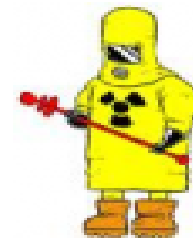


«Защита от ионизирующих излучений»

Тема 1.6:

Источники ионизирующего излучения на АЭС



**Энергетический факультет
2015/2016 учебный год**



Белорусский национальный
технический университет

Источники ионизирующего излучения на АЭС

Источники ИИ на АЭС

Вне зависимости от типа реактора, установленного на АЭС, и ее технологической схемы основными источниками излучения на АЭС являются:

- активная зона реактора;**
- трубопроводы и оборудование технологического контура;**
- бассейны выдержки с отработанным ядерным топливом;**
- системы спецводоочистки и их оборудование;**
- сама защита реактора.**

Состав ИИ на АЭС

ИИ на АЭС разделяется на первичное и вторичное.

Первичное

Излучение, образующееся в процессе деления ядер топлива в активной зоне:

- Мгновенные нейтроны деления
- Запаздывающие нейтроны
- Мгновенные γ -кванты
- Запаздывающие γ -кванты
- Образующиеся при этом осколки деления, β -частицы не являются сильнопроникающими излучениями и при проектировании защиты не учитываются. Нейтринное излучение практически не взаимодействует с веществом и опасности не представляет.

Вторичное

Излучение, возникающее в результате взаимодействия первичных нейтронов и γ -квантов с веществом:

- Фотонейтроны (γ, n)
- Нейтроны активации
- Захватное γ -излучение (n, γ)
- γ -излучение при неупругом рассеянии нейтронов (n, n')
- γ -излучение при (n, p) и (n, α) реакциях
- γ -излучение продуктов активации
- Аннигиляционное γ -излучение
- Тормозное излучение

Реактор как источник ионизирующих излучений

Реактор как источник ИИ

- При работе на полной мощности, в реакторе каждую секунду происходит $3 \cdot 10^{10}$ делений ядер ^{235}U на каждый 1 Вт тепловой мощности.
- Т.о. в реакторе с электрической мощностью 1000 МВт (тепловая мощность, соответственно, 3000 МВт) происходит 10^{20} дел/с.
- При каждом акте деления освобождается два-три нейтрона, из которых по крайней мере один не испытывает взаимодействия с ядрами атомов топлива и выходит за пределы активной зоны реактора. Кроме того, при делении испускается несколько γ -квантов. Продукты деления содержат очень большое количество радионуклидов, являющихся β - и γ -излучателями.

Реактор как источник ИИ

- Среди продуктов деления 20% приходится на благородные радиоактивные газы Kr, Xe, Ar и др. (Инертны, не связываются с другими веществами ни в помещениях АЭС ни на местности, короткоживущие ~10 дней);
- 10 % продуктов деления приходится на йоды - ^{131}I , ^{133}I , ^{135}I . (Химически активны, принимают разные формы – атомарная, молекулярная, органическая; наносят серьезный вред человеку, накапливаясь в щитовидной железе; короткоживущие ~10 дней); В ряду летучих продуктов деления помимо йода важен и цезий: ^{134}Cs , ^{137}Cs .
- Остальное – тугоплавкие элементы Sr, Ba и т.д. Долгоживущие (десятки лет). Загрязняющие поверхность и хорошо усваиваемые человеком в пищевой цепочке (Sr накапливается в организме, замещая Ca)

Реактор как источник ИИ

- Реактор, как работающий, так и остановленный, является опасным радиационным источником внешнего и внутреннего облучения.
- Активная зона работающего реактора является в основном источником нейтронного и γ -излучения
- Все перечисленные первичные и вторичные виды ИИ реализуются в реакторе. Однако вклад их в суммарную дозу различается.

