

МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ТРИТИЯ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.

Принцип глубоко эшелонированной защиты реализуется, в первую очередь, путем создания барьеров, которым в принципе никогда ничто не должно угрожать, и которые, в свою очередь, должны быть нарушены, прежде чем может быть нанесен ущерб человеку и окружающей среде. Это физические барьеры, обеспечивающие возможность последовательного удержания радиоактивных веществ. [1]

Глубоко эшелонированная защита направлена на предотвращение выноса радиоактивных веществ к человеку или в окружающую среду.

С учетом этого разрабатываются регламентирующие документы по радиационной безопасности, в которых определены пределы облучения населения от всех видов ионизирующих излучений, как искусственного, так и естественного происхождения.

Для атомных станций или других ядерно-опасных объектов, рассматриваются три пути радиационного воздействия на население и окружающую среду, связанные с деятельностью этих объектов [2]:

- Выбросы радиоактивных продуктов в атмосферу;
- Сбросы радиоактивных продуктов с жидкими отходами в водоемы, грунтовые воды;
- Захоронение отработанного ядерного топлива и других отходов ядерного производства.

В результате этих трех путей удаления радиоактивных продуктов с объекта, создается потенциальная опасность радиационного воздействия ионизирующих излучений на окружающую среду, в том числе и на население.

Миграция нуклидов во внешней среде, удаляемых с атомных объектов в результате этих трех путей, достаточно хорошо представлены в работах [3] и [4].

Первоначально принятая схема миграции нуклидов во внешней среде до настоящего времени остается без изменений. Тщательный анализ существующих моделей миграции нуклидов показал, что ее существенным недостатком является то, что она не учитывает еще один путь радиационного воздействия на население, проживающего вблизи ядерно-опасного предприятия.

Таким путем является перенос радионуклидов во внешнюю среду, в том числе и в жилой фонд, персоналом, работающем на атомной станции или другом ядерно-опасном объекте.

Считается, что барьером, исключаяющим такой перенос нуклидов, является санитарно-пропускной режим. Эффективность дезактивации поверхности тела определяется культурой безопасности персонала. Однако даже самая тщательная санобработка не эффективна для удаления нуклидов попавших внутрь организма.

В течение рабочего времени в организм человека непрерывно поступает некоторое количество нуклидов с вдыхаемым воздухом. Поступившие нуклиды накапливаются в крови, органах и тканях на протяжении всей профессиональной деятельности. Естественно, что наряду с накоплением нуклидов происходит и обратный процесс – выведение их из организма. Скорость выведения нуклидов из организма определяется биологическим периодом полувыведения, величина которого разная для каждого нуклида и много меньше периода полураспада.

Таким образом, накопление нуклидов в организме определяется их концентрацией в атмосферном воздухе, объемом вдыхаемого воздуха и величиной задержки в органах и тканях, а удаление – величиной биологического коэффициента полувыведения. Следует отметить, что если накопление нуклидов происходит только во время профессиональной деятельности человека, то удаление их из организма – непрерывно, где бы человек ни находился. Так как большую часть времени, профессиональный работник находится в жилом помещении, то и нуклиды переходят и накапливаются в этом помещении, предметах быта, в организмах членов его семьи.

Для обоснования такой модели переноса в первую очередь следует рассмотреть поступление в организм профессионального работника таких радионуклидов, как тритий, углерод-14, стронций-90, цезий-137, эти радионуклиды в большем количестве присутствуют в атмосферном воздухе производственных помещений АЭС.

Из всех нуклидов наибольший интерес в силу своих физических свойств представляет изотоп водорода – тритий. Тритий, содержащийся во вдыхаемом воздухе, практически полностью остается в организме человека. [5].

После выхода из помещения содержащего тритий, тритий (биологический период полувыведения $T_b = 10$ дней), начинает переходить в окружающую среду, повышая его содержание в местах наибольшего пребывания человека.

Механизм поступления трития в воздух производственных помещений

Тритий образуется в ядерных реакторах при бомбардировке нейтронами ряда элементов и при

делении ядерного топлива. Процесс деления ядерного топлива дает больше трития, чем все другие процессы в реакторах с водяным охлаждением. Образовавшийся в топливе тритий диффундирует через оболочку ТВЛ (или через дефекты в оболочке) в теплоноситель и соединяется с ним, образуя тритированную воду (НТО) [6].

