

ЛЕКЦИЯ №2-4 2019

**1. Концепция
глубокоэшелонированной
защиты.**

**2. Предотвращение и
ослабление аварий.**

**3. Физические барьеры и
уровни защиты,
обеспечивающие
безопасность АЭС.**

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

ПРИНЦИП ГЛУБОКО ЭШЕЛОНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ

Принцип глубоко эшелонированной защиты является одним из основных фундаментальных принципов безопасности.

Он лежит в основе всех проектно-конструкторских, технологических, организационно-технических и эксплуатационных мероприятий по обеспечению безопасности АЭС. Это объясняется тем, что вся деятельность по безопасности, связана ли она с организацией и действиями людей, или с созданием безопасно-устойчивого оборудования и специальных средств (систем), обеспечивающих безопасность, осуществляется на основе многократно перекрывающихся мер (эшелонов) или уровней защиты.

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

Концепция создания ряда последовательных физических барьеров и уровней защиты и использование функций безопасности (СБ) является главной особенностью принципа ГЭЗ (рис.1).



1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

Она предусматривает общую стратегию для мер и средств безопасности АЭС. Эта концепция гарантирует, что единичный отказ технических средств или ошибка персонала с учетом дополнительного отказа элементов СБ не приведут к авариям и к ущербу для населения, а при наложении многих отказов – вероятность опасных последствий отказов уменьшается (ослабляется).

Принцип ГЭЗ практически реализуется на АЭС по трем основным направлениям:

- 1.установление последовательных физических барьеров и уровней защиты на пути распространения РАВ в окружающую среду при ядерных авариях;**
- 2.защиту барьеров от повреждений, т.е. сохранение их целостности и эффективности;**
- 3.разработка мероприятий по защите населения и окружающей среды в случае разрушения барьеров.**

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

В результате применения ГЭЗ на АЭС представляется возможным осуществлять два стратегических принципа обеспечения безопасности:

– предотвращать аварии или ослаблять их последствия.

Поэтому для предотвращения аварий и ослабления их последствий применяются физические барьеры безопасности и уровни защиты.

Предотвращение аварий

Предотвращение неисправностей и нарушений, ведущих к авариям, особенно к авариям, которые могут привести к серьезному повреждению активной зоны, - это основной стратегический принцип обеспечения безопасной эксплуатации АЭС. Реализация этого принципа осуществляется за счет конструктивных средств и эксплуатационных мероприятий.

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

Первое средство предотвращения аварий связано с достижением высокого качества проектирования, изготовления и монтажа оборудования и эксплуатации АЭС, что существенно снижает вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Вторым средством предотвращения аварий является применение систем безопасности (СБ) в дополнение к системам нормальной эксплуатации. При этом достоинством СБ является широкое использование резервирования и физического разделения компонентов, а также использование пассивных СБ.

Пассивные СБ функционируют наиболее надежно в аварийных ситуациях, т.к. действуют без команд на включение и не требуют энергетического обеспечения.

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

Третье средство предотвращения аварий связано:

- с эксплуатационной практикой и подготовленностью персонала, его умением управлять авариями и держать под контролем аварийные ситуации;
- с регулярным инспектированием, контролем и испытаниями систем и оборудования, включая СБ, для обнаружения деградации, которая может сказаться на безопасности АЭС;
- с проведением ВАБ, результаты которого могут быть использованы при эксплуатации для изучения возможностей предотвращения аварий.

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

Ослабление аварий

Для ослабления возможных проектных аварий, которые могут перерасти в запроектные, на АЭС должны быть предусмотрены меры по ослаблению таких аварий и уменьшению последствий выброса РАВ.

Меры по ослаблению аварий расширяют концепцию ГЭЗ за рамки предотвращения аварий.

Эти меры можно разделить на 3 группы:

- 1. управление аварией,**
- 2. применение инженерно-технических мер безопасности и**
- 3. контрмеры вне площадки.**

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

1. **Управление аварией** включает действия персонала, при которых оптимально используется имеющееся оборудование с целью восстановления контроля и возвращения АЭС в безопасное состояние.

При этом обеспечивается останов реактора, постоянное и надежное охлаждение активной зоны, удержание и локализация РАВ в пределах защитной оболочки.

2. **Инженерно-технические меры** предусматривают использование главным образом физических барьеров и уровней защиты для удержания РАВ, высвободившихся из активной зоны при аварии, и обеспечение минимального выброса их в окружающую среду.

1. Концепция глубокоэшелонированной защиты.

