

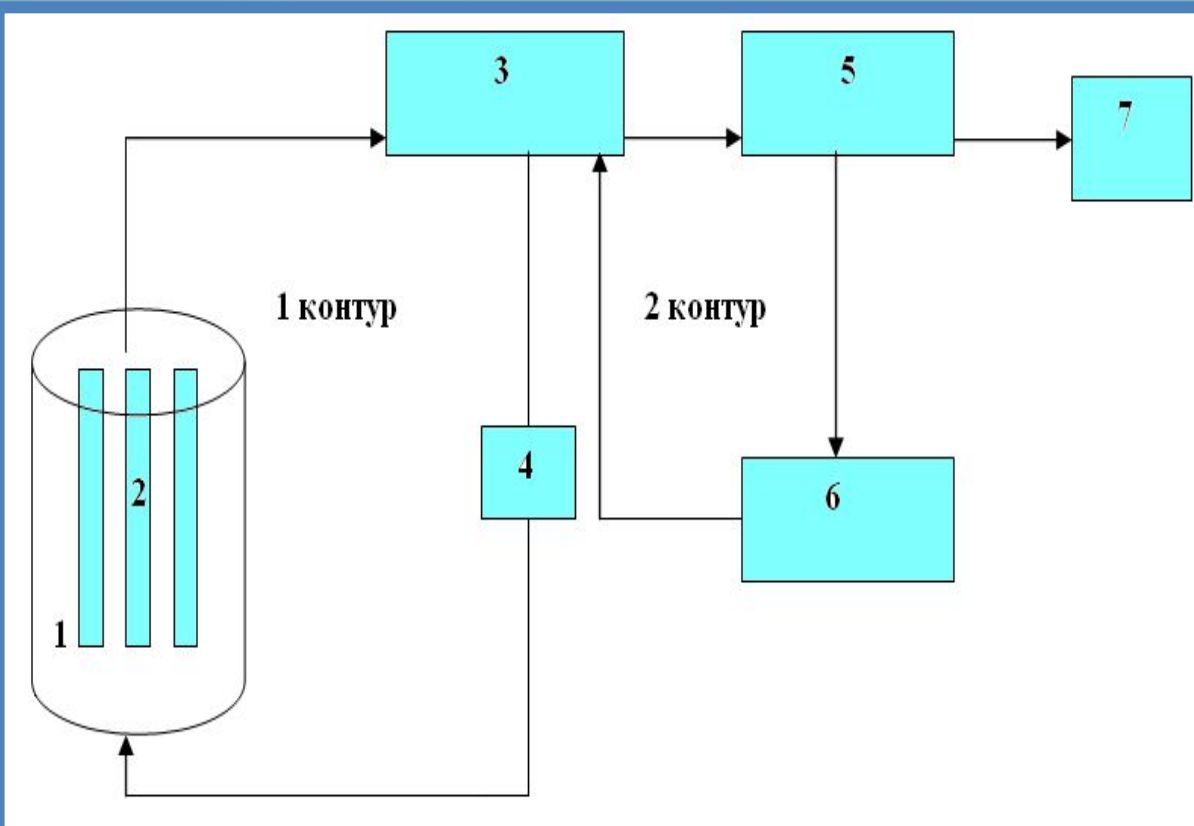
ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА АЭС

Ядерный реактор



ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ НА АЭС :

- реактор;
- бассейн выдержки и перегрева;
- отработавшее ядерное топливо;
- трубопроводы и оборудование 1 контура (циркуляционные насосы, парогенераторы, компенсаторы объема, задвижки и т. д.);
- аппараты системы специализированной очистки и её оборудование;
- хранилища радиоактивных отходов;
- трубопроводы и оборудование вентиляционных систем и специализированной очистки;
- детали и механизмы СУЗ, ДА, КИП и РК, связанные с измерениями параметров 1 контура;
- радиоактивные источники, используемые для точечных измерений;



1 – корпус реактора; 2 – тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ); 3 – парогенератор (ПГ); 4 – циркуляционный насос (ГЦН); 5 – турбина; 6 – конденсатор; 7 – генератор.