В следствии неплотностей оборудования на АЭС образуются организованные и неорганизованные протечки воды, содержащей радиоактивные продукты. Чтобы исключить поступление этих вод в окружающую среду на АЭС, организовано оборотное водоснабжение, т.е. все жидкие радиоактивные среды, после их переработки возвращаются в систему технического водоснабжения. Существующие системы и методы очистки воды от радиоактивных продуктов имеют высокую эффективность, однако, они практически не очищают исходную воду от радиоактивного трития. Концентрация трития в очищенной воде будет такой же, что и в исходной.

Переработанная вода используется не только в замкнутых, но и в открытых технологических системах и процессах.

Использование тритированной воды в открытом виде приводит к тому, что атмосферный воздух над поверхностью воды насыщается молекулами НТО, что приводит к загрязнению воздуха производственных помещений АЭС радиоактивным тритием. А так как физические средства защиты от трития органов дыхания и кожного покрова персоналом станции не применяются, то практически весь персонал получает дополнительное радиационное воздействие от трития, поступающего во внутрь организма.

Организм человека будет насыщаться тритием в течение рабочей смены. При выходе работника в «чистую» зону будет наблюдаться обратный процесс – перехода трития в окружающую среду. Тритий, подобно вирусу, будет распространяться вне атомной станции во всей среде обитания человека.