Работающий реактор. Нейтроны

НЕЙТРОНЫ в работающем реакторе по происхождению можно подразделить на четыре основных группы:

1. **Мгновенные нейтроны** - сопровождают процесс деления ядер топлива
2. **Запаздывающие нейтроны** - испускаются сильно возбужденными ядрами осколков деления (в среднем в течение 1-2 мин. после деления, составляют $\sim 1\%$ от мгновенных)
3. **Нейтроны активации** - испускаются при радиоактивном распаде продуктов некоторых ядерных реакций (основная – реакция на быстрых нейтронах с пороговой энергией 9 МэВ: $^{17}\text{O} (n,p)^{17}\text{N}$, при этом короткоживущий нуклид ^{17}N распадается с испусканием нейтронов)
4. **Фотонейтроны** - образуются в результате (γ, n) -реакций на некоторых ядрах (^2D , ^9Be , ^{13}C , ^6Li).

С точки зрения радиационной безопасности основным источником опасности являются мгновенные нейтроны.

Работающий реактор. Гамма-излучение

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ работающего реактора:

1. **Мгновенное γ -излучение деления** - сопровождает процесс деления за время < 1 микросекунды, полная энергия мгновенного γ - излучения деления ^{235}U равна 7.5 МэВ, испускается как одним, так и несколькими квантами;
2. **γ -излучение короткоживущих продуктов деления**
Большая часть испускается из продуктов деления в первые 10 минут после деления. Энергетический спектр как у мгновенного γ -излучения;
3. **γ -излучение долгоживущих продуктов деления**
Малоэнергетичные кванты, испускаемые спустя 10 мин и более после деления. Из них около 88% имеют энергию меньше 1.8 МэВ; максимальная энергия – 2.8 МэВ;

Работающий реактор. Гамма-излучение

4. **Захватное γ -излучение** - сопровождает радиационный захват нейтрона (n, γ). Реакция захвата идет в основном на тепловых нейтронах при их взаимодействии с ядрами замедлителя, теплоносителя, конструкц. материалов (^{57}Fe , ^{58}Fe , ^{54}Cr , ^{59}Ni , H). Полная энергия испускаемых γ -квантов складывается из энергии связи захваченного нейтрона и некоторой доли его кинетической энергии. Спектр линейчатый, индивидуальный для активной зоны различного состава;
5. **γ -излучение при неупругом рассеянии нейтронов (n, n')**
Испускается в процессе прохождения быстрых нейтронов через вещество. В процессе неупругого рассеяния нейтрон передает часть своей энергии ядру и переводит его в возбужденное состояние. В течение очень короткого времени ($\sim 10^{-14}$ сек) ядро теряет свою энергию возбуждения путем испускания одного или нескольких γ -квантов;

Работающий реактор. Гамма-излучение

6. γ -излучение продуктов реакций (не деления!)

Сопровождает испускание заряженных частиц ядрами, поглотившими нейтроны. Например, реакция (n, α) на ^{10}B , содержащемся в естественном боре в количестве 19,8% и широко применяемом в качестве поглотителя нейтронов при регулировании реакторов ВВЭР.

7. γ -излучение продуктов активации - испускается из продуктов радиоактивного распада различных ядерных реакций активации. Активируются конструкционные материалы, теплоноситель. Основной вклад - реакция активации стабильного изотопа кислорода $^{16}\text{O} (n, p)^{16}\text{N}$ (содержание ^{16}O в естественной смеси изотопов кислорода равно 99,759%). Она идет только на быстрых нейтронах с порогом около 10 МэВ. Радиоактивный изотоп азота ^{16}N имеет период полураспада $T_{1/2}$ - 7,4 сек. В 70% случаев этого β -распада излучается γ -квант с энергией **6.13 МэВ**, в 5% - с энергией 7.1 МэВ, остальное – чистый β -распад;

Работающий реактор. Гамма-излучение

8. **Аннигиляционное γ -излучение** - образуется при аннигиляции позитронов, испускаемых радиоактивными продуктами ядерных реакции, с электронами. При этом возникают два γ -кванта с минимальной энергией 0,511 МэВ каждый.
9. **Тормозное γ -излучение** - образуется в результате торможения электронов (например, β -частиц радиоактивного распада) в электрическом поле атомов.

