в виде хронических. Выбросы радиоактивных веществ в результате крупных аварий на ядерных предприятиях или аварий, связанных с транспортированием, являются непланируемыми и острыми. Аварийные выбросы представляют наибольшую опасность с точки зрения загрязнения окружающей природной среды и облучения населения.

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

Типы аварий	Кол-во аварий за указанный период
1. Критическое состояние	
1.1. Критическое состояние агрегатов	5
1.2. Реакторов	8
1.3. Химических процессов	5
1. 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

С 1944 г. по 1988 г. на предприятиях, занятых работами с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, произошло 296 аварий, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ [19]. При этом три аварии обусловлены выходом трития (табл. 3).

2. 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 ответственных 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 Росатоме созданы два штатных аварийно-технических центра (АТЦ) для ликвидации последствий аварий с ЯБП и их составными частями. Созданные АТЦ предназначены:

АТЦ с дислокацией в г. Саров – для ликвидации последствий аварий с ЯБП и их составными частями на предприятиях и организациях 5 главка (разработка и испытания ЯБП) и 6 главка (сборка-разборка ЯБП) Росатома, расположенных в Европейской части России; ликвидация последствий транспортных аварий с ЯБП и их составными частями разработки ВНИИЭФ, а также участие в работах по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с радиационным фактором, на территории Нижегородской области.

АТЦ с дислокацией в г. Снежинск – для ликвидации последствий аварий с ЯБП и их составными частями на предприятиях и организациях 5 и 6 Главка Росатома, расположенных в азиатской части России; ликвидация последствий транспортных аварий с ЯБП и их составными частями разработки ВНИИТФ; а также участие в работах по ликвидации последствий радиационных аварий на территории Челябинской области.

Созданные АТЦ Росатома, а также штатные формирования Минобороны являются ведомственными подсистемами Российской системы предупреждения и действий при чрезвычайных ситуациях (РСЧС). Таким образом, система реагирования и ликвидации последствий аварий с ЯБП и их составными частями возведена в ранг Государственной политики РФ.

Создание АТЦ потребовало разработки правовой, нормативно-методической и руководящей документации, регламентирующей деятельность аварийных формирований при ЛПА с ЯБП [3].

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

Наибольшую опасность с точки зрения аварий представляют этапы транспортирования (аварии, пожары транспортных средств), хранения на базах и кораблях, подводных лодках, стыковки ЯБП с носителями и подвески на самолеты.

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

При взрыве ЯБП без ядерного энерговыделения или сгорания ЯБП радиационная обстановка в районе аварии и на местности будет обусловлена следующими факторами:

– загрязнением диспергированными радионуклидами приземного слоя воздуха в районе аварии и по следу облака взрыва (или газодымовой струи);

– вторичным загрязнением приземного слоя воздуха за счёт поступления радионуклидов с поверхности земли вследствие вторичного пылеобразования (или испарения НТО из почвы).

Кроме аварий с ЯБП могут происходить также аварии с составными компонентами (частями) ЯБП при их изготовлении, хранении, транспортировании и разборке:

– выделение плутония, урана и трития в окружающую среду (помещения, внешняя среда) при нахождении компонентов ЯБП в условиях пожара, при нарушении нормального хода технологического процесса и разгерметизации технологического оборудования.

В большинстве случаев эти аварии будут носить локальный или зональный характер. Однако, в наиболее неблагоприятных условиях последствия этих аварий могут носить масштабный характер.

При сгорании ЯБП на открытой местности уровни облучения НТО значительно ниже по сравнению с Рч. Только в непосредственной близости от места аварии (~100 м) дозы облучения могут достигать 10 бэр (5ПДД) при плотности загрязнения местности НТО ~ 10^2 Ки/м², а на расстоянии более 1 км уровни облучения за счёт НТО не превышают 1 бэра.

Эвакуация представляет собой перемещение людей из загрязнённой зоны для полного исключения или снижения острых доз облучения от облака или от воздействия высоких уровней загрязнения местности радионуклидами. Эвакуация предполагает возвращение людей в прежние места проживания через определённый промежуток времени после нормализации обстановки или после проведения дезактивационных работ.

Таблица 4

Защитные мероприятия при радиационных авариях с тритием

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

Переселение применяется для удаления групп населения из загрязнённых 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, переселённым 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 [20].

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 (аэрогаммасъемка, 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 ЯБП, а также упаковок с радиоактивными материалами;

- 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 ЯБП и упаковок с радиоактивными материалами.

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;

- Поиск фрагментов разрушенных ЯБП (ВВ, ДМ, РВ) и упаковок с РВ, а также их удаление;

- Диагностика состояния поврежденных ЯБП и их составных частей;

- Упаковка и удаление с места аварии поврежденных ЯБП и их составных частей; транспортирование 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 эвакуаций населения. Он может продолжаться несколько лет и даже десятки лет. К выполнению работ 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 и еще один этап – до аварии. На этом этапе проводится прогноз последствий возможных аварий на ядерных и радиационных объектах, 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 ЯБП 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 боевыми расчетами в составе штатных аварийных формирований, и направляют к месту аварии ближайшую команду быстрого реагирования (имеются на сборочных заводах 6 Главка Росатома и в подразделениях родов войск Минобороны России).