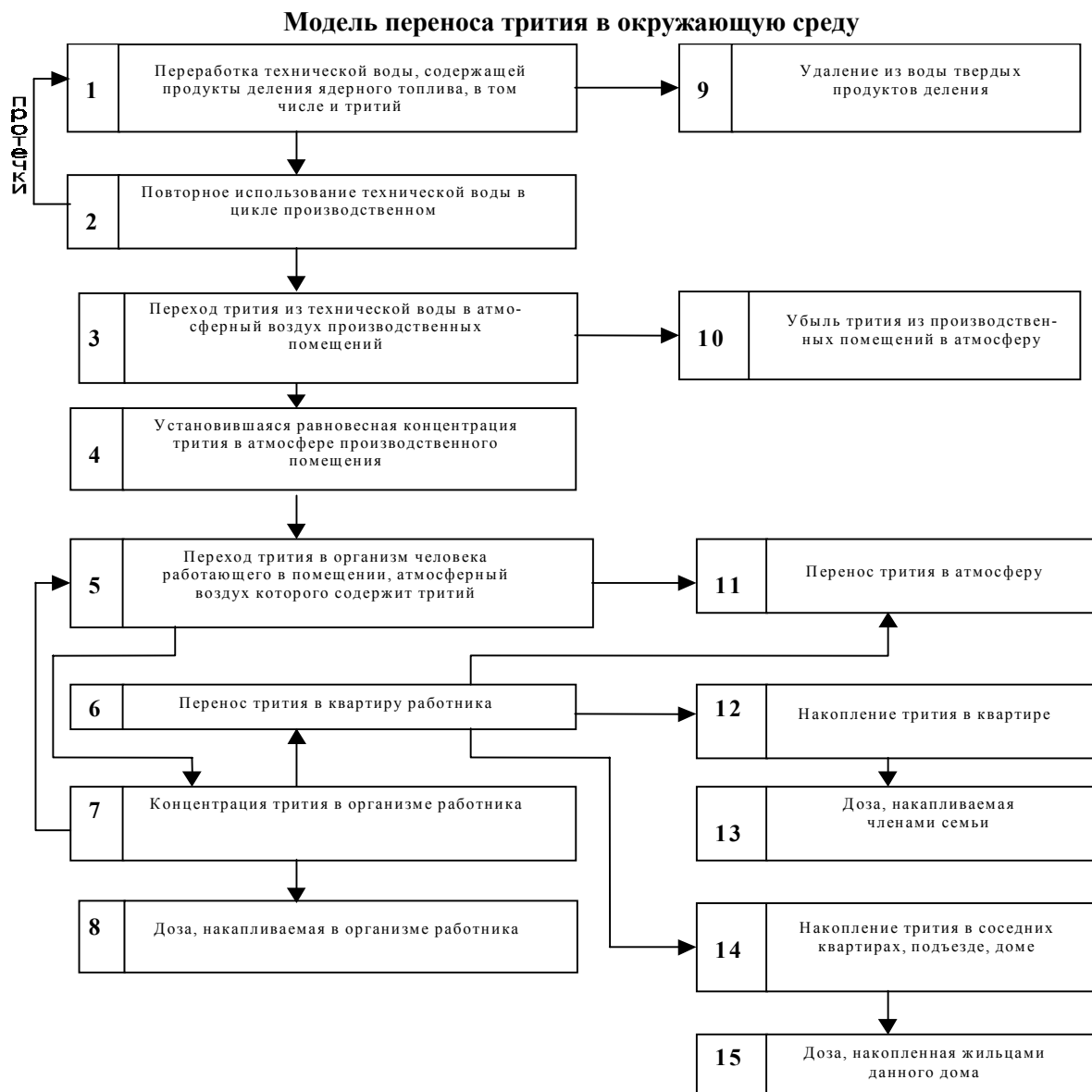


Рис.1. Модель переноса трития с АЭС в окружающую среду

Приведенная на рис.1. модель переноса трития с АЭС в окружающую среду содержит несколько «камер». Переход трития из одной «камеры» в другую, скорее всего, описывается нелинейной зависимостью и зависит от многих метеорологических, геометрических факторов и специфических свойств самого трития. В общем виде, процесс перехода трития из водной среды в атмосферный воздух производственного помещения, из воздуха в организм человека и далее в другие объекты внешней среды можно описать линейными уравнениями.

Такой подход является консервативным, тем не менее, он достаточно прост и дает полное представление о величинах концентрации трития, переносимого во внешнюю среду.

Переработка технической воды, содержащей продукты деления ядерного топлива

Техническая вода организованных протечек реакторного и машинного отделения, конденсат с эжекторов уплотнения турбин, организованных продувок от технического бассейна выдержки топлива и контура СУЗ, контуров опорожнения КМПЦ и оборудования машинного зала подвергается очистке от радионуклидов и других примесей с целью повторного ее использования.

После переработки, поступившей на очистку воды, образуется две фракции:

- Вода, очищенная от радионуклидов и других примесей используется повторно.
- Вода, содержащая радиоактивные продукты деления, коррозии и прочие примеси, выводимая из технологического цикла.

Концентрация твердых нуклидов в очищенной воде зависит от коэффициента очистки станции переработки воды. Это не относится к тритию, его концентрация в очищенной воде Q_1 (Бк/л) будет равна его концентрации в исходной воде Q_0 (Бк/л):

$$Q_1 \approx Q_0; \text{ Бк/л} \quad (1)$$

Переработанная вода поступает снова в технологические системы станции и при продолжительной работе АЭС в воде систем устанавливается равновесная концентрация трития. По данным работы [7] в технической воде различных АЭС изменяется в пределах $(0,34 - 0,67) \cdot 10^8$ Бк/м³. В пересчете на общий объем воды, циркулирующей во всех системах АЭС, суммарная активность трития составит 10^{14} Бк.

Переход трития из переработанной воды в воздух производственных помещений АЭС

Основными помещениями АЭС, где возможен интенсивный обмен трития между водой и воздухом являются:

- бассейн выдержки отработанного топлива;
- выпарные системы и аппараты;
- химические лаборатории;
- системы обмывки оборудования.

Изотопный обмен трития между открытой водой и воздухом происходит:



где:

HT – газообразный тритий.

HTO – тритированная вода.

Реакция протекает в обоих направлениях. Постоянная равновесия для реакции (2) зависит от температуры и составляет 6,75 при $t = 16^\circ\text{C}$, 6,47 при $t = 20,2^\circ\text{C}$ [6].

При определенной температуре и влажности воздуха, над поверхностью воды образуется насыщенный пар. Содержание воды в насыщенном паре зависит от влажности и изменяется в пределах от 10 до 17 мл/м³ воздуха при влажности 50% и 100% соответственно.