С точки зрения радиационной безопасности основным источниками являются:

- мгновенное γ -излучение,
- γ -излучение короткоживущих продуктов деления,
- захватное γ -излучение,
- активационное γ -излучение

Работающий реактор. Гамма-излучение

- Наиболее высокой является активность продуктов деления, поэтому все операции с отработанным ядерным топливом, заключенным в ТВЭЛы, выполняются дистанционно. Особо опасны ТВЭЛы с поврежденной оболочкой.
- Наиболее высокой наведенной активностью обладают устройства и материалы, находящиеся непосредственно в работающем реакторе (приводы СУЗ, образцы-свидетели и т.д.). Радиоактивное излучение от них может превышать допустимые уровни в сотни и тысячи раз.

Работающий реактор

- Плотность потока нейтронов в активной зоне при работе реакторов современных АЭС достигает $10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.
- Под действием нейтронов происходит активация оборудования и деталей внутри реактора, продуктов коррозии, содержащихся в теплоносителе, газов и биологической защиты, окружающих корпус реактора и т.д.
- Плотность потока γ -квантов на поверхности активной зоны (с учетом самопоглощения в активной зоне) для реакторов ВВЭР равна $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.
- В результате, вблизи реактора в отсутствие защиты смертельная для человека доза облучения набирается за секунды.

Реактор как источник α -излучений

- свежезагруженное ядерное топливо;
- α -радиоактивные продукты распада топлива, изотопы урана и трансурановые элементы, получаемые в реакторе во время его работы;
- α -активные продукты деления, а также реакции типа (n, α) ;
- при делении ^{235}U непосредственный выход α -частиц составляет 0,25%;

Загружаемое ядерное топливо фактически не представляет радиационной опасности.

Пример: суммарная активность урана при полной загрузке реактора ВВЭР-440 (42 т) с обогащением примерно 3% равна около $6 \cdot 10^2$ ГБк (16 Ки). Кроме того, у урана практически отсутствует γ -излучение.

α -частицы не выходят за пределы активной зоны реактора и поэтому не важны с точки зрения биологич. защиты реактора.

Реактор как источник β -излучений

- β -радиоактивные долгоживущие продукты деления ядер топлива (I, Sr), во многом определяющие остаточное энерговыделение в реакторе после его останова;
- β -частицы, испускаемые при радиоактивных превращениях изотопов урана (^{237}U , ^{239}U) и трансурановых элементов (^{241}Pu , ^{243}Pu , ^{245}Pu), а также конструкционных материалов.
- β -частицы также не выходят за пределы активной зоны реактора и поэтому не интересны с точки зрения защиты биологической защиты реактора.
- β -излучение может представлять биологическую опасность только при близком соседстве или непосредственном контакте с β -активными конструкционными материалами или частями отработавших ТВЭЛов.

Остановленный реактор. Нейтроны

Источниками нейтронного излучения остановленного реактора являются:

1. **Фотонейтронные реакции** на дейтерии и ^9Be .
2. **Спонтанное деление накопленных трансактиноидов** - плутония и кюрия: ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{242}Cm , ^{244}Cm ($T_{1/2}=18.4$ лет)

*) Именно кюри-244 определяет нейтронную активность спустя 3 года после выдержки отработанного топлива (для ВВЭР 10^6 нейтр/(с·кг U))

3. **(α, n) – реакция** на ядрах ^{17}O и ^{18}O , причем α -частицы – результат α -распада накопленных актиноидов.

Остановленный реактор. Гамма-кванты

Источниками γ -излучения остановленного реактора являются:

- γ -излучение короткоживущих продуктов деления
- γ -излучение долгоживущих продуктов деления
- γ -излучение продуктов реакций
- γ -излучение продуктов активации
- аннигиляционное
- тормозное

Основной вклад в излучение остановленного реактора дает излучение

- долгоживущих продуктов деления
- активированных конструктивных элементов
реактора

Остановленный реактор. Гамма-кванты

В процессе работы реактора в топливных элементах активной зоны и другом оборудовании первого контура накапливаются радиоактивные продукты ядерного деления.

После года выдержки их активность снижается примерно на порядок.



