

Тема 9. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИСТОЧНИКОВ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Явление радиоактивности. Основной закон радиоактивного распада

Критерием устойчивости атомных ядер является соотношение между числом протонов и нейтронов. С ростом Z силы кулоновского отталкивания протонов резко возрастают. Для компенсации этого отталкивания ядерным притяжением число нейтронов должно возрасти быстрее числа протонов.

Несмотря на то, что чем больше массовое число, тем выше доля нейтронов в ядре, ядра тяжелых элементов становятся все менее устойчивыми. Поэтому у ядер атомов химических элементов, расположенных за свинцом в периодической системе Менделеева, наблюдается процесс естественного распада.

Процесс самопроизвольного превращения неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающихся испусканием элементарных частиц и излучением квантов энергии, называется радио-активностью вещества.

Радиоактивность, наблюдающаяся у изотопов, существующих в природных условиях, называется естественной. Радиоактивность изотопов, полученных посредством ядерных реакций, называется искусственной.

Вещество является радиоактивным, если оно содержит радионуклиды. Под радионуклидом понимают радиоактивное ядро с присущими ему Z и A_m .

Распад большого количества ядер любого радиоактивного вещества подчиняется статическому закону, в котором учитывается, что распад данного ядра является случайным событием, имеющим определенную вероятность.

Если в начальный момент времени t_0 в веществе содержалось N_0 радиоактивных ядер, то спустя время t их число станет равным N

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – количество ядер в данном объеме вещества в момент времени $t = 0$;

N – количество ядер в том же объеме вещества в момент времени t ;

λ – постоянная радиоактивного распада.

Постоянная λ имеет смысл вероятности распада ядер за единицу времени. Это отношение доли ядер dN/N , распадающихся за интервал времени dt , к этому интервалу времени:

$$\lambda = (1/N) \cdot (dN/dt).$$

Постоянная радиоактивного распада показывает среднее время жизни радиоактивного ядра, оцениваемое выражением

$$\lambda = \frac{1}{\tau},$$

где τ – продолжительность жизни радионуклида.

Для характеристики устойчивости ядер относительно распада пользуются понятием периода полураспада $T_{1/2}$. Он равен времени, в течение которого исходное количество ядер данного вещества распадается наполовину

Периоды полураспада у различных радионуклидов могут быть весьма различными - от долей секунды до сотен и тысяч лет. Очевидно, спустя время $T_{1/2}$, $2T_{1/2}$, $3T_{1/2}$, $4T_{1/2}$ и т.д. будет оставаться соответственно $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$ часть радионуклидов от их начального N_0 .

Процесс радиоактивного распада сопровождается выделением энергии и возбуждением других процессов в веществе. При этом выполняются законы сохранения энергии, электрического заряда и другие законы материального мира.

Число распадов ядер данного вещества в единицу времени характеризует активность вещества. Активность определяется величиной

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \text{ или } A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

где $A_0 = \lambda \cdot N_0$ – радиоактивность вещества в начальный момент времени.

Из сравнения выражений (1.8) и (1.10) следует, что активность вещества с течением времени уменьшается по закону радиоактивного распада, но в любой момент времени ее уровень существенно зависит от начальной активности:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0 = (\ln 2 / T_{1/2}) \cdot N_0 = (0,693 / T_{1/2}) \cdot N_0,$$

Начальная активность в свою очередь определяется начальным содержанием радионуклидов N_0 и периодом полураспада $T_{1/2}$. При большом значении периода полураспада $T_{1/2}$ спад активности вещества происходит медленно, а при малом значении $T_{1/2}$ – наоборот, быстро. Вместе с тем при одном и том же значении N_0 начальная активность при малом значении $T_{1/2}$ выше, чем при большом значении.

За единицу измерения активности в системе СИ принят беккерель (Бк). Это активность данного количества вещества, если в нем за одну секунду происходит распад одного радионуклида. Эта единица активности мала, поэтому используются кратные ей единицы – килобеккерель (кБк) или мегабеккерель (МБк). Часто используется внесистемная единица активности – кюри (Ки). Та-кой активностью обладает один грамм радия, в котором за одну секунду происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов. Это большая единица, поэтому на практике применяют меньшие единицы – милликюри (мКи) и микрокюри (мкКи). Взаимосвязь между единицами радиоактивности:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк};$$

$$1 \text{ мКи} = 37 \text{ МБк};$$

$$1 \text{ мкКи} = 37 \text{ кБк}.$$

Если радионуклиды распределены по объему вещества (в продуктах питания, питьевой воде и т.д.) или по его поверхности, то пользуются соответственно объемной $A_{об}$ и поверхностной A_s активностью. Тогда $A_{об}$ измеряется в Бк/ m^3 , Бк/л или Ки/л, а A_s в Бк/ m^2 , Ки/ m^2 . Для оценки

загрязнения продуктов питания используют также удельную активность A_m , измеряемую в Бк/кг или Ку/кг.

Массу радионуклида m активностью A можно определить из выражения

$$m = k \cdot A_m \cdot T_{1/2} \cdot A, \quad (1.12)$$

где A_m – атомная масса радионуклида;

k – константа, зависящая от избранных единиц измерения.