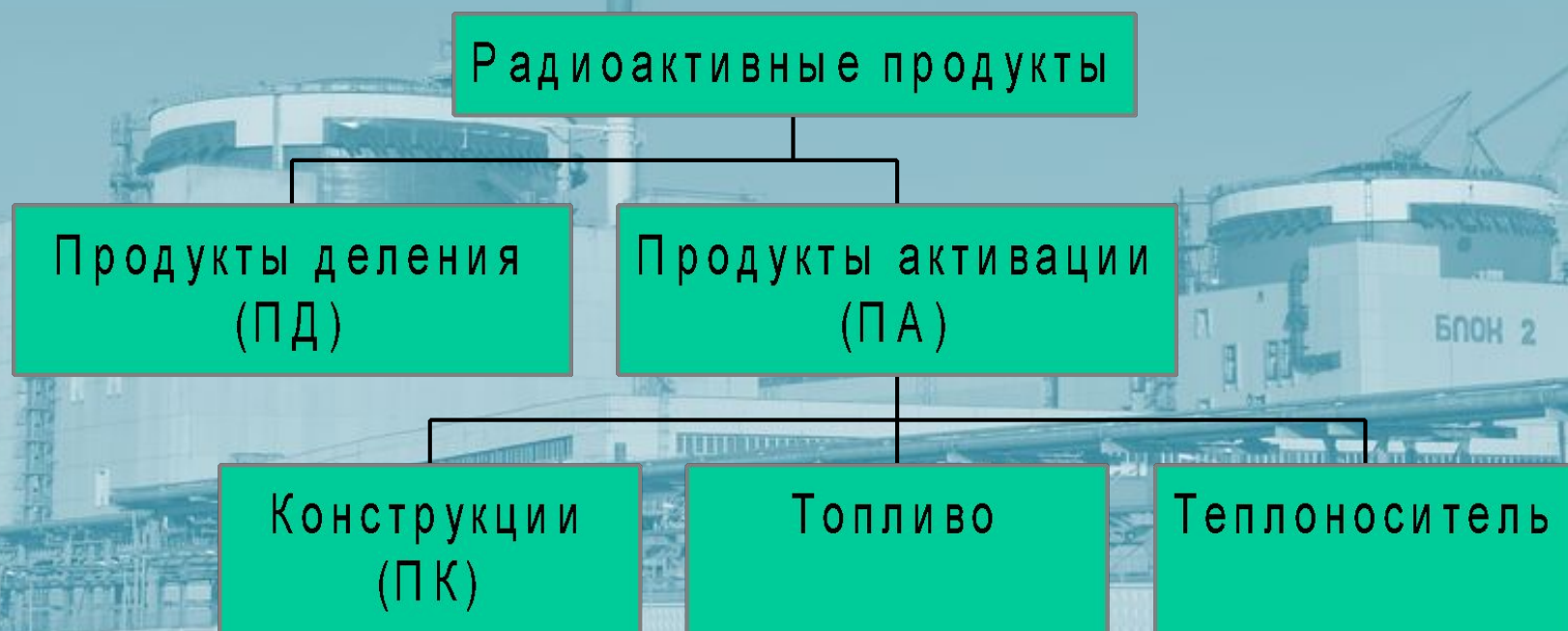
ВОЗМОЖНЫЕ ВИДЫ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЕРСОНАЛ:

- внешнее облучение от оборудования, содержащего радиоактивные вещества;
- внутреннее облучение за счёт вдыхания радиоактивных веществ в виде аэрозолей;
- контактное облучение за счёт радиоактивного загрязнения кожных покровов и спецодежды;
- внешнее облучение, обусловленное радиоактивным загрязнением поверхностей оборудования и помещений, а также наличием в воздухе радиоактивных газов.