Равновесная концентрация трития в воде и насыщенном паре будет равна:

$$Q_2 = K_1 \times Q_0; \text{ Бк/м}^3 \quad (3)$$

где:

K_1 – объем влаги в 1 м³ воздуха, м³ влаги/м³ воздуха.

Q_0 – концентрация трития в технической воде, Бк/м³.

Переход трития в атмосферу производственного помещения, с учетом вентиляции

Равновесная концентрация трития в производственном помещении будет зависеть от многих параметров, в том числе и от скорости обмена воздуха. Однако, с увеличением скорости обмена

воздуха, будет увеличиваться и скорость выхода пара из тритированной воды. В общем случае, концентрация трития в воздухе вентилируемого помещения будет меньше, чем невентилируемого.

$$Q_3 = K_1(1 - K_2) \times Q_0; \text{ Бк/м}^3 \quad (4)$$

где:

K_2 – коэффициент разбавления в вентилируемом помещении.

Q_3 – установившаяся концентрация трития в вентилируемом помещении, Бк/м³.

Переход трития в организм человека, из воздуха, содержащего тритий

Тритий поступает в организм человека с вдыхаемым воздухом, через кожный покров, с водой и пищей. В работе [5] отмечено, что скорость поступления трития с вдыхаемым воздухом равна скорости поступления его через кожу. Причем содержание трития в выдыхаемом воздухе составляет примерно 2%. Поступление трития в организм человека с вдыхаемым воздухом и через кожный покров можно оценить как:

$$Q_4 = K_3 \times t_1 \times V_1 \times \delta \times K_1 \times (1 - K_2) \times Q_0; \text{ Бк} \quad (5)$$

где:

K_3 – коэффициент, учитывающий поступление трития через кожу. $K_3=2$.

t_1 – время пребывания человека в атмосфере тритированного воздуха, час.

V_1 – объем вдыхаемого воздуха за час, м³/час.

δ – отношение концентрации трития во вдохе к выдоху.

Переход трития из организма человека в атмосферу и жилое помещение

При выходе человека из среды, содержащей тритий, начинается обратный процесс – переход трития из организма в объекты внешней среды: воздух, воду, пищу, предметы быта и т.д.

Удаление трития из организма происходит с выдыхаемым воздухом, через потовые железы, с фекалиями. Биологический период полувыведения трития из организма составляет $T_8=10$ дней [5].

Если время нахождения человека на открытом воздухе составляет t_2 часов, а в жилом помещении t_3 часов, то оставшееся в нем количество трития:

$$Q_5 = 2^{-t_2/T_8} \times Q_4; \text{ Бк} \quad (6)$$

перейдет в жилое помещение:

$$Q_6 = (1 - 2^{-t_3/T_8}) \times Q_5; \text{ Бк} \quad (7)$$

остается в организме человека:

$$Q_7 = Q_5 - Q_6; \text{ Бк} \quad (8)$$

Выражения (6) – (8) приведены для одного рабочего дня. На самом деле профессиональный работник ежедневно «подпитывается» тритием в течение года, так что концентрация трития, как в его организме, так и в его жилом помещении будет накапливаться, скорее всего, по экспоненциальному закону. Однако для общей оценки миграции трития вполне достаточно описать его накопление линейной зависимостью от времени. При рассмотрении временного интервала в 1 год, естественного распада, убыль трития составит всего ~6%. Таким образом, в течение времени t_4 , t_5 количество трития будет:

в жилом помещении:

$$Q_8 = \frac{Q_6 \times t_4}{V_2}; \text{ Бк/м}^3 \quad (9)$$

в организме человека:

$$Q_9 = Q_7 \times t_5; \text{ Бк} \quad (10)$$

где:

t_5 – число рабочих дней в году, дней.

t_4 – продолжительность рассматриваемого периода, дней.

V_2 – объем жилого помещения, м³.

Накопление трития членами семьи работника и соседями

Тритий, переходящий из организма работника в атмосферный воздух жилого помещения, пищевые продукты, предметы быта и т.д., будет поступать в организм членов семьи, и с течением времени, накапливаться так же, как и в организме самого работника [5]:

$$Q_{10} = K_3 \times t_6 \times V_3 \times \delta \times Q_8; \text{ Бк} \quad (11)$$

где:

t_6 – время пребывания члена семьи в жилом помещении, час.