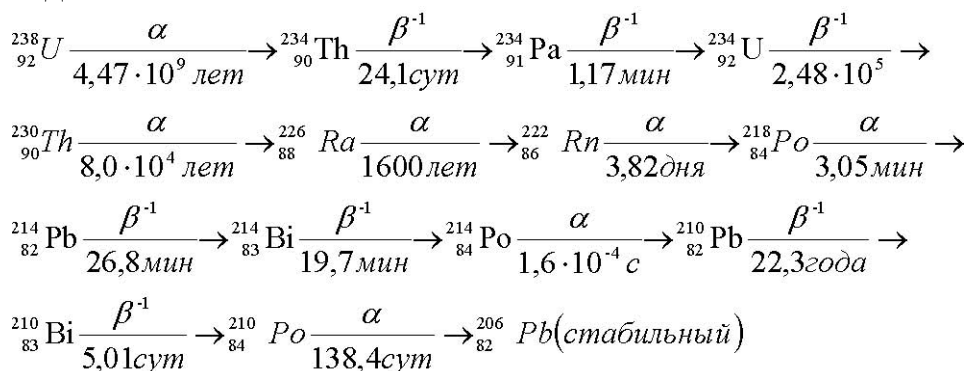
Если период полураспада задан в сутках, активность – в беккерелях, а масса в граммах, то

$$K = 2,07 \cdot 10^{-19}.$$

Характеризуя в целом устойчивость ядер, следует заметить, что она снижается с возрастанием их массового числа. Естественная радиоактивность легких и средних ядер – редкое явление. Среди тяжелых атомов, начиная с $A_m > 200$, естественная радиоактивность есть универсальное явление.

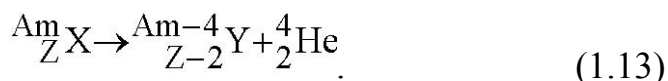
Всем трансурановым элементам присуща радиоактивность с периодом полураспада, быстро уменьшающимся при возрастании Z . Основными видами радиоактивного превращения трансурановых элементов являются альфа-распад и бета-распад. Цепочку радиоактивных превращений принято называть радиоактивным рядом. Совокупность химических элементов, образующих радиоактивный ряд, называется радиоактивным семейством.

Все природные радиоактивные элементы, расположенные в последних рядах таблицы Менделеева, являются членами трех радиоактивных семейств. Другим радиоактивным семейством (после семейства урана) является семейство тория, третьим – семейство актиния. Радиоактивное семейство искусственных радиоактивных изотопов начинается трансурановым элементом-нептунием. Схема радиоактивного распада ядра урана-238 приведена ниже.



1.3. Альфа-распады, бета-распады и гамма-излучения радиоактивных ядер

Альфа-распадом называется самопроизвольное испускание радиоактивным ядром альфа-частиц, представляющих ядра атома гелия. Распад протекает по схеме



В выражении (1.13) буквой X обозначен химический символ распадающегося (материнского) ядра, буквой Y – химический символ образующегося (до-

черного) ядра. Как видно из схемы (1.13), атомный номер дочернего ядра на две, а массового числа – на четыре единицы меньше, чем у исходного ядра.

Заряд альфа-частицы положительный. Альфа-частицы характеризуют двумя основными параметрами: длиной пробега (в воздухе до 9 см, в биологической ткани до 10^{-3} см) и кинетической энергией в пределах 2...9 МэВ.

Альфа-распад наблюдается только у тяжелых ядер с $A_m > 200$ и зарядовым числом $Z > 82$. Внутри таких ядер происходит образование обособленных частиц из двух протонов и двух нейтронов. Обособлению этой группы нуклонов способствует насыщение ядерных сил, так что сформировавшаяся альфа-частица подвержена меньшему действию ядерных сил притяжения, чем отдельные нуклоны. Одновременно альфа-частица испытывает большее действие кулоновских сил отталкивания от протонов ядра, чем отдельные протоны. Этим объясняется вылет из ядра альфа-частиц, а не отдельных нуклонов.

В большинстве случаев радиоактивное вещество испускает несколько групп альфа-частиц близкой, но различной энергии, т.е. группы имеют спектр энергии. Это обусловлено тем, что дочернее ядро может возникнуть не только в основном, но и в возбужденных состояниях с различными энергетическими уровнями.

Возбужденное ядро может испустить также какую-либо частицу: протон, нейтрон, электрон или альфа-частицу. Оно может и отдать избыток энергии одному из окружающих ядро электронов внутреннего слоя. Передача энергии от ядра к самому близкому электрону К-слоя происходит без испускания гамма-кванта. Получивший энергию электрон вылетает из атома. Этот процесс называется внутренней конверсией. Образовавшееся вакантное место заполняется электронами с вышележащих энергетических уровней. Электронные переходы во внутренних слоях атома приводят к испусканию рентгеновских лучей, имеющих дискретный энергетический спектр (характеристических рентгеновских лучей). Всего известно около 25 естественных и около 100 искусственных альфа-радиоактивных изотопов.