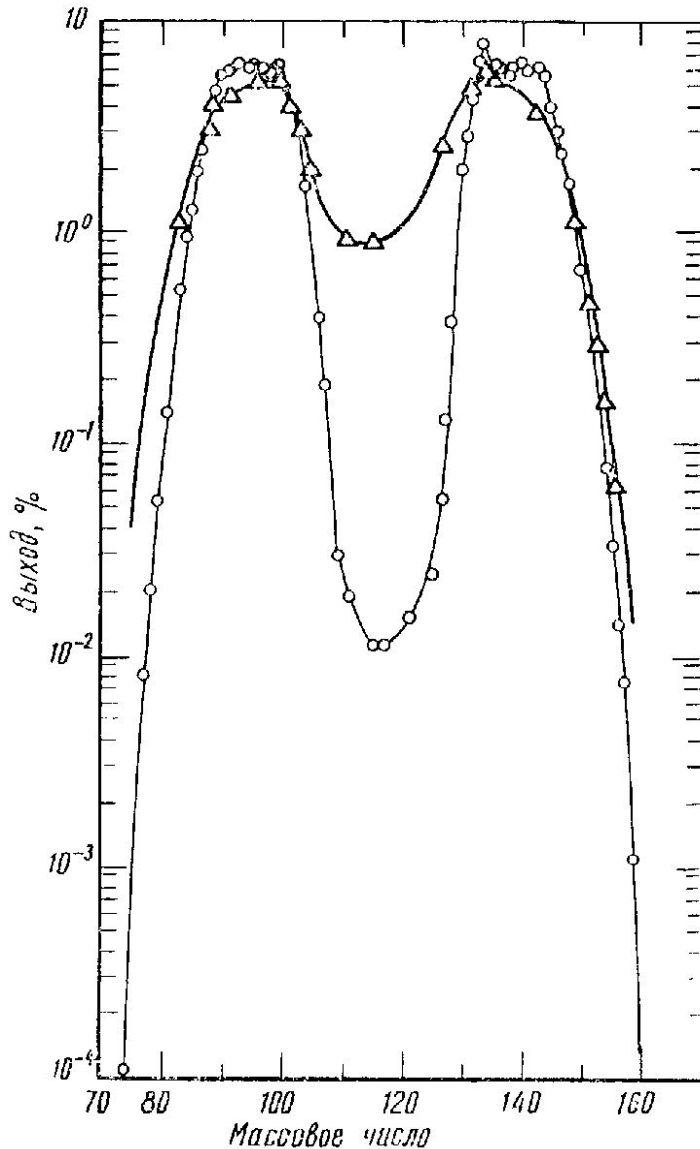
ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЕРСОНАЛ :

- потоки внешнего ионизирующего излучения (в основном гамма-излучение)
- загрязненность воздуха рабочих помещений радиоактивными газами и аэрозолями,
- загрязненность рабочих поверхностей, кожных покровов и спецодежды радиоактивными веществами.

Основные радиоактивные продукты АЭС



Продукты деления



- Выход продуктов деления ^{235}U (тепловыми (o) и быстрыми 14 МэВ (Δ) нейтронами)
- Максимум на 85-100
- Максимум на 130-145
- Р/н состав АЗ:
 - тип реактора и особенности его конструкции и эксплуатации;
 - время кампании;
 - время выдержки

Инертные радиоактивные газы (ИРГ)

Радионуклид	$T_{1/2}$
^{85m}Kr	4,5
^{85}Kr	10,7 лет
^{88}Kr	3
^{83m}Kr	1,8
$^{89, 90}\text{Kr}$	мин, сек
^{87}Kr	76 мин
^{133}Xe	5,2
^{135}Xe	9
^{133m}Xe	2
^{131m}Xe	12
$^{135m, 138, 139}\text{Xe}$	мин, сек

+ПА: ^{41}Ar ($T_{1/2} = 1,8$ ч)

Радиоактивный йод

Радионуклид	$T_{1/2}$
^{129}I	$1,6 \cdot 10^7$ лет
^{135}I	6,6
^{133}I	21
^{132}I	2,3
^{134}I	53
^{131}I	8
^{130}I	12,4