В случае отказа (повреждения) инженерно-технических средств (физических барьеров) и недостаточной эффективности мер по управлению аварией предусматриваются также

3. контрмеры вне площадки АЭС по защите населения и окружающей среды.

Назначение контрмер – создание защитных действий, таких как укрытие или эвакуация населения, предотвращение переноса РАВ по пищевым цепочкам и другими путями к человеку.

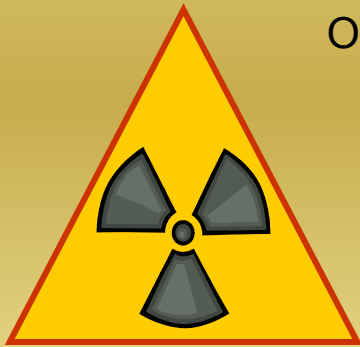
Физические барьеры

При создании АЭС безопасность обеспечивается за счет последовательной реализации принципа защиты в глубину (концепции ГЭЗ), основанного на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и РАВ в окружающую среду, и системы уровней защиты – организационно-технических мер по защите барьеров, сохранению их эффективности с целью защиты персонала, населения и окружающей среды (рис.2).

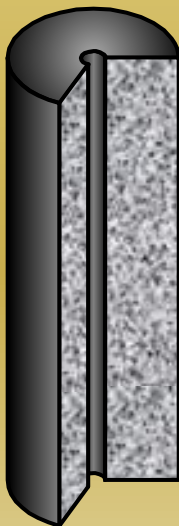
Система физических барьеров включает:

- 1.топливную матрицу;**
- 2.оболочку ТВЭЛа;**
- 3.границы контура теплоносителя, охлаждающего активную зону;**
- 4.герметичное ограждение РУ и биологическую защиту.**

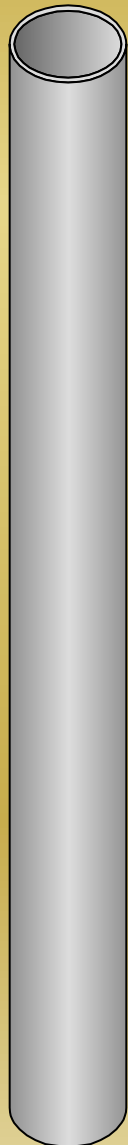
Физические барьеры на пути распространения радиоактивности