Бета-распад объединяет три вида ядерных превращений: электронный и позитронный распады, а также электронный захват или К-захват. Первые два вида превращений состоят в том, что ядро испускает электрон и антинейтрино (при – распаде) или позитрон и нейтрино (при – распаде). Электрон (позитрон) и антинейтрино (нейтрино) не существуют в атомных ядрах. Эти процессы происходят путем превращения одного вида нуклона в ядре в другой – нейтрона в протон или протона в нейтрон.

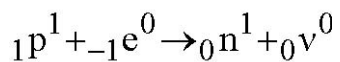
При отрицательном бета-распаде зарядовое число радионуклида увеличивается на единицу, а при положительном бета-распаде – уменьшается на единицу.

Поскольку при распаде из ядра вылетают две частицы, а распределение между ними общей энергии происходит статистически, то спектр энергии электронов (позитронов) является непрерывным от нуля до максимальной величины E_{\max} называемой верхней границей бета-спектра. Для бета-

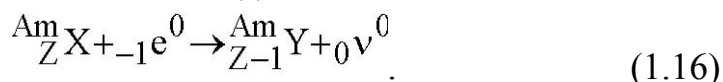
радиоактивных ядер величина E_{\max} заключена в области энергии от 15 кэВ до 15 МэВ. Длина пробега бета-частицы в воздухе до 20 м, а в биологической ткани до 1,5 см.

Бета-распад обычно сопровождается испусканием гамма-лучей. Причина их возникновения та же, что и в случае альфа-распада: дочернее ядро возникает не только в основном (стабильном), но и в возбужденном состоянии. Переходя затем в состояние меньшей энергии, ядро испускает гамма-фотон.

При электронном захвате происходит превращение одного из протонов ядра в нейтрон:



При таком превращении исчезает один из ближайших к ядру электронов (электрон К-слоя атома). Протон, превращаясь в нейтрон, как бы «захватывает» электрон. Отсюда произошел термин «электронный захват». Особенностью этого вида β -распада является вылет из ядра одной частицы – нейтрино. Схема электронного захвата имеет вид



Электронный захват в отличие от бета-распадов всегда сопровождается ха-рактеристическим рентгеновским излучением. Последнее возникает при пере-ходе более удаленного от ядра электрона на появляющееся вакантное место в К-слое. Длина волн рентгеновских лучей в диапазоне от 10 до 10 м. ? ?

Таким образом, при бета-распаде сохраняется массовое число ядра, а его заряд изменяется на единицу.

К настоящему времени известно около 900 бета-радиоактивных изотопов. Из них только около 20 являются естественными, остальные получены искусственным путем.

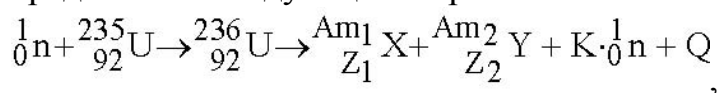
Все виды радиоактивного распада сопровождаются гамма-излучением. Гамма-лучи – коротковолновое электромагнитное излучение, которое не относится к самостоятельному виду радиоактивности. Экспериментально установлено, что гамма-лучи испускаются дочерним ядром при переходах ядер из возбужденных энергетических состояний в основное или менее возбужденное. Энергия гамма-лучей равна разности энергий начального и конечного энергетических уровней ядра. Длина волны гамма-лучей не превышает 0,2 нанометра.

Процесс гамма-излучения не является самостоятельным типом радиоактивности, так как он происходит без изменения Z и Am ядра.

Деление тяжелых ядер. Цепная реакция деления

Одним из видов ядерных реакций является деление тяжелого атомного ядра (и др.) на осколки под действием тепловых нейтронов. Деление ядер изотопа вызывается только быстрыми нейтронами с энергией, большей 1 МэВ.

Схему реакции деления ядра урана-235 при воздействии тепловым нейтроном можно представить следующим образом:



где K – количество нейтронов, высвободившихся в процессе деления (равное 2 или 3);

Q – выделившаяся энергия.

Время, в течение которого происходит распад одного ядра с выделением осколков деления, нейтронов и энергии называют первым актом деления или первым поколением.

Дальнейшие исследования показали, что ядро урана в большинстве случаев делится несимметрично. При этом наиболее вероятным является деление на осколки, массы которых относятся как 2:3. Так при делении ядер урана-235 тепловыми нейтронами распределение осколков по массе может быть представлено кривой, показанной на рис.

При делении каждого ядра урана высвобождается несколько нейтронов. Относительное количество нейтронов в тяжелых ядрах заметно больше, чем в легких. Поэтому образовавшиеся осколки оказываются сильно перегруженными нейтронами. При этом большинство нейтронов испускается мгновенно, но часть их (около 0,8%), получившая название запаздывающих, испускается медленно. На каждый акт деления ядра урана приходится 2-3 выделившихся нейтрона. Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны вызывают новые акты деления, т.е. цепную реакцию деления. Минимальное условие поддержания цепной реакции состоит в том, чтобы в среднем при делении каждого ядра возникал хотя бы один нейтрон, вызывающий деление следующего ядра.

Если в среде, содержащей уран-235, разделилось одно ядро, то в среднем при этом высвободится 2 нейтрона, которые могут вызвать деление двух ядер во втором поколении и т.д. После смены n поколений в среде может быть нейтронов, которые потенциально могут вызвать деление такого же количества ядер. Например, для расщепления 2 г урана-235 требуется ?