Основные ПД – аэрозоль-образующие

Радионуклид	$T_{1/2}$	Радионуклид	$T_{1/2}$
^{89}Sr	50	^{141}Ce	32
^{90}Sr	28 лет	^{144}Ce	284
^{103}Ru	39	^{140}La	40
^{106}Ru	1 год	^{95}Zr	64
^{125}Sb	2.8 лет	^{95}Nb	35
^{132}Te	78 час	^{154}Eu	8.5 лет
^{137}Cs	30 лет	^{147}Pm	2.6 года
^{134}Cs	2 года		

Радиационная опасность

- сложный технический комплекс; в силу своей технологии обладает радиационным воздействием на персонал и содержит в себе большое количество радиоактивных веществ
- 40 т с 3% U = 6×10^2 ГБк (20 Ки)
- конец 1 года кампании достигает $1 \dots 8 \times 10^9$ Ки
- СЗЗ - территория вокруг АЭС, где возможна радиационная обстановка с превышением безопасных пределов облучения населения.
- ЗН - территория вокруг АЭС, где при нормальной эксплуатации можно современными средствами обнаружить следы радиоактивного загрязнения

Продукты активации конструкционных материалов

- Продукты коррозии (ПК):
 - ВВЭР - в 1 контуре;
 - РБМК - в КМПЦ и турбине.
- $t > 300^{\circ}\text{C}$: коррозия КС-стали 0.001 мм/год.
- Вся поверхность контура в сутки - до 100 г ПК
- Активация ПК:
 - тепловые нейтроны по (n, γ) -реакции
 - быстрые нейтроны $(n, 2n)$ -, (n, p) , (n, α) -реакции

Продукты коррозии

Радионуклид	$T_{1/2}$	Гамма-линии, МэВ	Реакция
^{51}Cr	28	0.23	$^{50}\text{Cr} (n,\gamma)$
^{54}Mn	312	0.84	$^{55}\text{Mn} (n,2n)$ $^{54}\text{Fe} (n,p)$
^{56}Mn	2.6	1.8, 0.85	$^{55}\text{Mn} (n,\gamma)$ $^{56}\text{Fe} (n,p)$ $^{59}\text{Co} (n, \alpha)$
^{59}Fe	44.5	1.3, 1.1	$^{58}\text{Fe} (n,\gamma)$
^{58}Co	71	0.8, 0.51	$^{58}\text{Ni} (n,p)$
^{60}Co	5.3 лет	1.17, 1.33	$^{59}\text{Co} (n,\gamma)$ $^{63}\text{Cu} (n, \alpha)$
^{64}Cu	13	0.5	$^{63}\text{Cu} (n,\gamma)$
^{65}Zn	240	1.1	$^{64}\text{Zn} (n,\gamma)$
^{95}Zr	64	0.7	$^{94}\text{Zr} (n,\gamma)$

Продукты активации топлива

Радионуклиды	Характерные $T_{1/2}$
U - 235, -236, -238	До $4.4 \cdot 10^9$ лет
Pu -238, -239, -240, -241, -242, -244	До $8.3 \cdot 10^7$ лет
Am -241, -242, -242m, -243	До $7.1 \cdot 10^3$ лет
Cm -242, -243, -244, -245, -246	До $4.7 \cdot 10^3$ лет

В основном альфа-распад.
Мягкое гамма-излучение (до 200 кэВ)

Активация теплоносителя (чистая вода)

- $^{16}\text{O} \rightarrow ^{16}\text{N}$ ($T_{1/2} = 7.13$ с, γ -линии: 7.1, 6.1 МэВ)
- $^{17}\text{O} (n, p) ^{17}\text{N}$ ($T_{1/2} = 4.7$ с, нейтронное излучение),
- $^{17}\text{O} (n, \alpha) ^{14}\text{C}$ ($T_{1/2} = 5730$ лет, мягкое β -излучение),
- $^2\text{H} (n, \gamma) ^3\text{H}$ ($T_{1/2} = 12.3$ года, мягкое β -излучение).