Для безопасного выполнения задач и функций персонала созданных в Росатоме и Минобороны России 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 [3].

Была разработана Федеральная программа «Медико-гигиеническое обеспечение радиационной безопасности личного состава, персонала и населения при широкомасштабном уничтожении ядерных боеприпасов, включая утилизацию оружейного плутония» («Регламент – 1»). Одной из главных задач этой программы, выполняемой силами Минздрава, Росатома (Минатома) и Минобороны, является создание нормативно-методической документации для ЛПА с ЯБП.

Для выполнения задач по ЛПА с ЯБП и радиационных аварий (в том числе и с тритием) АТЦ оснащается необходимой техникой и оборудованием в соответствии с табелем оснащения, который включает в себя:

- Средства оповещения и связи;
- Автоматизированные системы контроля и прогноза радиационной обстановки;
- Средства и приборы радиационной разведки (воздушной, автомобильной, пешеходной), контроля радиационной обстановки и индивидуального дозиметрического контроля;
- Робототехнические комплексы и дистанционно управляемые системы для ведения инженерной и радиационной разведки, разборки завалов и других работ в очаге аварии;

- Комплект оборудования и инструментов для обеспечения доступа к поврежденным ЯБП (резачки, домкраты и др.);

- Комплект приборов для поиска фрагментов ЯБП и контейнеров для их упаковки;

- Система диагностики состояния поврежденных ЯБП (волоконно-оптические зонды, гамма-графические установки);

- Устройства и реактивы для фиксации поврежденных ЯБП;

- Средства индивидуальной защиты, оборудование для дезактивации персонала, механизмов и транспортных средств.

Некоторое оборудование АТЦ применительно к ликвидации последствий аварий с тритием представлено ниже.



Рис. 3. Прибор по обнаружению трития 750 SBAGC (Франция)

Производит непрерывный контроль содержания трития в окружающей среде путем прокачки через ионизационную камеру объемом 750 см³. Диапазон измерения: 0 – 10000МБК/м³.

Лабораторный комплекс «WBC» – спектрометр излучений человека (СИЧ). Изготовитель: Италия.



Рис. 4. Спектрометр излучений человека

Комплекс «WBC» (СИЧ) предназначен для определения прижизненного содержания в организме человека радионуклидов (плутония, цезия и 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 два измерительных отсека: один для плутония, второй для трития.

Отсек для трития оборудован жидкостным сцинтилляционным счетчиком фирмы «Canberra».



Рис. 5. Универсальный суперконтейнер АТ601 (Россия)

Предназначен для транспортирования к месту захоронения поврежденного ЯБП (ЯЗ). Выдерживает взрыв ВВ до 60кг в тротиловом эквиваленте без потери герметичности. Масса – 25т.

Контейнер оборудован системой стравливания и очистки газов от аэрозолей плутония и трития.

Для контроля трития и НТО в полевых условиях разработан проект мобильной лаборатории.

В составе тягача расположены:

- Бытовой отсек;
- Автономный источник питания;
- Установка с жидкостным сцинтиллятором (Canberra)

- Шкаф для хранения подготовленных к работе водных и атмосферных пробоотборников;

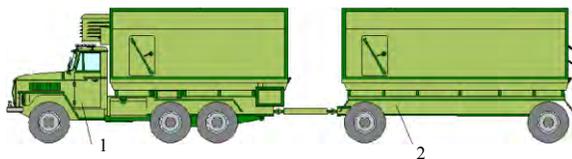


Рис. 6. Мобильная лаборатория радиационного контроля: 1 – тягач; 2 – фургон

- 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 СИЗ.

3. Гипотетические аварии

В 1968 г. (Туле, Гренландия) потерпел аварию самолёт В-52 (США) с четырьмя ЯБП на борту, которые были полностью уничтожены огнём. При этом было диспергировано несколько килограмм плутония и выделилось несколько грамм трития в форме оксида. Наибольшая часть плутония, как и остатки самолёта, была обнаружена на площади примерно $150 \times 700 \text{ м}^2$. Эти остатки и сильно загрязнённый снег собрали и отправили в США. В месте падения самолёта и ещё в двух местах загрязнение плутонием составило $0,4 \text{ Ки/км}^2$ ($\sim 100 \text{ расп/мин}\cdot\text{см}^2$). При этом максимальное загрязнение составило $6 \cdot 10^6 \text{ расп/мин}\cdot\text{см}^2$.

Работы по дезактивации продолжались 8 месяцев, в которых принимало участие до 700 человек. При этом в течении 4-х месяцев производилась перевозка в США для захоронения загрязнённого льда,

снега и воды. Объём обломков самолёта составил $\sim 10^4 \text{ м}^3$ (220 контейнеров).