? нейтронов, т.е. оно произойдет после смены 72 поколений.

Выход нейтронов в ядерной реакции деления характеризуют коэффициентом размножения нейтронов. Коэффициент размножения нейтронов K – это отношение числа нейтронов i -го поколения к числу нейтронов предшествующего поколения, т.е.

?

Скорость нарастания реакции определяется величиной коэффициента размножения нейтронов и средним временем жизни одного поколения нейтронов. Система, в которой $K=1$, называется критической системой. В этом случае цепная реакция идет с постоянным числом нейтронов, что имеет место при нормальной работе атомного реактора.

Если К_{то} система называется подкритической. Цепная реакция в ней нарастает или затухает при запуске или остановке реактора, что соответствует запуску или остановке атомного реактора.

При $K > 1$ система называется надкритической. В ней идет цепная реакция с нарастающим числом нейтронов. При этом из-за малого значения времени жизни одного поколения число нейтронов увеличивается очень быстро и реакция принимает взрывной характер, что характерно для ядерного взрыва.

При рассмотрении цепной реакции деления необходимо учитывать, что ядра различных элементов с различной вероятностью захватывают нейтроны, имеющие одинаковую энергию. Например, тепловые нейтроны вызывают деление ядер урана-235, а быстрые нейтроны, кроме деления ядер урана-235 (но с меньшей вероятностью), могут вызвать деление урана-238. Резонансные нейтроны, хотя и хорошо поглощаются ядрами урана-238, но не вызывают их деления, а приводят к ряду радиоактивных превращений исходного ядра, конечным этапом которых являются ядра плутония-239.

Однако такое представление о цепной реакции является идеализированным, так как в любой реальной системе возможен выход вторичных нейтронов из лавины вследствие следующих процессов: вылета нейтронов из зоны реакции через поверхность; захвата нейтронов ядрами примесей, продуктами реакции и т.д.; захвата нейтронов ядрами урана, которые, тем не менее, не приводят к реакции деления.

Ядерная цепная реакция может протекать при выполнении ряда условий:

1. Уран-238 должен быть, по возможности, очищен от примесей с целью уменьшения захвата нейтронов и образования ядер плутония-239.

2. В случае цепной реакции на быстрых нейтронах необходимо обогащение естественного урана-238 изотопом урана-235 ($\approx 15\%$).

3. Если цепная реакция планируется на тепловых нейтронах то:

а) увеличивают процент обогащения урана-238 (более 20 %);

б) применяют замедлители, которые преобразуют быстрые нейтроны в тепловые. Это происходит за счет отбора кинетической энергии у быстрых нейтронов до энергии тепловых. В качестве замедлителей применяются вещества, имеющие малую плотность. Такими веществами являются тяжелая вода D_2O (двуокись дейтерия, имеющая плотность $\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$) и углерод С (в виде графита, $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$).

4. Необходимое понижение вероятности радиационного захвата нейтронов, достигается тем, что вместо однородной смеси урана и замедлителя (гомогенная система) применяются чередующиеся блоки этих веществ (гетерогенная система). При ее использовании, образовавшийся в уране быстрый нейтрон успевает уйти в замедлитель до достижения им резонансной энергии. Там он становится тепловым, после чего возвращается обратно в уран, где вступает в цепную реакцию. В гомогенной системе цепная реакция в естественном уране может протекать только при использовании самого дорогого замедлителя - тяжелой воды. В гетерогенной системе она идет в том случае, когда замедлителем служит более дешевый графит.

5. Для осуществления цепной реакции наиболее выгодна система, форма которой близка к сферической. Для такой системы утечка нейтронов через поверхность будет минимальной.

6. Цепная реакция будет протекать лишь в том случае, когда ядерного топлива будет достаточно. Минимальная масса топлива, при которой еще протекает ядерная реакция, называется критической массой. Значение критической массы зависит от геометрии ядерного топлива, ее структуры и материала отражателя нейтронов. Например, для сферы из чистого урана-235 критическая масса равна 9 кг. Но если тот же уран прослоен тонкими полиэтиленовыми пленками и окружен бериллиевым отражателем, то критическая масса снижается до 240 г. Отражатель служит для возвращения нейтронов в зону реакции.

Таким образом, цепную реакцию деления можно осуществить с использованием разных видов топлива и замедлителя:

1. естественного и слабообогащенного урана с тяжеловодным или графитовым замедлителем на тепловых нейтронах;
2. сильнообогащенного урана или искусственного ядерного топлива (плутония) без замедлителя на быстрых нейтронах.

Понятие о ядерном реакторе и принципе его работы

Ядерный реактор – это устройство, в котором осуществляется управляемая ядерная цепная реакция деления, сопровождающаяся выделением тепла и используемая для производства электроэнергии.

Атомные реакторы классифицируются по двум основным признакам: по взаимному расположению ядерного топлива и замедлителя (гетерогенные или гомогенные); виду нейтронов, участвующих в реакции деления (реакторы, работающие на тепловых или быстрых нейтронах).

Первая в мире атомная электростанция с реактором на тепловых нейтронах с замедлителем из графита была пущена в бывшем СССР в г. Обнинске в июне 1954 г.