Активация теплоносителя (примеси)

Радионуклид	$T_{1/2}$	Основные γ - линии, МэВ
^{24}Na	15	2.8, 1.4
^{22}Na	2.6 года	1.3, 0.5
^{42}K	12.4	1.5
^{38}Cl	37 мин	2.2, 1.6
^{41}Ar	1.8	1.3

Тритий ^3H : $T_{1/2} = 12,3$ года; чистый β -излучатель с E макс. 19 кэВ

- тройное деление ядер с выходом для ^{235}U - $8,7 \cdot 10^{-3} \%$; на 1 ГВт тепловой мощности образуется около 12 Ки/сутки.
- $^2\text{H}(n,\gamma)^3\text{H}$ -реакции на дейтерии водного теплоносителя;
- поглощение нейтронов в $\text{B}(n,2\alpha)$ и $\text{Li}(n,\alpha)$, содержащимися в водном теплоносителе или в стержнях регулирования (СУЗ);
- взаимодействия быстрых нейтронов с конструкциями активной зоны;
- продувке гелием (газовый контур РБМК): $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$

Хорошая диффузия: 0.1%(циркониевые ТВЭЛы), 1%(стальные)

Радиоуглерод ^{14}C : $T_{1/2} = 5730$ лет;
чистый β -излучатель с $E_{\text{макс.}} = 155$ кэВ

- тройное деление ядер с выходом для $^{235}\text{U} = 1,7 \cdot 10^{-4} \%$;
- активация кислорода ^{17}O (n, α) в водном ТН;
- активация ^{14}N (n, p) при азотно-гелиевой продувке (РБМК);
- активации графитового замедлителя $^{13}\text{C}(n, \gamma)$

суммарная наработка (РБМК) - около 400 Ки/год на МВт. Выброс в атмосферу
(CO_2 , CH_4 , CO) - 1...30 Ки/год · ГВт

Барьеры безопасности

Радионуклиды (ПД+ПА)

Топливо и оболочка ТВЭЛа

Герметичный 1-й контур

Защитная оболочка и герметичные помещения станции

Санитарно-защитная зона вокруг АЭС

Окружающая среда

1-й барьер: топливная матрица+оболочка твэла

- высоколетучие: Xe, Kr, Cs, I, Te;
- малолетучие: Sr, Ba;
- нелетучие: Zr, Ce, Np, Pu, U;
- летучие окислы: Ru, Mo

- Нормальная t^0 : 98% - внутри таблетки UO_2
- 5% выгорание: выделение Kr+Xe - до 10^4 - 10^5 атм.
- 500-550 град - свеллинг до 35% объема
- $t^0 < 1000^0$ до 95% - в топливе
- $t^0 = 1600^0$ - большая часть выходит

2-й барьер: 1-й контур ВВЭР

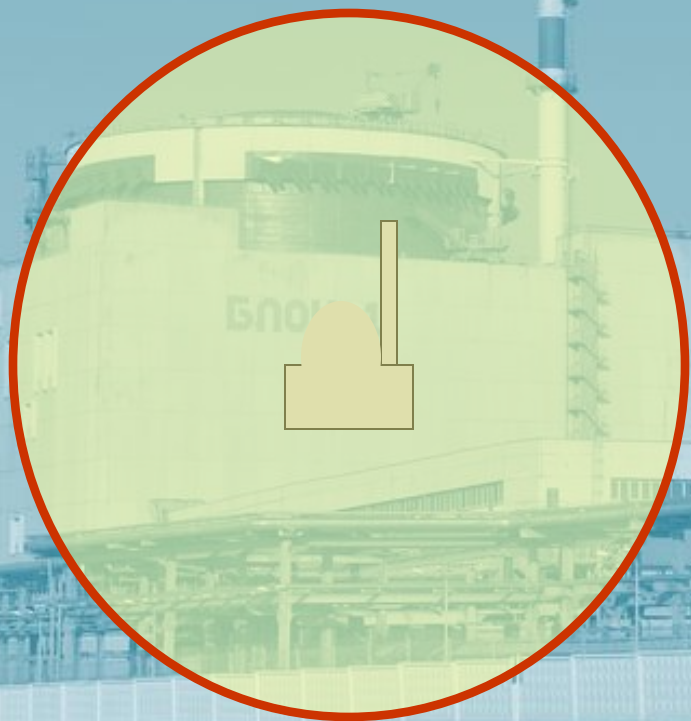
- Границы нахождения ТН при нормальной эксплуатации
- Удержать все, что вышло из ТВЭЛОВ
- Надежность, качество, стойкость к коррозии
- Неплотности + Повреждения = Протечки