V_3 – объем вдыхаемого воздуха, м³/сутки.

Накопление трития соседями:

$$Q_{11} = K_2 \times K_3 \times t_6 \times V_3 \times \delta \times Q_8 ; \text{Бк} \quad (12)$$

Доза внутреннего облучения людей за счет поступления в организм трития

Доза профессионального работника:

$$D_1 = Q_9 \times K_4 ; \text{мЗв} \quad (13)$$

Доза члена семьи профессионального работника:

$$D_2 = Q_{10} \times K_4 ; \text{мЗв} \quad (14)$$

Доза человека проживающего в соседней квартире:

$$D_3 = Q_{11} \times K_4 ; \text{мЗв} \quad (15)$$

где:

K_4 – коэффициент дозового преобразования между содержанием трития в организме и получаемой дозой, мЗв/Бк.

Пример расчета дозы для населения, проживающего вблизи АЭС

Для расчета дозы приняты следующие исходные данные (таблица 1):

$Q_0 = 6 \cdot 10^8$ – удельная активность трития в технической воде АЭС.

$K_1 = 8,2 \cdot 10^{-6}$ – содержание влаги в 1 м³ воздуха при температуре 20°C.

$K_2 = 0,1$ – коэффициент, учитывающий равенство поступления трития в организм с вдыхаемым воздухом и через кожный покров.

$K_3 = 2$ – учет поступления трития через поверхность кожи.

$t_1 = 7$ часов – время пребывания в производственном помещении.

$V_1 = 0,92 \text{ м}^3/\text{час}$ – объем вдыхаемого воздуха.

$\delta = 0,98$ – отношение концентрации трития во вдохе к выдоху.

$t_2 = 3$ часа – время нахождения работника на открытом воздухе.

$t_3 = 14$ часов – время нахождения работника в жилом помещении.

$T_8 = 240$ часов – биологический период полувыведения трития из организма.

$t_4 = 4\,600$ часов – количество часов в течении которых работник находится в жилом помещении.

$V_2 = 120 \text{ м}^3$ – объем жилого помещения.

$t_5 = 250$ дней – количество рабочих дней в году.

$t_6 = 200$ дней – количество дней нахождения в жилом помещении члена семьи и человека, проживающего в соседней квартире.

$K_4 = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ мЗв/Бк}$ – дозовый коэффициент преобразования для населения.

$V_3 = 22,1 \text{ м}^3/\text{сутки}$ – объем вдыхаемого человеком воздуха за сутки.

Примечание:

- Дозовый коэффициент преобразования и объем вдыхаемого воздуха приняты одинаковыми как для профессионального работника, так и для населения.
- Расчет дозы по объемной активности [8] в воздухе (Бк/ м³) дает заниженный результат в 4 раза, поэтому доза рассчитана по активности трития, накопленной в организме.

Таблица 1.

Принятое значение параметров для расчета дозы профессионального работника и населения.

Параметр	Значение параметра	Единица измерения
Q_1	6,Е+08	Бк/м.куб
K_1	8,Е-06	м.куб/м.куб
K_2	0,1	отн.
K_3	2	отн
t_1	7	час
V_1	0,92	м.куб/час
δ	0,98	отн.
t_2	3	час
t_3	14	час
T_8	240	час
t_4	191,7	дн.
V_2	120	м.куб
V_3	22,08	м.куб/сут
t_5	250	дн.
t_6	200	дн.
K_4	3,Е-07	мЗв/Бк