Наиболее распространенными были реакторы большой мощности канальные (РБМК) и водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). Реакторы типа РБМК работают на Игналинской, Смоленской, Чернобыльской АЭС. Водо-водяной энергетический реактор работает на Ровенской АЭС. Эти четыре АЭС размещаются вблизи государственной границы Республики Беларусь и в случае аварии на любой из них часть территории нашей страны будет загрязнена радиоактивными веществами.

Активная зона представляет собой цилиндрическую кладку, состоящую из отдельных, собранных в вертикальные колонны графитовых блоков, выполняющих роль замедлителя. В графитовых колонах проходит 1660 вертикальных технологических каналов, предназначенных для кассет с ядерным топливом. Ядерное топливо представляет собой таблетки черного цвета диаметром около 1 см и высотой – 1,5 см. Они содержат 2% изотопа 235 и 98% урана-238. Во всех случаях при таком составе ядерного топлива ядерный взрыв произойти не может, так как для лавинообразной

стремительной реакции деления, характерной для ядерного взрыва, требуется концентрация урана-235 более 60%.

Двести таблеток ядерного топлива загружаются в трубки длиной 3,5 м, диаметром 1,35 см, изготовленной из циркониевого сплава. Такая трубка называется тепловыделяющим элементом (ТВЭЛ). Тепловыделяющие элементы собираются в кассеты, называемые «сборками»

Общая масса топлива, загружаемого в РБМК, составляет 190 т. В процессе работы реактора ТВЭЛы охлаждаются потоками теплоносителя, проходящими по технологическим каналам. В качестве теплоносителя используется обыкновенная вода.

Активную зону реактора окружают отражателем нейтронов, способствующим уменьшению утечки нейтронов из активной зоны путем их отражения обратно в зону.

Для управления ядерной реакцией, происходящей в ТВЭЛлах, в специальные каналы вводятся регулирующие стержни, которые могут свободно перемещаться по специальным каналам.

Вокруг активной зоны реактора располагается биологическая защита от мощных потоков нейтронов, а также от альфа-, бета- и гамма-излучений. В качестве многослойного слоя биологической защиты используется углеродистая сталь, песок, бетон, галька и вода.

Принцип работы реактора типа РБМК состоит в следующем. В результате деления ядер урана-235 вторичные быстрые нейтроны выходят из ТВЭЛов и попадают в графитовый замедлитель. Проходя по замедлителю, они теряют часть своей энергии и, уже являясь тепловыми, вновь попадают в ТВЭЛы и участвуют в дальнейшем процессе деления ядер урана-235. Энергия цепной ядерной реакции выделяется в виде кинетической энергии осколков деления, вторичных нейтронов, альфа- и бета-частиц, гамма-квантов и некоторых других элементарных частиц. В результате этого происходит разогрев ТВЭЛов и графитовой кладки замедлителя. Теплоноситель, в качестве которого используется вода, двигаясь в технологических каналах снизу вверх под давлением 70 атм, охлаждает активную зону реактора. В результате происходит нагрев теплоносителя до 284 °С. При этом происходит частичное превращение теплоносителя в пар.

Пароводяная смесь попадает по трубопроводам в сепаратор, который служит для отделения воды от пара (рис).

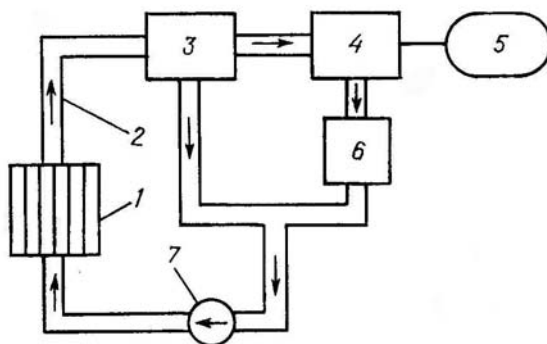


Рис. Принципиальная схема АЭС с РБМК: 1 – активная зона реактора; 2 – поток теплоносителя; 3 – сепаратор; 4 – паровая турбина; 5 – генератор электрического тока; 6 – технологический конденсатор; 7 – циркуляционный насос.

Насыщенный пар под давлением попадает на лопасти турбины, связанной с генератором электрического тока. Оставшийся пар направляется в технологи-ческий конденсатор, конденсируется, смешивается с теплоносителем, посту-пающим из сепаратора, и под давлением, создаваемым циркуляцион-ным насо-сом, вновь поступает в технологические каналы активной зоны реактора.

Во время работы реактора состав активной зоны значительно изменяется за счет появления новых радионуклидов, разнообразных радиоактивных пре-вращений. Эти процессы приводят к снижению реактивности реактора. Если снижение реактивности обусловлено появлением в активной зоне нуклидов, хорошо поглощающих нейтроны, то такое снижение реактивности называют отравлением реактора. Если в реакторе появляются нуклиды, сравнительно слабо поглощающие нейтроны, то образуются шлаки, а сопутствующий про-цесс снижения реактивности называют шлакованием.

Процессы отравления и шлакования непосредственно связаны с дополни-тельной потерей нейтронов в активной зоне, поэтому для компенсации проис-ходящего снижения реактивности необходимо увеличить начальную загрузку ядерного топлива по сравнению с критическим значением.