3-й барьер: защитная оболочка + герметические помещения АЭС

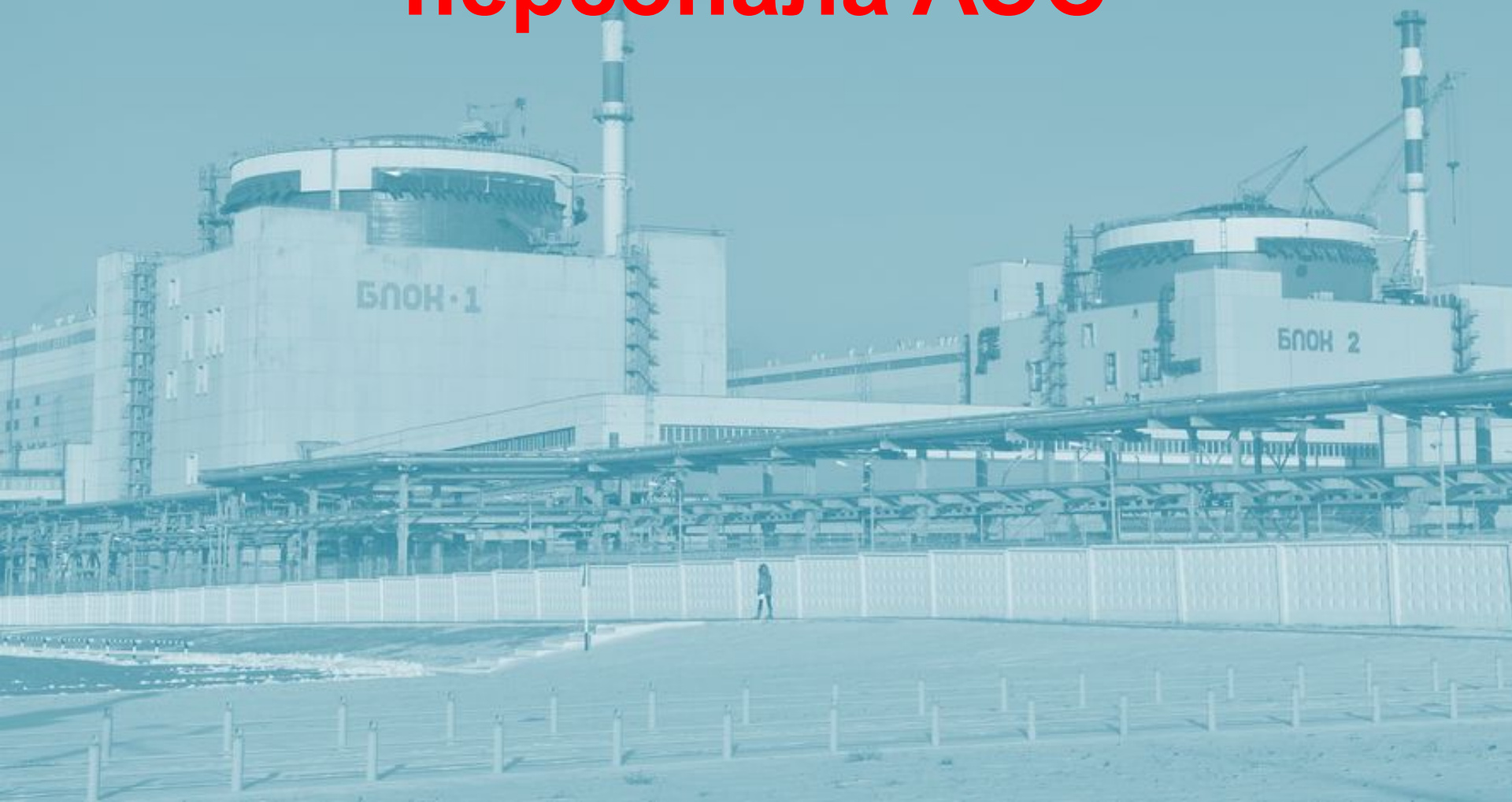
- Сдерживать утечку р/н при аварии в допустимых пределах
- Проектная негерметичность: 0.1-1% объема в сутки
- Должен выдерживать повышение давления, тепловое, химическое и мех.воздействие при расплавлении АЗ