Результаты расчета дозы облучения тритием профессионального работника

Величина концентрации трития	Единица измерения	Примечание
$Q_1 = 6, E+08$	Бк/м.куб воды	Содержание трития в технической воде
$Q_2 = 5, E+03$	Бк/м.куб воздуха	Содержание в воздухе производственного помещения
$Q_3 = 5, E+02$	Бк/м.куб воздуха	Останется в воздухе производственного помещения с учетом вентиляции
$Q_4 = 6, E+03$	Бк/чел. за смену	Поступление в организм с вдыхаемым воздухом
$Q_5 = 6, E+03$	Бк/чел. за сут.	Останется в организме работника после нахождения его на открытом воздухе
$Q_6 = 2, E+02$	Бк за сутки	Перейдет в квартиру работника за сутки
$Q_7 = 6, E+03$	Бк/чел за сутки	Накопится в организме работника за одни сутки
$Q_8 = 4, E+02$	Бк/м.куб	Накопится в квартире работника за год
$Q_9 = 1, E+06$	Бк/чел. за год	Накопится в организме работника за год
$Q_{10} = 3, E+06$	Бк/чел за год	Накопится в организме члена семьи работника за год
$Q_{11} = 2, E+06$	Бк/чел. за год	Накопится в организме человека, проживающего в соседней квартире
$D_1 = 4, E-01$	мЗв в год	Доза накопленная работником
$D_2 = 9, E-01$	мЗв в год	Доза накопленная членом семьи работника
$D_3 = 5, E-01$	мЗв в год	Доза накопленная человеком, проживающим в соседней квартире

Результаты расчета (таблица 2) внутреннего облучения человека тритием по рассмотренной выше модели показывают, что этот путь радиационного воздействия приводит к необоснованному облучению населения. Коллективная доза облучения населения (в расчете на 1000 жителей) неработающего на АЭС, может быть оценена в 0,7 чел. Зв в год. По всей видимости, данное значение дозы явно занижено, так как расчет произведен для одного профессионального работника, проживающего в жилом доме. На самом деле в одном подъезде жилого дома может проживать несколько профессиональных работников атомной станции, каждый из которых является потенциальным переносчиком трития в жилой фонд.

Инструментальные методы отбора трития из воздуха

Отбор проб методом вымораживания

Наиболее простым методом отбора проб влаги из воздуха является метод вымораживания. Практически мгновенное соединение трития с молекулами воды дает основание полагать, что его концентрация в воздухе, с учетом относительной влажности, будет пропорциональна его концентрации в воздухе. Для определения концентрации трития в воздухе достаточно собрать иней из обычной морозильной камеры и определить в полученном объеме воды концентрацию трития методом жидкостно-сцинтилляционной спектроскопии.

Отбор пробы методом настоя

Метод настоя основан на замещении атомов водорода в молекуле воды на атомы трития. Для отбора пробы таким методом достаточно в помещении с тритированным воздухом установить открытую кювету с налитой в нее чистой водой (т.е. водой, не содержащей трития). Спустя некоторое время, измерить концентрацию трития во всем объеме воды:

$$Q_{12} = \frac{Q_{13} \times V_4 \times K_6}{S \times t_7 \times K_5}; \text{ Бк/ м}^3 \text{ воздуха} \quad (16)$$

где:

Q_{13} – концентрация трития в пробе, Бк/л.

V_4 – объем пробы, мл.

S – площадь открытой поверхности воды в кювете, см².

t_7 – время экспозиции кюветы, час.

K_5 – относительная влажность воздуха, %.

$K_6 = 1,5 \cdot 10^2$ – эмпирический коэффициент, учитывающий скорость насыщения воды в кювете и связь между выбранными единицами измерения.

Метод индивидуальной дозиметрии

Используя свойство трития проникать через полупрозрачные экраны для индивидуальной дозиметрии удобно применить тот же метод настоя, но с закрытой поверхностью кюветы. Кюветы выбираются небольших размеров удобно носимые на руке, на спецодежде профессионального работника. Верхняя поверхность кюветы закрывается тонкой целлофановой пленкой, достаточной прочности. Для полиэтиленовой пленки толщиной 0,15мм, расчеты производить по:

$Q_{14} = Q_{12} \times K_7$; для полиэтиленовой пленки толщиной 0,1мм, где $K_7 = 90$, коэффициент проникновения трития через полиэтиленовую пленку толщиной 0,1 мм.

$Q_{15} = Q_{12} \times K_8$; для полистироловой пленки толщиной 0,02мм, где $K_8 = 40$, коэффициент проникновения трития

через полиэтиленовую пленку толщиной 0,02 мм.