Оперативное изменение коэффициента размножения нейтронов, удержа-ние реактора в критическом и подкритическом режимах осуществляется систе-мой управления и защиты (СУЗ), которая выполняет три основные функции:

- а) компенсацию избыточной реактивности;
- б) изменение мощности реактора, включая его пуск и остановку, а также поддержание мощности при случайных колебаниях параметров;
- в) аварийную защиту реактора (быстрое и надежное гашение цепной реак-ции деления).

В соответствии с функциями СУЗ поглощающие стержни разделяют на три группы: стержни автоматического регулирования, компенсирующие стержни и стержни аварийной защиты.

Стержни автоматического регулирования предназначены для регулировки тепловой мощности реактора. При нормальной работе реактора, т.е. при отрицательном значении температурного коэффициента, стержни выделены из активной зоны и находятся в крайнем верхнем положении. Если температурный коэффициент становится положительным, тогда стержни автоматической регулировки вводятся в активную зону.

Компенсирющие стержни предназначены для компенсации избыточной реактивности в реакторе. Во время работы реактора эти стержни введены в активную зону и по мере его эксплуатации выводятся из нее. Полностью будут выведены из зоны после того, когда ядерное топливо потеряет реактивность и необходима будет его замена.

Стержни аварийной защиты при нормальной работе реактора выведены из активной зоны и находятся в крайнем верхнем положении. Вводятся в активную зону с максимальной скоростью для остановки реактора в аварийной ситуации.

Достоинством реактора РБМК является возможность замены ТВЭЛов без остановки реактора и возможность поканального контроля его состояния. К недостаткам реактора РБМК следует отнести низкую стабильность работы на малых ядерных уровнях мощности; недостаточное быстродействие системы управления и использование одноконтурной схемы. Применение одноконтурной схемы в теплоотводе приводит к возможному радиоактивному загрязнению турбогенератора в связи с небольшим, но постоянным выносом радиоактивности из технических каналов реактора в паровой тракт турбины. Это затрудняет профилактическое обслуживание турбины и требует дополнительной радиационной защиты циркуляционного контура.

Естественный радиационный фон

Естественный радиационный фон есть неотъемлемый фактор окружающей среды, оказывающий существенное воздействие на жизнедеятельность человека. Эволюционное развитие показывает, что в условиях естественного фона обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности человека, животных, растений. Поэтому при оценке опасности, обусловленной ионизирующим излучением, крайне важно знать характер и уровни облучения от различных источников.

Естественное фоновое облучение человека обуславливается внешним и внутренним облучением. Внешнее облучение создается за счет воздействия на организм ионизирующих излучений от внешних по отношению к человеку источников излучения, а внутреннее - за счет воздействия на организм ионизирующих излучений радиоактивных нуклидов, находящихся внутри организма.

Космические излучения и изотопы земной коры создают естественный радиационный фон, который характерен для каждой местности. Различают первичное и вторичное космическое излучение.

Первичное космическое излучение представляет собой поток частиц, попадающих в земную атмосферу из межзвездного пространства, солнечной системы. Оно состоит из протонов (примерно 90%) и альфа-частиц (около

10%). В меньших количествах присутствуют нейтроны, электроны, ядра легких элементов. Большая часть первичного космического излучения возникает в пределах нашей Галактики. Энергия частиц первичного излучения достигает 10^{12} – 10^{14} МэВ. Кроме того, при солнечных вспышках возникает солнечное космическое излучение, которое приводит к увеличению дозы облучения на поверхности Земли.

Вторичное космическое излучение образуется в результате взаимодействия частиц первичного космического излучения с ядрами атомов, входящих в состав воздуха. Оно содержит практически все известные в настоящее время элементарные частицы. У поверхности Земли оно состоит в основном из фотонов, электронов и позитронов с энергией до 100 МэВ.

Мощность космических лучей, достигающих земной поверхности, зависит от географической широты и высоты над уровнем моря. Изменение мощности космических лучей в зависимости от географической широты обусловлено тем, что Земля похожа на гигантский магнит. Поэтому космические лучи, будучи заряженными частицами, отклоняются от экватора и собираются вместе в виде своеобразных воронок в области полюсов Земли. Области вблизи экватора, находящиеся на уровне моря, получают наименьшую дозу космического излучения, примерно равную 0,35 мЗв/год. На широте 50° доза космического излучения составляет 0,5 мЗв/год. Это обусловлено тем, что толстый слой атмосферы, содержащий воздух и пары воды, разрушая, замедляя и останавливая движение многих быстрых заряженных частиц, двигающихся из космоса.

С ростом высоты над уровнем моря мощность эквивалентной дозы космического излучения увеличивается. Например, на высоте 4500 м доза облучения из космоса составляет 3 мЗв/год, а на вершине пика Эвереста (8848 м над уровнем моря), соответствующий показатель равен 8 мЗв/год.

В земной коре имеются радиоизотопы, не успевшие распасться за время существования Земли. Они имеют период полураспада в миллиарды лет. Важнейшими из них являются калий-40, уран-238, торий-232. Тяжелые ядра этих изотопов до полного распада успевают образовать несколько промежуточных радиоактивных изотопов.