4-й барьер: санитарно-защитная зона

- Границы СЗЗ - при проектировании
- При аварии - все внутри СЗЗ
- Обычно около 3-3.5 км



Источники облучения персонала АЭС



Разграничения помещений АЭС

- зона свободного режима
- зона контролируемого доступа:
 - необслуживаемые,
 - периодически обслуживаемые,
 - обслуживаемые.
- проход между зонами - через санпропускники



Источники внешнего облучения

- Активная зона
- Технологический контур



Активная зона на мощности (нейтроны)

- **Мгновенные: 2.5 до 2.9 на деление**
- Запаздывающие: 0.006 - 0.017 на деление
- Активационные: р/а распад (^{17}N),
- Фотонейтроны: (γ, n) -реакция на ^9Be , ^{13}C , ^2H , ^6Li

Защита реактора

- Сталь, бетон, вода, песок
- ЦЗ РБМК - 2...8 нЗв/с (норма 3.2 нЗв/с)
- ЦЗ ВВЭР-440 - до 30 нЗв/с

Технологический контур как источник излучения

- активность собственно ТН: вода - до $3 \cdot 10^9$ Бк/кг, натрий - до 10^{12} Бк/кг;
- активность примесей ТН: до 10^5 - 10^6 Бк/кг;
- активность ПК: - до 10^4 - 10^5 Бк/кг;
- активности ПД: для 1-контурных схем 10^5 Бк/кг,
для 2-контурных - 10^8 Бк/кг.

Собственная активность ТН

- На мощности - кислородная активность:
 ^{16}N ($T_{1/2} = 7 \text{ с}$) γ -линии: 7.1, 6.1 МэВ
- После останова - аннигиляционное излучение от распада ^{13}N и ^{18}F
- Помещения необслуживаемые; бетон 60 - 150 см

Активность солевых примесей

- Второй по значимости после активности самого ТН;
- ^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6$ года) - длительное время после остановки реактора.
- Специальная очистка воды (водоподготовка). для ТН

Продукты коррозии

- Поступление ПК зависит от температуры, химических свойств ТН, гидродинамических условий протекания.
- От времени: после пуска скорость поступления ПК уменьшается (образование твердой окисной пленки).
- Доминанты: первые недели - ^{56}Mn ($T_{1/2} = 2.6$ ч), потом - несколько месяцев - ^{51}Cr ($T_{1/2} = 28$ сут), потом значимы ^{59}Fe ($T_{1/2} = 44$ сут) и ^{65}Zn , ^{54}Mn ($T_{1/2}$ около года). Активность ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.3$ лет)
- Стабильный источник; изменения происходят при остановке реактора, после дезактивации,