После дезактивационных работ в массе льда осталось $25 \pm 50\%$ Ки плутония. Кроме того в пробах льда обнаружено наличие трития в форме оксида. Плутоний мигрировал на глубину до 10 см в морское дно и был обнаружен на расстоянии 30 км от места катастрофы.

Анализ последних исследований показал, что в настоящее время в районе Туле находится около 20 Ки (320 г) диспергированного в период аварии плутония. Наблюдения за радиационной обстановкой в районе катастрофы продолжают до настоящего времени [20]. Крупные аварии с ЯБП сопровождаются диспергированием плутония и других радионуклидов (уран, тритий) и радиоактивным загрязнением местности. При этом основную опасность представляет плутоний. Особо тяжёлые последствия могут иметь место при групповом подрыве ЯБП (в составе РГЧ, хранилищах и на транспортных средствах). Так, взрыв только одной боеголовки ракеты «Грайдент» (8 ЯБП) приводит к загрязнению плутонием примерно 38 кв. миль ($\sim 100 \text{ км}^2$). Очистка (дезактивация) этой территории потребовала бы более 500 млн. долларов [20].

За период существования ядерного оружия в США зафиксировано 32 аварийных ситуации с ЯБП, из которых 12 сопровождались выходом радионуклидов из конструкции, при этом 2 аварии связаны с распылением плутония и радиоактивным загрязнением местности (Паломарес, Испания 1966 г. и Туле, Гренландия, 1968 г.). За период существования ядерного оружия в России (бывшем СССР) аварий, сопровождающиеся радиоактивным загрязнением местности не было, хотя имели место случаи, связанные с выходом плутония, трития и урана за пределы защитных оболочек ЯБП. Эти инциденты происходили при экспериментальной отработке ЯБП и их составных частей, а не при эксплуатации в Вооружённых силах. Что касается аварий с эксплуатационными ЯБП, то наиболее серъ-

ёзной из них следует считать аварию с подводной лодкой «Комсомолец» (1988 г.), на борту которой находилось (и затоплено) два ЯБП. Однако и в этом случае выхода плутония и трития за пределы лодки до настоящего времени не зафиксировано.

Наблюдение за выходом радиоактивных веществ за пределы подводной лодки продолжают (рис. 7–10). При этом радиационно-экологический мониторинг осуществляется с использованием специально оборудованных судов и специальных подводно-измерительных комплексов (ПИК).



Рис. 7. Обследование атомной подводной лодки «Комсомолец» с использованием аппарата «Мир» (Норвежское море, 1993)



Рис. 8. Спуск глубоководного обитаемого аппарата «Мир» с борта научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш»



Рис. 9. ПИК в районе затонувшей лодки

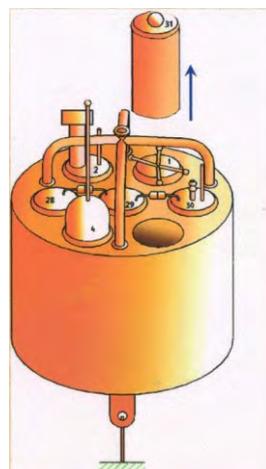


Рис. 10. Подводный измерительный комплекс (ПИК)

ПИК доставляется к месту мониторинга сразу после аварии до подхода основной экспедиции. Они получают и формируют первичную информацию, необходимую для принятия ответственных решений.

ПИК контролирует параметры:

- радиоактивность воды;
- скорость и направление течений;
- давление, солёность и температуру воды.

Глубина погружения – до 6000 м; срок автономности – 1 год; масса – до 300 кг; габариты – 1 м×1 м×1 м.

Использование современных технологий, микропроцессорной техники и управляющих программ позволяет реализовать следующие возможности ПИК:

- проведение параллельных (одновременных) измерений и анализа большого числа контролируемых параметров;

- возможность длительной работы в автономном режиме по гибким программам, а также в диалоговом режиме при обмене информацией;

- возможность доставки отдельных проб по запросу на поверхность с использованием пробоотборников, оснащённых специальными сигналами местоположения;

- приём и передача информации по гидроакустическому каналу связи.

В 1977 г. два «мирных» ЯБП, изготовленных для отработки технологии строительства канала Печора – Колва с помощью серии термоядерных взрывов, потеряли герметичность. В результате потери герметичности термоядерных каскадов, содержащих $\sim 10^5$ Ки трития в форме тритидов лития, концентрация трития в герметичных капсулах ядерных зарядов составляет ~ 1 Ки/л. У зарядов был закончен регламентный срок хранения и они подлежали разборке (уничтожению). При свободном объёме корпуса ЯЗ ~ 100 л, количество выделившегося Т составило ~ 100 Ки. Наличие такого количества Т в корпусах зарядов не позволило провести разборку ЯЗ по штатной технологии. Прежде всего, требовалось извлечь выделившийся тритий из корпуса ЯЗ.