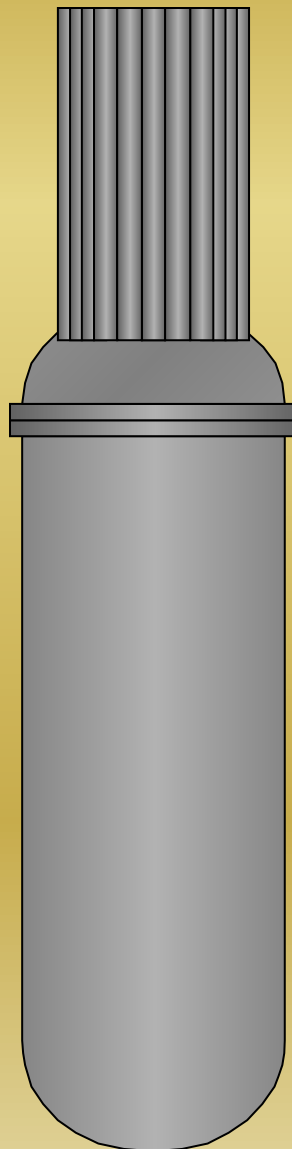
1-й барьер
Матрица топлива



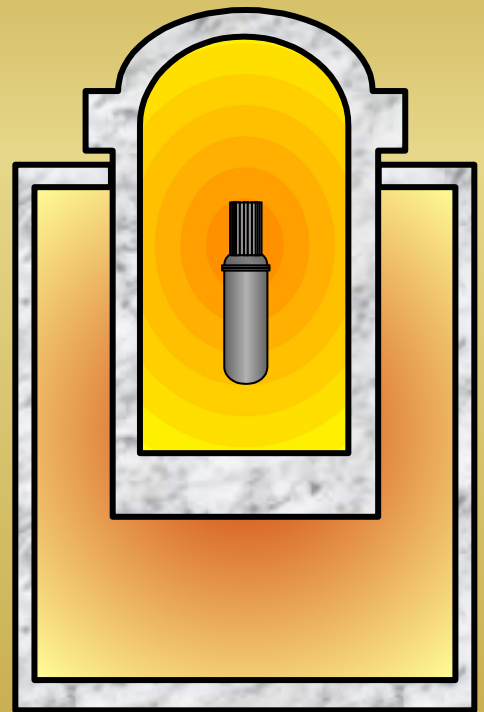
2-й барьер
Оболочка ТВЭЛ



3-й барьер
Корпус реактора, оборудование 1 контура



4-й (и 5-й) барьеры
Биологическая защита и Герметичная оболочка РО



Топливная матрица

Топливная матрица представляет собой первый барьер на пути выхода радиоактивных продуктов. Топливная матрица представляет собой топливную композицию из спрессованного диоксида урана UO_2 в виде таблетки. Таблетки изготавливаются холодным прессованием с последующим спеканием при температуре $1700\text{ }^{\circ}C$. Топливная матрица обладает высокой твердостью и радиационной стойкостью (10^{22} нейтрон/ cm^2), а также химически устойчива к воде и водяному пару. Температура плавления топливной матрицы $2800\text{ }^{\circ}C$, что наряду с вышеперечисленными свойствами позволяет удерживать при нормальных рабочих температурах большую часть продуктов цепной реакции деления внутри себя.

1-й барьер

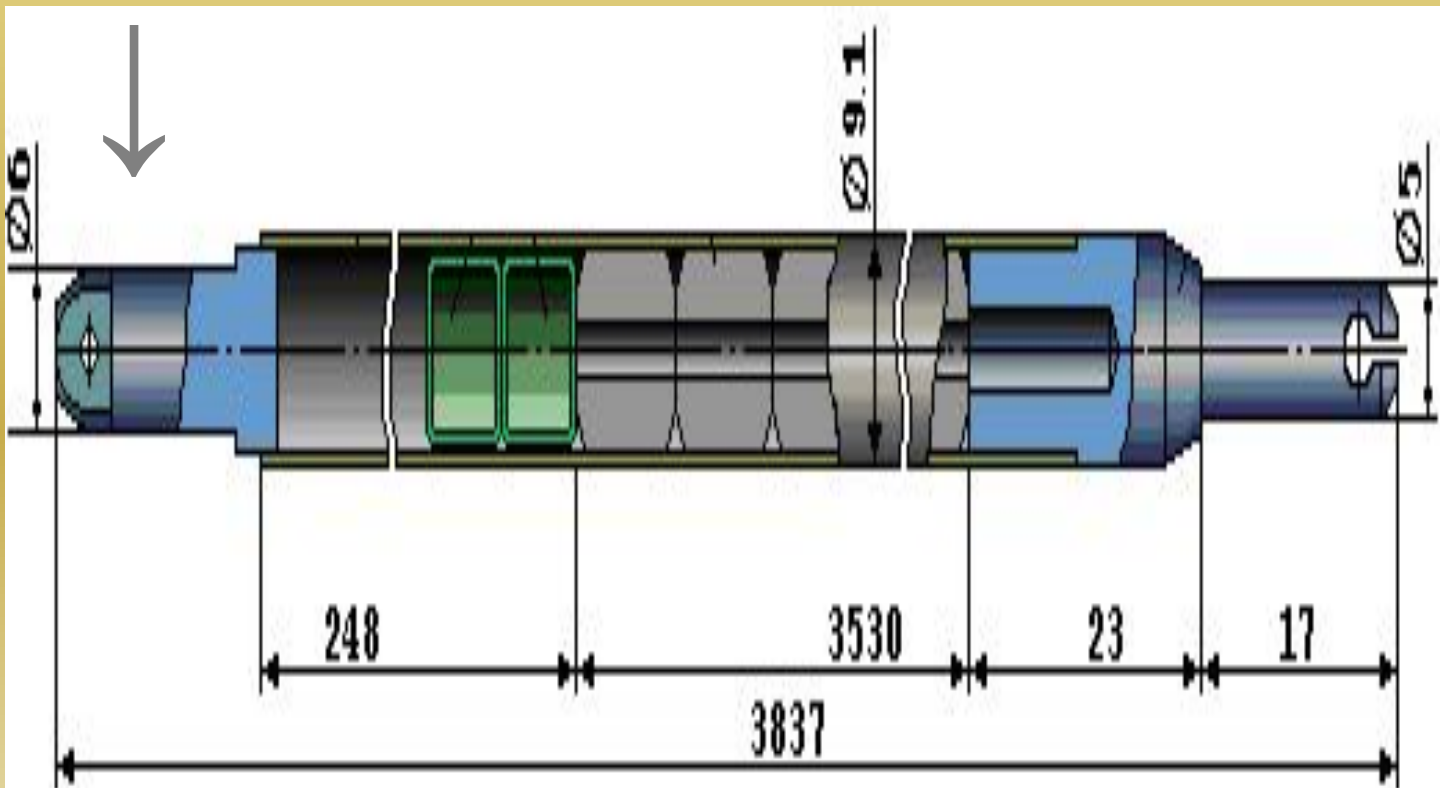
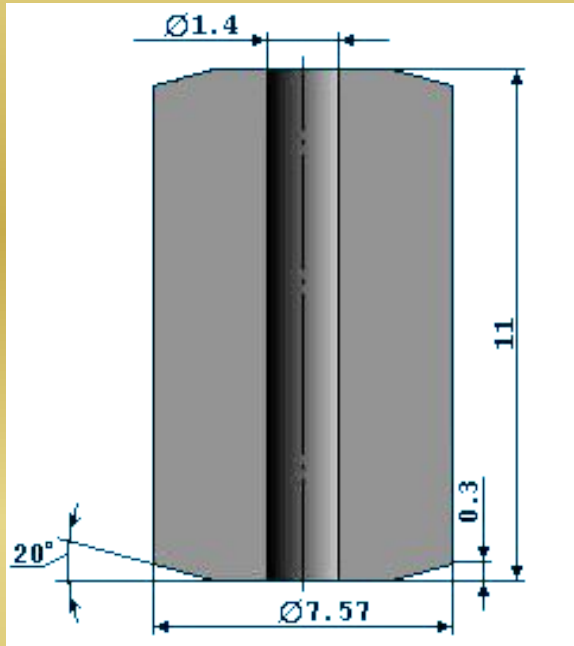
Топливная матрица