Как правило, природные радионуклиды сконцентрированы в гранитных породах гор. Радиоактивность известняковых и песчаных пород ниже. Средний уровень мощности дозы излучения на высоте 1 м над поверхностью известняка равен примерно 0,2 мЗв/год. На нашей планете существует ряд регионов, где существенно увеличен уровень радиации, исходящий из почв и гор – это Бразилия, Египет, Индия, Франция, остров Ниуэ и др. Так в ряде мест Бразилии, главным образом в прибрежных полосах земли, мощность дозы излучения из почвы и скальных пород составляет 5 мЗв/год. Примерно 1/6 часть населения Франции (7 млн. человек) живет в районах, где скальные породы представлены в основном гранитом, из-за чего радиационный фон повышен и мощность дозы составляет до 3,5 мЗв/год.

В индийских штатах Керала и Мадрас, проживает около 100 тысяч человек, которые получают дозу, в среднем равную 13 мЗв/год. Удельная радиоак-

тивность почвы выше при условии, что в ней содержится больше глинистых частиц и чернозема. Лесные и дерново-подзолистые почвы имеют меньшую радиоактивность. В Беларуси естественное облучение составляет около 2,4 мЗв/год.

В конце семидесятых годов прошлого столетия установлено, что наиболее весомым из всех естественных источников радиации является тяжелый газ радон-222 и его изотоп радон-220 (торон). Для удобства под радоном понимают оба указанных изотопа.

Радон-222 – это продукт радиоактивного превращения урана-238, а радон-220 – тория-232. Инертный тяжелый газ радон без цвета и запаха, в 7,5 раза тяжелее воздуха, растворяется в воде, точка кипения -65°C . «Дочерние» продукты распада радона также радиоактивные изотопы: полония, свинца и висмута. Сейчас известно, что радиационная доза в легких от дочерних продуктов во много раз больше, чем от самого радона.

Атомы любого газа, в том числе и радона, стремятся при малейшей возможности покинуть ту полость, которая их заключает в себя. Попадая в атмосферу, радон переносится воздушными массами, продолжая распадаться. Радон вносит вклад во внешнее и внутреннее облучение, так как может попадать в организм с вдыхаемым воздухом, пищей и водой. Следует помнить, что концентрация радона в жилых помещениях выше, чем снаружи. Это обусловлено содержанием радона в строительных материалах, поступлением в дома вместе с почвенным воздухом. В окружающую среду он затягивается из грунта вследствие разности давлений внутри и вне здания. Если дом стоит на богатом радиоактивными элементами грунте, то ситуация особенно неблагоприятна. Так как для строительства зданий используются природные материалы, то и в домах человек не избавлен от влияния ионизирующих излучений. Меньше всего радиоактивность в деревянных домах (до 0,5 мЗв/год), в кирпичных (до 1,5 мЗв/год), в железобетонных может достигать до 1,7 мЗв/год.

Особенно сильное воздействие радон оказывает на людей, находящихся в подвальных помещениях, и на первых этажах жилых зданий. Поэтому для того, чтобы уменьшить риск радонового облучения, необходимо проводить защитные мероприятия: использовать для полов специальные покрытия, тщательно проветривать помещения и др. К примеру, активная вентиляция помещения в течение 2-3 часов снижает концентрацию радона в 3-4 раза.

Часть радона в здании накапливается также из природного газа и воды. На кухню радон поступает с природным газом. В ванной концентрация радона может в три раза превысить таковую на кухне. Это объясняется значительным содержанием радона в воде, которое колеблется от долей единиц до 100 млн. Бк/м³. Много радона может содержать вода из глубоких подземных скважин или артезианских колодцев. В подземных водах его концентрация может составлять от 5 Бк/л до 1 МБк/л, т.е. изменяться в миллион раз. В водах озер и рек концентрация радона редко превышает 0,5 Бк/л, а в водах морей и океанов – не более 0,05 Бк/л.

При кипячении воды большая часть радона улетучивается. Поступающий с некипяченой водой радон быстро выводится из организма. Сырая вода с радоном, попавшая в желудочно-кишечный тракт, не столь вредна и опасна, как радон, попадающий в легкие. Поэтому распыляя воду в ванной с помощью душа, мы переводим радон из воды в воздух, а затем в легкие.

В связи с изложенным проблема радона приобрела существенное значение. До 1990 г. ни в одной стране не устанавливались нормативы содержания радона и продуктов его распада в жилых помещениях. В настоящее время в ряде стран приняты допустимые концентрации радона внутри помещений. Соответствующие нормативы предусмотрены для существующих и проектируемых зданий, которые приведены в табл.

Таблица

Нормативы концентрации радона в воздухе жилых помещений (Бк/м³)

Страна	Существующие здания	Проектируемые здания
Швеция	100	100
Финляндия	400	100
США	80	—
Канада	400	—
Германия	200	—
Великобритания	200	—
Россия	200	100
Республика Беларусь	200	100
Международная комиссия радиологической защиты	200	100

За счет радона и дочерних продуктов его распада средний житель планеты получает в среднем за год около 100 мбэр = 1 мЗв облучения.