Была разработана специальная технология разборки указанных ЯЗ с предварительным извлечением трития из корпусов с помощью портативной установки газоочистки, основанной на каталитическом окислении трития с помощью палладиевого катализатора и адсорбции образующегося НТО на синтетических цеолитах марки NaA (рис. 11–12).

После извлечения трития из корпусов ЯЗ (до остаточной концентрации $\sim 10^{-3}$ Ки/л) боеприпасы были разобраны по

штатной технологии и тритиевые узлы помещены в контейнеры для отправки на дефектацию и уничтожение. При этом в контейнеры были помещены сорбционные элементы для поглощения выделяющегося трития [20].

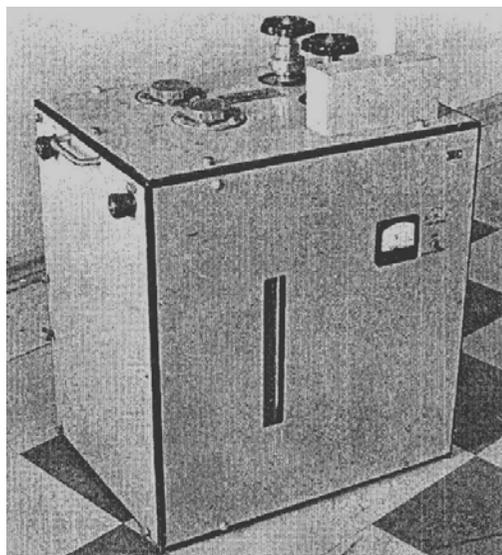


Рис. 11. Установка газоочистки М-34

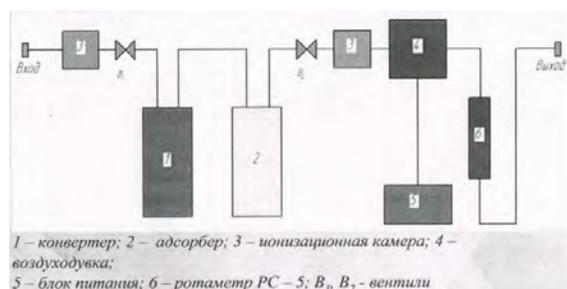


Рис. 12. Принципиальная схема установки М-34

Дефектация термоядерных узлов показала, что потеря их герметичности обусловлена нарушениями регламента при проведении электронно-лучевой сварки герметизирующих оболочек (сварных швов).

Проведена оценка последствий гипотетической аварии при транспортировании железнодорожным транспортом урановых ловушек с тритием для загрузки термоядерного реактора ИТЭР.

В качестве исходных данных принимается, что в вагоне находится 200 г ($2 \cdot 10^6$ Ки или $7,4 \cdot 10^{16}$ Бк) трития. При попадании в

Зависимость плотности загрязнения местности тритием и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения от расстояния по оси следа

Параметр	Класс по Пасквилу	Расстояние по оси следа, км						
		0,1	0,5	1	2	4	6	10
Плотность загрязнения местности, Бк/м ²	A	$1,7 \cdot 10^{10}$	$6,7 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$4,4 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$
	D	$3,7 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{10}$	$5,6 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^9$	$6,5 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$
	F	$5,0 \cdot 10^{13}$	$5,6 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	$2,8 \cdot 10^{10}$	$6,3 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^9$	$9,1 \cdot 10^8$
Ожидаемая эффективная доза, Зв	A	0,48	0,02	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$
	D	1,00	0,054	0,016	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$5,3 \cdot 10^{-4}$
	F	33,00	1,6	0,36	0,08	0,018	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$

условия пожара ловушки разгерметизируются, и весь тритий выходит в окружающую среду в форме оксида (НТО).

Расчет проведен для трех классов устойчивости атмосферы:

- очень неустойчивый (класс А по Пасквиллу, ясный день, градиент температуры отрицательный, приземная скорость ветра – 1 м/с);
- нейтральный (класс D по Пасквиллу, день с переменной облачностью, градиент температуры близок к 0, приземная скорость ветра – 5 м/с);
- устойчивый (класс F по Пасквиллу, ясная ночь, градиент температуры положительный, приземная скорость ветра – 1 м/с).

Расчет выполнен по инженерной методике прогнозирования, в которой используется модель Гаусса, с помощью программ-

ного пакета Hotspot (разработка ЛАНЛ, США).

Результаты расчета представлены в табл. 5.

В табл. 6 приведена классификация зон по уровням плотности загрязнения местности тритием в соответствии с «Критериями для принятия решений по радиационной защите населения при аварии с ядерными боеприпасами» ГН 2.6.1.013-99.

С учетом приведенных критериев зонирования в таблице 6 приведены размеры зон загрязнения для различных классов устойчивости атмосферы (табл. 7).