Продукты деления

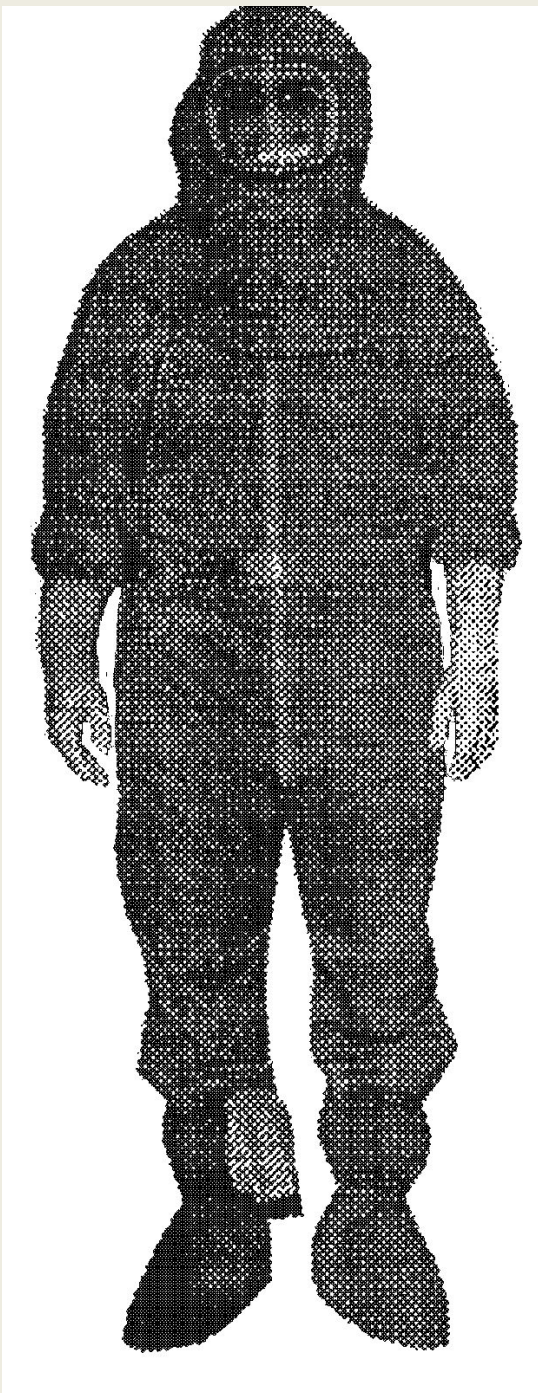
- Нестабилен, резкие скачки.
- Пути попадания:
 - загрязнение поверхности твэла до 10^3 Бк/кг.
 - дефекты твэлов ВВЭР $10^8 \dots 10^9$ Бк/кг,
РБМК - до $10^5 \dots 10^6$ Бк/кг

Типы негерметичности ТВЭЛОВ

- Микротрещина в оболочке (газовая неплотность, без контакта с ТН);
- Нераскрытая трещина (нет прямого контакта с ТН);
- Раскрытая трещина (прямой контакт с ТН);
- Разрыв оболочки (прямой контакт с ТН).

Внутреннее облучение персонала

- Аэрозоли ($< \approx 1$ мкм)
- СИЗ: комбинезоны, халаты, спецобувь, перчатки, бахилы, респираторы, противогазы, изолирующие дыхательные аппараты, изолирующие костюмы
- Проблемы использования СИЗ:
 - без вентиляции: нарушение теплообмена
 - рост CO_2 во вдохе
 - давление на лицо и голову
 - ограничение подвижности
 - хуже возможность обмена информацией
 - регенеративный патрон – хим. вещества во вдохе



Дозиметрический контроль

- Индивидуальный внешний контроль
- Индивидуальный контроль внутреннего облучения
- Радиационный контроль рабочей зоны
- Контроль р/а загрязнения кожи и одежды
- Аварийный дозиметрический контроль

Индивидуальный контроль внешнего облучения

- Задача: определить эквивалентную дозу внешнего облучения.
- Персональные носимые дозиметры:
 - фотодозиметры
 - ТЛД
 - трековые (нейтроны)
 - конденсаторные
 - электронные (на полупроводниковых детекторах)

Индивидуальный контроль внутреннего облучения

- Задача: определить эффективную годовую дозу внутреннего облучения.
- Анализ экскреций и биопроб;
- СИЧ

Радиационный контроль рабочей зоны

- Задача: предупредить о превышении пределов облучения персонала.
- Контроль внешнего облучения: счетчики, ионизационные камеры;
- Контроль внутреннего облучения: измерение радиоактивности воздуха;
- Контроль загрязнения поверхностей: радиометрия + лабораторное исследование проб

Контроль радиоактивного загрязнения кожи и одежды

- Задача: предотвращение переоблучения персонала и распространения радиоактивности в чистую зону.
- Чувствительные α - и β -счетчики в санпропускниках

АВАРИЙНЫЙ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

- Задача: получение информации о дозе внешнего облучения за аварию.
- Специальные аварийные дозиметры (химические):
 - широкий диапазон (до 10 Гр)
 - быстросчитаемы