В среднем порядка 60-70% эффективной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, поступает в организм с пищей, водой и воздухом. В частности, человек получает около 180 мкЗв в год за счет радиоактивного калия-40, который играет существенную роль в процессе его жизнедеятельности. Причем, калий-40 содержится почти во всех пищевых продуктах (табл).

Таблица

Содержание радиоактивного калия-40 в пищевых продуктах

Продукт	Содержание Ка-40, мкг/кг
1	2
Хлеб ржаной	2420
Макароны	1300
Крупа гречневая	1300
Рис	700
Горох	9070
Мука пшеничная, в/с	860
Молоко парное	1430
Масло сливочное	140
Творог	3720
Сыр	890
Мясо говяжье	3380
Сало свиное	1690
Рыба	2620
Картофель	4490
Капуста	3300
Свекла	3530
Морковь	2870
Шоколад	5630
Какао	11110

Из всевозможных способов внутреннего облучения наиболее опасно вдыхание загрязненного воздуха, потому что взрослый человек, занятый работой средней тяжести, потребляет воздуха 20 м³ (воды же всего 2 литра); радиоактивное вещество, поступающее таким путем в организм человека, быстро усваивается.

Примерно 2/3 эффективной эквивалентной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, обусловлены внутренним облучением. При этом одни и те же концентрации радионуклидов при внутреннем облучении более опаснее, нежели внешнего облучения. Это обусловлено тем, что при внутреннем облучении резко

увеличивается время облучения тка-ней организма, которое определяется сроком пребывания источника радиации в организме.

Научный комитет ООН по действию атомной радиации рекомендует считать суммарную эффективную дозу от естественных источников радиации равной 2 мЗв/год, в том числе от внутреннего облучения 1,65 мЗв/год, от внешнего – 0,35 мЗв/год.

Искусственные источники радиации

Рассмотренные выше уровни фонового облучения человека относятся к извечному распределению естественных источников радиации, сложившемуся на нашей планете. В процессе использования различных технологий человек может локально изменять распределение этих источников.

Добыча и переработка ископаемых перераспределяют природные радиоак-тивные элементы. Сжигание каменного угля приводит к выбросу в атмосферу аэрозолей, содержащих большое количество радиоактивных элементов. Зола угля идет на производство бетона, в результате чего бетонные здания имеют повышенный радиационный фон. Для производства кирпича также использу-ются некоторые природные материалы, которые дают вклад в радиационный фон (до 1 мЗв/год).

Другим источником антропогенного повышения радиационного фона является использование фосфорных удобрений в сельском хозяйстве, что приводит к проникновению радионуклидов из почвы в пищевые культуры. Применение удобрений в жидком виде ведет к загрязнению радиоактивными вещества-ми пищевые продукты. Сами предприятия, производящие фосфатные удобрения, способствуют повышению концентрации урана, радия, радона, тория в приземном воздухе в 2-14 раз по сравнению с их естественными концентрациями. Дополнительное загрязнение окружающей среды этими радионуклидами обусловлено сбросами жидких отходов фосфатных производств, а также использованием их побочных продуктов в строительной промышленности.

За последние несколько десятилетий человек научился использовать энергию атомного ядра разных целях. Она используется для создания атомного оружия, производства электроэнергии, в медицине и др. Испытания ядерного оружия и аварии на радиационно опасных объектах привели к дополнительному радиоактивному загрязнению всей планеты. Заброшенные на большую высоту радиоактивные вещества независимо от того, в какой географической точке произошел взрыв, концентрируются, в основном, между тридцатым и пяти-десятым градусом широты в северном и южном полушариях. При этом в север-ном полушарии концентрация в 3-4 раза больше, чем в южном. Радиоактивные вещества постепенно выпадают на земную поверхность большей частью с ливневыми дождями.

Существенную добавку в получаемую человеком дозу вносят медицинские процедуры: лучевая терапия, рентгеновские обследования, изотопная диагностика. Доза местного одноразового облучения при рентгенографии зубов составляет 30 мЗв, при рентгеноскопии желудка - 300

мЗв, при флюорографии - 3,7 мЗв. Радиоактивные изотопы широко используются в технике для неразрушающего контроля качества изделий.

Незначительные дозы прибавляются к естественному радиационному фону при просмотре телевизора, работе с дисплеем ЭВМ, при перелетах самолетом и т.д. Ежедневный в течение года трехчасовой просмотр телевизионных про-грамм увеличивает дозу облучения на 0,005 мЗв/год. Перелет самолетом на рас-стояние 2400 км добавит к дозе облучения 0,01 мЗв.

Дозы облучения человека от источников, дающих наибольший вклад в индивидуальную дозу, приведены в табл.

Таблица

Источники облучения	Индивидуальная доза, МЗв/год
Естественные источники	2,4
Медицинские процедуры	0,4
Испытания ядерного оружия	0,2
Авария на Чернобыльской АЭС	В среднем по Беларуси 2,2

Из табл видно, что из искусственных источников облучения основную «добавку» к естественному радиационному фону дают медицинские процедуры. Авария на Чернобыльской АЭС в среднем по Беларуси дала в первый год индивидуальную дозу, приблизительно равную естественному радиационному фону.