Из представленных результатов расчета видно, что наиболее неблагоприятные последствия для гипотетической аварии реализуются при устойчивом классе атмосферы. Если авария произойдет в населенном

Таблица 6

Классификация зон по уровням плотности загрязнения местности тритием

Наименование зоны	Ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения, Зв	Плотность загрязнения местности тритием ГБк/м ²
Зона Г экстренной эвакуации	>1,0	>400
Зона В окисления	0,1–1,0	40–400
Зона Б радиационной аварии	0,005–0,1	2–40
Зона А радиационного контроля	<0,005	<2

Размеры зон загрязнения для различных классов устойчивости атмосферы

Наименование зоны	Класс по Пасквилу	Длина зоны, км	Площадь зоны, км ²
Зона Г	A	<0,1	<10 ⁻³
	D	0,1	10 ⁻³
	F	0,7	0,019
Зона В	A	0,2	0,013
	D	0,35	0,012
	F	1,8	0,16
Зона Б	A	1,0	0,26
	D	2,0	0,37
	F	7,2	2,3

пункте, экстренная эвакуация населения потребует в радиусе 700 м от эпицентра аварии. На расстояниях до 2 км от эпицентра аварии потребуются отселение людей, а на расстояниях более 7 км доза внутреннего облучения населения за счет трития может превысить 5мЗв (дозовый предел для населения по НРБ-99/09).

Для других классов устойчивости атмосферы последствия аварии менее значительны, но если авария произойдет в непосредственной близости от населенного пункта, меры по защите населения также потребуются.

При сгорании ловушек с тритием происходит загрязнение НТО больших территорий, что потребует проведения дезактивационных работ. По данным, опубликованным в США дезактивация 1 км² составляет 5 млн. \$ США.

Загрязнение территории НТО приводит также к облучению населения, при этом даже небольшие уровни облучения могут внести значительный вклад в групповую дозу облучения.

Так, при средней плотности населения в европейской части РФ, составляющей 34 чел/км², групповая доза облучения при

Таблица 8

Материальные потери при сгорании в пожаре ловушек с 200 г трития

Вид затрат	Количество	Цена	Сумма, \$США
Потеря продукта	2,0·10 ⁶ Ки	1,2 \$/Ки	2,4·10 ⁶
Ущерб окружающей среде от выброса Т	2,0·10 ⁶ Ки	1,0 \$/Ки	2,0·10 ⁶
Эвакуация и отселение населения на площади ~0,18 км ²	~7 чел.	500 \$/чел	3,5·10 ⁴
Дезактивация зоны аварии	2,3 км ²	5·10 ⁶ \$/км ²	11,5·10 ⁶
Ограничения в ведении сельского хозяйства	2,3 км ²	10 ³ \$/км ²	2,3·10 ³
Облучение населения вне зоны аварии	840 бэр/чел.	17400 \$	14,6·10 ⁶
Итого:			30,5·10 ⁶

Примечание:

1. В ценах 70-х годов прошлого столетия без учета инфляции в настоящее время.
2. Без учета дозовых нагрузок в зоне аварии.

сгорания 200 г трития может составить 840 бэр/чел.

По данным США (середина 70-х годов XX века) стоимость 1 бэр/чел составляет 17400 \$ (в аварийной ситуации).

Ущерб от аварии складывается из стоимости потерь трития, вреда окружающей среде от выброса трития, стоимости отселения людей, проведения дезактивационных работ и облучения населения.

Оценка ущерба от сгорания ловушек с 200 г трития представлена в табл. 8.

4. Проектные аварии

При выходе трития в объем технологического оборудования (боксы, контейнеры, контрольные емкости и др.) предусматривается сброс трития в ресиверы (рис. 13).



Рис. 13. Ресиверы

Ресиверы предварительно откачиваются до ~10 мм рт. ст. Они оборудованы ионизационными камерами, а также системой проботбора для контроля содержания трития. Извлечение трития (очистка) осуществляется установкой М2, характеристики которой достаточно подробно представлены в [23]. Эта установка позволяет производить очистку при содержании изотопов водорода до 10% объемных.

Эффективность извлечения трития из ресиверов представлена в табл. 9. При этом установка работает в режиме рециркуляции.

Таблица 9

Эффективность извлечения трития из ресиверов

№ п.п.	До очистки	После очистки	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	$31,4 \cdot 10^3$

Не исключается также выход трития из технологического оборудования в рабочие помещения. Для извлечения трития и других радионуклидов разработана установка МАУГОС по контракту с Лос-Аламосской лабораторией США[23].

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.

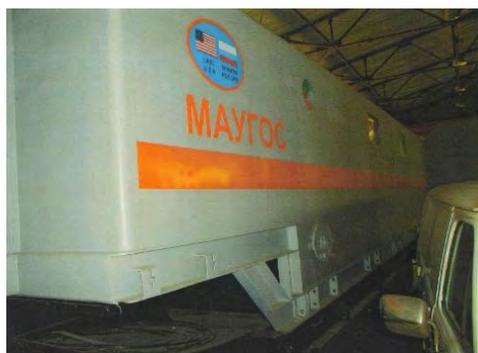


Рис. 13. Общий вид установки МАУГОС



Рис. 14. Компонновка установки МАУГОС

Управление режимами работы установки осуществляется из командного автомобиля с помощью портативной ЭВМ (рис. 16).