Практические результаты измерений

Проверка модели переноса трития с ядерно-опасных предприятий во внешнюю среду была проведена в трех регионах. Содержание трития как в воздухе жилого фонда работников этих предприятий, так и в организме отдельных лиц определялось случайным образом. На первом этапе отработки модели важно было подтвердить, что модель работоспособна и основным поставщиком трития во внешнюю среду является персонал ядерно-опасных производств. Результаты проведенных измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Концентрации трития в организме человека и воздухе жилого фонда.

№ региона	Расстояние от объекта, км				Концентрация трития в организме человека, Бк
	< 7	30	150	> 200	
1	2 – 13 Бк/м ³	1 – 2 Бк/м ³	нет данных	< 1 Бк/м ³	2 500
2	1 – 60 Бк/м ³	2 – 4 Бк/м ³	< 1 Бк/м ³	< 1 Бк/м ³	4 400
3	2 – 30 Бк/м ³	нет данных	< 1 Бк/м ³	нет данных	нет данных

Следует отметить, что после запрещения термоядерных испытаний, концентрация трития в атмосфере и биосфере стала значительно снижаться. На начало 90-х годов можно считать, что содержание трития в атмосферном воздухе не превышало 0,2 – 0,5 Бк/м³, а в организме человека менее 2,8 Бк/на все тело. [8]

Данные, представленные в таблице 2 свидетельствуют о том, что в районах расположения ядерно-опасных предприятий содержание трития как в атмосферном воздухе жилого фонда, так и в организме человека, проживающего в этом регионе наблюдается значительное превышение фоновых уровней. По мере удаления от ядерно-опасного предприятия концентрация трития в атмосферном воздухе снижается до своего фонового значения.

Данные не имеют большую статистическую достоверность, однако, сам факт присутствия трития как в организме человека, так и в воздухе жилого фонда работников ядерно-опасных предприятий, дает основание предположить, что в организационно-технических процедурах по радиационной безопасности имеется серьезный пробел.

В процессе отработки модели переноса (в частности п. 5.2, 5.3) были получены некоторые зависимости насыщения водных растворов тритием. Исследованы зависимости степени насыщения раствора от:

- объема насыщаемой воды;
- геометрических размеров кюветы с водой;
- продолжительности насыщения;
- площади насыщаемой поверхности;
- состава водного раствора;
- толщины и материала пленки, через которую диффундирует тритий.

Полученные зависимости подтверждают сложный характер перехода трития из одной “камеры” в другую, однако, принятое ранее допущение о линейной зависимости не вносит существенной ошибки в результаты расчета.

Заключение

- Процесс переноса трития персоналом с ядерно-опасных предприятий во внешнюю среду имеет место на всех объектах, где существует открытый контакт воды, содержащей тритий с воздухом производственных помещений.
- Загрязнение тритием жилого фонда происходит в основном там, где проживают профессиональные работники этих предприятий. С удалением от предприятия уровень загрязнения снижается.
- Уровни необоснованного радиационного облучения населения могут достигать годового предела дозы.
- Проблема переноса трития в среду обитания человека является частным случаем воздействия ионизирующих излучений искусственно созданных самим же человеком. Модель в равной степени может быть реализована при расчете дозы от таких нуклидов как C-14, Sr-90, Cs-137, Co-60 и т.д.
- Значительное накопление трития в организме профессионального работника требует разработки защитных мер по ограничению такого накопления и созданию определенных барьеров защиты на самом предприятии.

Литература

1. Серия изданий по безопасности №75-INSAG-3. Основные принципы безопасности атомных электростанций. Доклад международной группы по ядерной безопасности. Вена, 1989.
2. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99, СП, 2.6.1.758-99, Минздрав России 1999.
3. Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. М., Энергоатомиздат, 1986.
4. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. Интератомэнерго, М., Энергоатомиздат, 1984.
5. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества. Справочник. Л., Химия, 1990.
6. Тритий. Тематический сборник переводов. М., 1971.
7. Атомные электрические станции. Сборник статей. М., Энергоиздат, 1982.
8. Экология и безопасность. Справочник. Т-2., ВНИИПИ, Москва, 1993.
9. А.А. Моисеев, В.И. Иванов. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. Энергоатомиздат, 1990.