Чем больше время работы до останова реактора, тем больше доля долгоживущих радионуклидов в смеси продуктов деления и медленнее спадает активность после останова

**Основной
технологический контур
как источник
 γ -излучения**

Гамма-излучение в основном контуре

- В процессе работы радиоактивными становятся как теплоноситель, так и само оборудование первого контура.
- Теплоноситель является источником γ -излучения за счет нейтронной активации ядер самого теплоносителя, его примесей, смытых продуктов коррозии оборудования, и за счет попавших в него осколков деления (β -частицы, образующиеся при распаде активных ядер, не выходят за пределы оборудования, по которому циркулирует теплоноситель).
- Трубопроводы и оборудование первого контура (главные циркуляционные насосы, парогенераторы и т.д.) становятся источниками ИИ в результате того, что внутри них находится радиоактивный теплоноситель, и часть активных продуктов теплоносителя осаждается на стенках в виде пленки активных отложений.
- Т.е., **источники излучения на поверхностях оборудования - осевшие продукты коррозии, эрозии и осколки деления.**

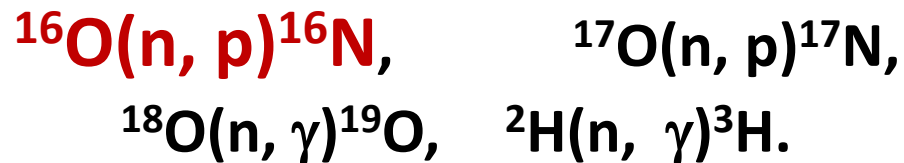
Активность теплоносителя

Разделяется на три вида:

- собственная
- осколочная
- наведенная

Собственная активность теплоносителя

- Собственная активность определяется реакциями (n,γ), (n,p), (n,α) на ядрах самого теплоносителя.
- Для **водного теплоносителя** в результате взаимодействия в активной зоне быстрых нейтронов с ядрами кислорода и водорода возникают следующие реакции:



- Основную γ-активность теплоносителя обуславливает азот ^{16}N ($T_{1/2} = 7.4$ сек. В 70% случаев этого β-распада излучается γ - квант с энергией **6.13 МэВ**, в 5% - с энергией 7.1 МэВ) После остановки реактора активность ^{16}N быстро снижается.
- Собственная активность теплоносителя при работе реактора достигает $5 \cdot 10^9$ Бк/кг, и обусловлена в основном активацией кислорода. **Мощность дозы γ-излучения вплотную к трубопроводу первого контура составляет 1 Зв/ч**

Осколочная активность теплоносителя

- Осколочная активность теплоносителя вызвана продуктами деления, попадающими в первый контур при разгерметизации оболочек ТВЭЛов.
- Выход газообразных продуктов деления в теплоноситель (просачивание) связан с появлением микротрещин в оболочках ТВЭЛов
- Причина появления микротрещин - воздействие различных факторов (высокая температура, коррозия, радиационное охрупчивание, вибрация, переменные тепловые нагрузки).
- Иногда микротрещины развиваются в крупные дефекты оболочек ТВЭЛов. При таких дефектах возможен прямой контакт теплоносителя с топливом и выход в теплоноситель твердых продуктов деления и урана.
- Число ТВЭЛов с микротрещинами не должно превышать 1%, а число ТВЭЛов с крупными дефектами - 0,1%.
- Удельная активность осколков деления в теплоносителе может быть до $4 \cdot 10^8$ Бк/кг (0,01 Ки/кг).

Наведенная активность теплоносителя

- Наведенная активность теплоносителя обусловлена наведенной активностью примесей и продуктов коррозии

К **примесям** теплоносителя относятся:

- минеральные соли (особенно соли Na),
- растворенные газы (Ar и др.)

Продукты коррозии (окислы Fe, Ni, Co, Cr...) – окислы, попадающие в теплоноситель при смыве с конструкционных элементов и внутренних поверхностей трубопроводов.

Циркулируя вместе с водой через активную зону реактора, примеси и продукты коррозии приобретают наведенную активность. В основном по типу реакции (n,γ).