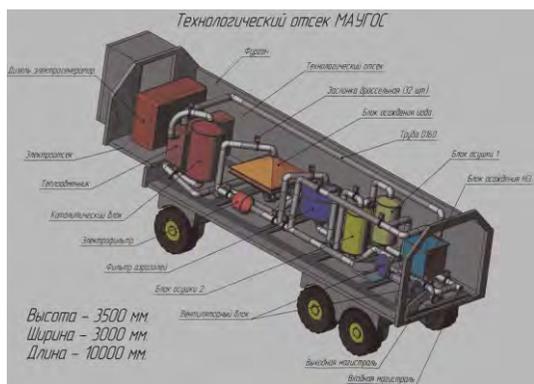


Рис. 15. Технологический отсек МАУГОС

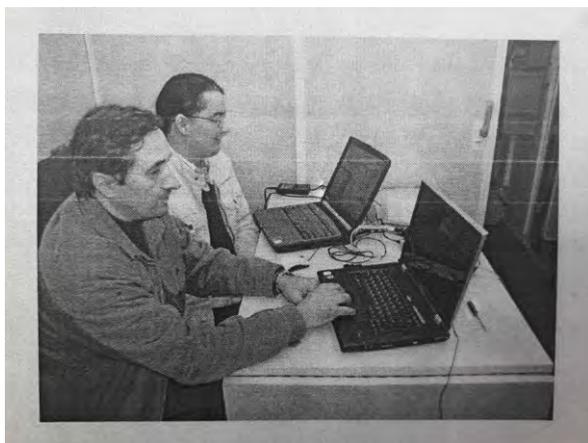


Рис. 16. Управление работой установки из командного пункта

При работе в полевых условиях (полигонные опыты), когда отсутствуют ресиверы, извлечение трития из контейнеров с ЯБП может осуществляться по следующей схеме (рис. 17).

Порядок работы:

Стравливание газов в B_2 из ЯБП через фильтр (Φ) и патрон с NaA (Π);

Продувка (промывка) аргоном узла из B_1 до 0,9 ат и стравливание газа в B_2 через фильтр и патрон с NaA.

Затем проводится очистка газа от трития в баллоне B_2 , либо с помощью установки М34, либо установкой типа СЭГС А1905-М141 (рис. 18).

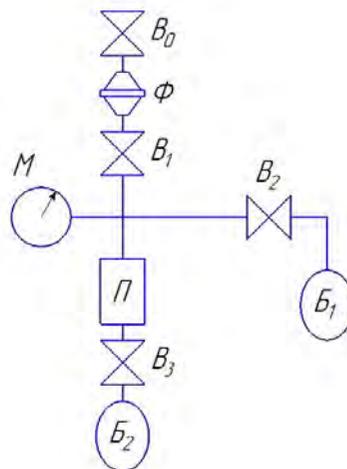


Рис. 17. Схема извлечения трития из ЯБП

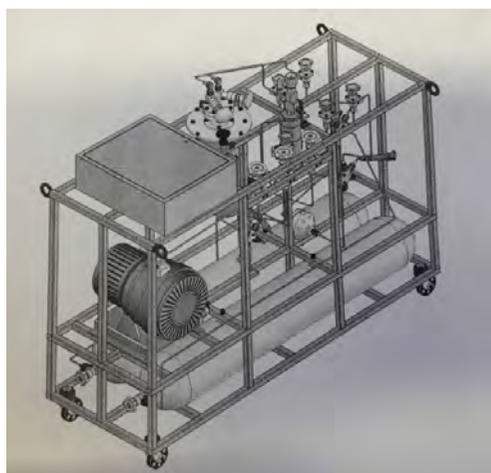


Рис. 18. Общий вид установки СЭГС А1905-М141

В состав установки входит 2 баллона объемом по 40 л, а также урановая ловушка, через которую из баллона прокачивается газ с тритием. Управление работой установки осуществляется с помощью ЭВМ.

Авария (п. 9 табл. 2) произошла в ядерном реакторе 22 января 1989 г в Саванна Ривер в Южной Калифорнии.

Этот завод является единственным в США, производящим тритий, который используется для изготовления ядерного оружия.

Расследование этой аварии показали, что находящаяся под давлением вода в системе охлаждения реактора повредила несколько клапанов, в результате чего два теплообменника вышла из строя.

Теплообменники представляют собой огромные резервуары, внутренняя часть которых пронизана многочисленными мелкими трубками, с помощью которых тепло первичной системы охлаждения передается во вторичную, которая сбрасывает воду непосредственно в Саванна Ривер. После аварии специалисты обнаружили, что вода во вторичной системе содержит тритий, уровень которого в сотни раз выше установленной нормы. Как выяснилось, утечка происходила более чем из 9 тысяч мелких трубок первичной системы теплообменника.

Поскольку вторичная система охлаждения выходит во внешнюю среду, то работа реактора с поврежденным теплообменником могла привести к загрязнению (через воду) населенных пунктов, расположенных вниз по течению реки и забирающих воду для питья из этой реки. Поэтому реактор был остановлен по причине безопасности и не выбрасывает тритий в реку.

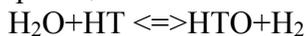
5. Детритизация воды

Один из путей удержания и концентрирования трития на заводах по переработке ядерного топлива, а также в тяжеловодных ядерных реакторах – удаление трития из сточных вод (или замедлителя) методами изотопного разделения. При этом получают водный тритиевый концентрат для длительного хранения и обедненный тритиевый поток для сброса. Эта проблема также остро стоит в связи с аварией на АЭС Фокусима (Япония). С российской стороны в решении этой проблемы участвует РХТУ им. Менделеева со своей установкой [21].

Для удаления трития из сточных вод и его концентрирования в небольшом объеме наиболее пригодными считают методы, основанные на изотопном разделении. Один из этих методов – ректификация воды, в основе которой лежит неодинаковая летучесть H_2O и НТО вследствие их различных температур кипения. В результате ректификации паровая фаза обогащается более лету-

чей H_2O , а жидкая – менее летучей НТО, что обуславливает концентрирование трития в кубовом остатке ректификационной колонны: процесс осуществляется в вакууме. Недостаток метода – низкая степень разделения (примерно 1,1).

Другой метод разделения H_2O и НТО – электролиз воды. Этот метод основан на изотопном обмене, в результате которого электролит обогащается тритием. В электролитической ячейке протекают равновесные реакции:



В зависимости от материала электродов, состава электролита и проходящего через него тока степень разделения может достигать 10 – 25.

Третьим методом является каталитический обмен между газообразным тритием и дейтерием и парами НТО. Катализаторами служат платина и палладий. Степень разделения при использовании этого метода может изменяться в пределах 1,1 – 6,0. Этот метод довольно хорошо разработан и его часто используют в сочетании с криогенной дистилляцией водорода или с электролизом воды.

Такой подход использован в установке для очистки тяжелой воды реактора, обеспечивающей обеднение тяжелой воды по тритию в 2,8 раза, что дает равновесную активность воды 3 Ки/л вместо 80 Ки/л, когда тритий не удаляется (рис. 19).

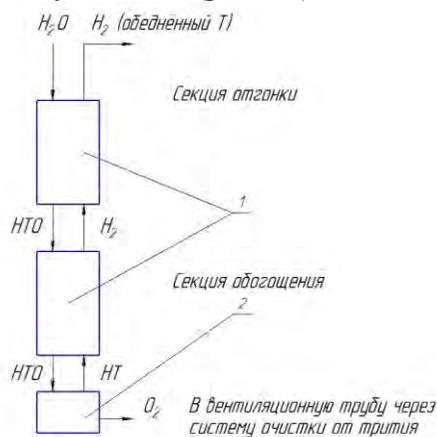


Рис. 19. Разделение изотопов водорода в системе, объединяющей процессы химического разделения и электролиза (1 – каталитический узел; 2 – электролизеры)

Производительность установки по тритию 7,9 мл/ч. Она состоит из двух основных частей: 1 – узел каталитического обмена, при котором в присутствии катализатора происходит изотопный обмен между паровой фазой обрабатываемой тяжелой воды и газообразным дейтерием; 2 – узел фракционной перегонки жидких изотопов водорода, при которой дейтерий и протий отделяются от трития.

Установка включает три каталитических реактора, в каждом из которых циркулируют в противотоке пары тяжелой воды и дейтерий. Дозирующие насосы подают тяжелую воду в выпарной аппарат. Пар смешивают с дейтерием, затем нагревают до 200 °С и направляют в первый каталитический реактор. На выходе пар конденсируется, а дейтерий (с тритием) отделяется и направляется в дистилляционную колонку. Тяжелая вода вновь испаряется, смешивается с дейтерием и переходит во второй каталитический аппарат. На выходе из последнего каталитического аппарата тяжелая вода собирается и направляется в реактор.

Аналогичная установка разработана фирмой «Зульцер» (Швейцария) для тяжеловодного реактора в Гренобле [22]. Экстракционная мощность установки составляет 160 кКи в год.

Метод, объединяющий электролиз воды и каталитический изотопный обмен между водой и водородом с использованием гидрофобного катализатора (СЕСЕ), идеально подходит для извлечения трития из воды вследствие высоких значений коэффициентов разделения и удобного интервала рабочих температур. Этот процесс рассматривается как альтернатива процессам ректификации воды (DW) и каталитическому обмену пары воды-водород (VPCE) для детритизации воды в системе разделения реактора ITER[21].

В Петербургском институте ядерной физики РАН создана экспериментальная опытно-промышленная установка для разделения изотопов водорода, использующая химический изотопный обмен между водой

и водородом и электролиз воды (СЕСЕ процесс).