Наведенная активность теплоносителя

- Радионуклидный состав и активность теплоносителя и отложений на оборудовании зависят от типа теплоносителя, материалов контура и активной зоны, герметичности оболочек ТВЭЛов, способности радионуклидов к осаждению на поверхности.
- В водоохлаждаемых ядерных реакторах оборудование технологического контура изготавливается из коррозионно-стойких сталей, поэтому в состав коррозионных отложений входят радионуклиды кобальта, железа, хрома, марганца и др.
- Они образуются из химических элементов, входящих в состав этих сталей, сплавов циркония и других материалов, применяемых в реакторостроении.

Радиоактивные продукты коррозии в составе отложений

Реакция образования	Период полураспада	Энергия фотонов, МэВ
$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	45.1 сут	1,1; 1,29
$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	27,8 сут	0,32
$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	2,58 ч	0,0846; 1,81; 2,11
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	312,3 сут	0,835
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	5,25 года	1,17; 1,33
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	70 сут	0,511; 0,81
$^{94}\text{Zr}(n,\gamma)^{95}\text{Zr}$	64 сут	0,72; 0,75
$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$	250,4 сут	0,66; 0,88; 0,94; 1,38

Наибольший вклад в мощность дозы вносит Co-60.

Наведенная активность теплоносителя и активность оборудования

- Основной вклад в наведенную активность теплоносителя после остановки реактора вносят активированные продукты коррозии.
- Активированные продукты коррозии образуют пленку гамма-активных отложений на внутренних поверхностях оборудования АЭС: парогенераторов, насосов, трубопроводов и т.п. Накопление их происходит в результате длительной многократной циркуляции теплоносителя.
- Активированные продукты коррозии являются основным источником γ -облучения персонала при проведении ремонта на загрязненном оборудовании.
- Излучение в непосредственной близости от оборудования в первом контуре достигает 10-100 Р/час. В застойных зонах мощность излучения может быть значительно выше.

Наведенная активность теплоносителя и активность оборудования

- С увеличением времени эксплуатации реактора активность отложений на оборудовании растет, и вместе с этим возрастает мощность дозы γ -излучения от оборудования.
- Активность примесей в воде составляет до $4 \cdot 10^6$ Бк/кг
- Активность продуктов коррозии - до $4 \cdot 10^5$ Бк/кг
- Активная пленка на поверхностях оборудования первого контура может иметь удельную активность до $4 \cdot 10^8$ Бк/м²
- Таким образом, **радиационная обстановка в помещениях и радиационное воздействие на персонал АЭС определяется γ -излучением**: его вклад в дозы внешнего облучения составляет **95%**.

Другие источники γ -излучения на АЭС

Источники излучений в воздухе рабочих помещений

- Кроме внешнего нейтронного и γ -излучения радиационную обстановку на АС определяют **радиоактивные газы и аэрозоли, присутствующие в воздухе рабочих помещений** и радиоактивные загрязнения поверхностей помещений и оборудования.
- Причинами появления в воздухе рабочих помещений α -, β -, γ -радиоактивных газов и аэрозолей (активность которых определяется продуктами деления ядерного топлива и продуктами активации примесей теплоносителя, мигрировавшими в воздух) являются неорганизованные протечки теплоносителя через различные неплотности соединений первого контура, а также вскрытие оборудования технологических контуров для ремонта.
- При нормальной работе реактора на мощности радиоактивное загрязнение помещений значительно ниже допустимых значений и возрастает (в десятки раз) в период ремонтных и перегрузочных работ. Вдыхание такого воздуха приводит к внутреннему облучению организма.

Гамма-активность второго контура

- Второй контур и различные вспомогательные технологические контуры могут быть источниками излучения, если будет происходить протечка в них теплоносителя из основного технологического контура (например, при разгерметизации коллектора или теплообменных трубок в парогенераторе). Поскольку протечки, если они есть, невелики то активность теплоносителя второго контура мала.

Мощными источниками ионизирующих излучений являются

- бассейны выдержки с отработанным ядерным топливом; системы спецводоочистки и их оборудование;
- хранилища отходов;
- детали и механизмы СУЗ,
- датчики КИП, связанные с измерением параметров первого контура.

Вот и все...