В настоящее время еще не сделан окончательный выбор метода захоронения тритиевой воды. Закачивание НТО в водоносные горизонты требует тщательного изучения местных гидрогеологических условий. Хранение НТО в емкостях до распада трития представляет собой наиболее простое решение, однако оно требует больших затрат и проблематично с точки зрения радиационной безопасности.

Для обеспечения безопасности и охраны окружающей среды НТО предпочтительнее переводить в форму удобную для длительного хранения. В настоящее время разработаны методы фиксации НТО включением в бетон (с последующей пропиткой бетона полимером), а также введением трития из НТО в молекулы органических полимерных материалов. Предложено также фиксировать НТО сорбцией некоторыми песчаниками и сланцами. Для связывания НТО предлагается использовать портландцемент и глиноземный цемент. Поглощение воды этими цементами достаточно высоко: первый связывает воду в количестве 25 – 28% по массе, а второй – 50 – 75% по массе.

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 использованных источников

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09. М., 2009
2. В. А. Устиненко, Г. В. Горбенко, О. В. Коваленко. Верификация программы GAUSS, ВНИИЭФ, Саров, 2014 г.
3. Санитарно-гигиенические требования к организации работ и обеспечению защиты личного состава специализированных аварийных формирований при ликвидации последствий аварий с ядерными боеприпасами. Санитарные правила СП 2.6.1.024-2000. Федеральное управление медико-биологических и экспериментальных проблем, М., 2000 г.
4. Л. Ф. Беловодский, А. Н. Верещагин, А. В. Голубев 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
5. А. Ю. Алейников, Л. Ф. Беловодский, А. В. Голубев 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
6. Л. Ф. Беловодский, А. Н. Верещагин, А. В. Голубев и др. Модель дисперсии трития грунтовыми водами. «Потенциал российских ядерных центров в тритиевых технологиях», ВНИИЭФ, Саров, 2000 г., с. 176
7. Champ, – D. R.; Brown, – R. M. Cooper, – E. L. and other. Emergency response to spill of tritiated heavy water – the interactive between emergency response monitoring and research. IAEA, Vienna, 1990, p. 23–28
8. Evance, – A. G.; Hoel, – D. D.; Kantelo, – M. V. Environmental aspects of a tritium release from the Savannah River Plant on March 23, 1984. Du Pont de Nemours (E.I) and Co., Aiken, SC (USA). Savannah River Lab. Jan. 1985, 148 p.
9. Garret, – A. J.; Zeigler, – C. C.; Carver, – D. R.; Stevenson, – D. A. Environmental aspects of 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.
10. Crafword, – T. V. Savannah River Laboratory environmental transport and effect research. Du Pont de Nemours (E.I) and Co., Aiken, SC (USA). Annual report, May 1976, 35–37 p.
11. Environmental monitoring in the vicinity of the Savannah River Plant. Du Pont de Nemours (E.I) and Co., Aiken, SC (USA). Annual report, 1975, 45 p.
12. А. В. Дудин. Анализ аварий при обращении с тритием. Проект МНТЦ 1139, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2001 г.
13. Л. Ф. Беловодский, В. Г. Киселёв, М. С. Панюшкин, А. С. Хапов. Радиационные и радиологические последствия выбросов трития в атмосферу. Аналитический обзор. Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'15 Junior, Саров, 2016 г. с. 208–223.
14. Н. В. Куликов, Н. В. Молчанова, В. А. Книжников и др. Радиозэкология почвенно-растительного покрова. УрО АН СССР, Свердловск, 1990 г.
15. А. Н. Марей. Р. М. Бархударов, В. А. Книжников и др. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека. М., Атомиздат, 1980 г.
16. В. С. Орлов, М. С. Малинина, Г. В. Матузова и др. Химическое загрязнение почв и их охрана. Словарь-справочник. М., Атомиздат, 1991 г.
17. Выброс радионуклидов в окружающую среду. Расчёт доз облучения человека. Публикация № 29 МКРЗ, М., Атомиздат, 1980 г.
18. Н. Е. Артамонова, А. А. Бондарев, В. И. Карпов и др. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы. М., Атомиздат, 1989 г.
19. В. Г. Авдохин. Ликвидация последствий промышленных аварий, связанных с выбросом радиоактивных веществ. «Гражданская оборона», № 5, 1990 г. с. 48.
20. Л. Ф. Беловодский, В. П. Жогин, А. К. Чернышев. Система организационно-технических мероприятий при авариях с ядерными боеприпасами. Контракт ВНИИЭФ с МО США № 94-C-0008, Арзамас-16, 1995 г.
21. И. А. Алексеев С. Д. Бондаренко, Т. В. Васянина и др. Опыт эксплуатации опытно-промышленной установки для переработки тяжёлой и лёгкой воды, загрязнённой тритием. Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях. ВНИИЭФ, Саров, 2000 г., с. 143–148.
22. Установка для удаления трития из реактора. Экспресс-информация. ЦНИИАтоминформ, 1972, № 39, (818), с. 9.
23. Л. Ф. Беловодский, А. С. Хапов. Очистка газов от трития. Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'12. Саров, 2013, с. 216–259.