Как известно, UO_2 при $t < 1000^\circ\text{C}$ удерживает даже газообразные и летучие продукты деления (криптон, ксенон, йод).

При температуре более 1600°C и по мере выгорания топлива выход газообразных нуклидов существенно возрастает.

Очевидно, при достижении топливом температуры, близкой к плавлению, барьерные функции таблетки теряются.

Конструкция ТВЭЛ (1 и 2 барьеры)



4-й барьер

Оболочка тепловыделяющего элемента

Герметичная оболочка ТВЭЛа является вторым барьером, препятствующим выходу продуктов деления в теплоноситель, охлаждающий активную зону (ТВЭЛы).

Оболочка изготавливается из сплава циркония с ниобием с размерами: диаметром $d=9,1$ мм, толщиной $\delta=0,65$ мм, длиной (высотой) $l=3,8$ м. Она рассчитана на предельно допустимую рабочую температуру до 350 °С, удельный тепловой поток $q=170$ Вт/см² температуру плавления оболочки примерно 1800 °С. В ТВС - 312 ТВЭЛов, а ТВС в активной зоне - 163 штуки: 61 регулируемых и 102 нерегулируемых кассет, из них при трехгодичной кампании 54 ТВС с пучками СВП (по 18 в кассете).

Оболочки твэлов работают в сложных условиях. Через них передаются от топлива к теплоносителю высокие удельные тепловые потоки (нагрузки). Они подвержены облучению потоком нейтронов высоких энергий, коррозионному и силовому воздействию, переменным тепловым нагрузкам при изменениях режимов работы АЭС. В этих условия к оболочке ТВЭЛа предъявляются жесткие требования обеспечения герметичности и прочности в течение заданной кампании и последующего хранения отработавшего ядерного топлива.

Оболочка ТВЭЛа

ТВЭЛ заполнен гелием под давлением $P = 20—25$ кГ/см² с целью компенсации давления, оказываемого на оболочку теплоносителем.

Гелий, являясь инертным газом, не вступает в реакцию с нейтронами и обеспечивает лучшую теплопроводность. Продукты деления, которые в основном представляют собой газы, диффундируют к периферии и, в конечном итоге, накапливаются под оболочкой.

При нарушении герметичности оболочки они попадают в воду 1 контура. Для сбора газообразных продуктов деления в конструкции ТВЭЛов предусмотрен компенсационный объем, который также компенсирует и температурные расширения таблеток.

Для обеспечения целостности оболочек ТВЭЛов необходимо поддержание заданного температурного режима за счет надежного охлаждения активной зоны как в нормальных условиях, так и в аномальных (аварийных).

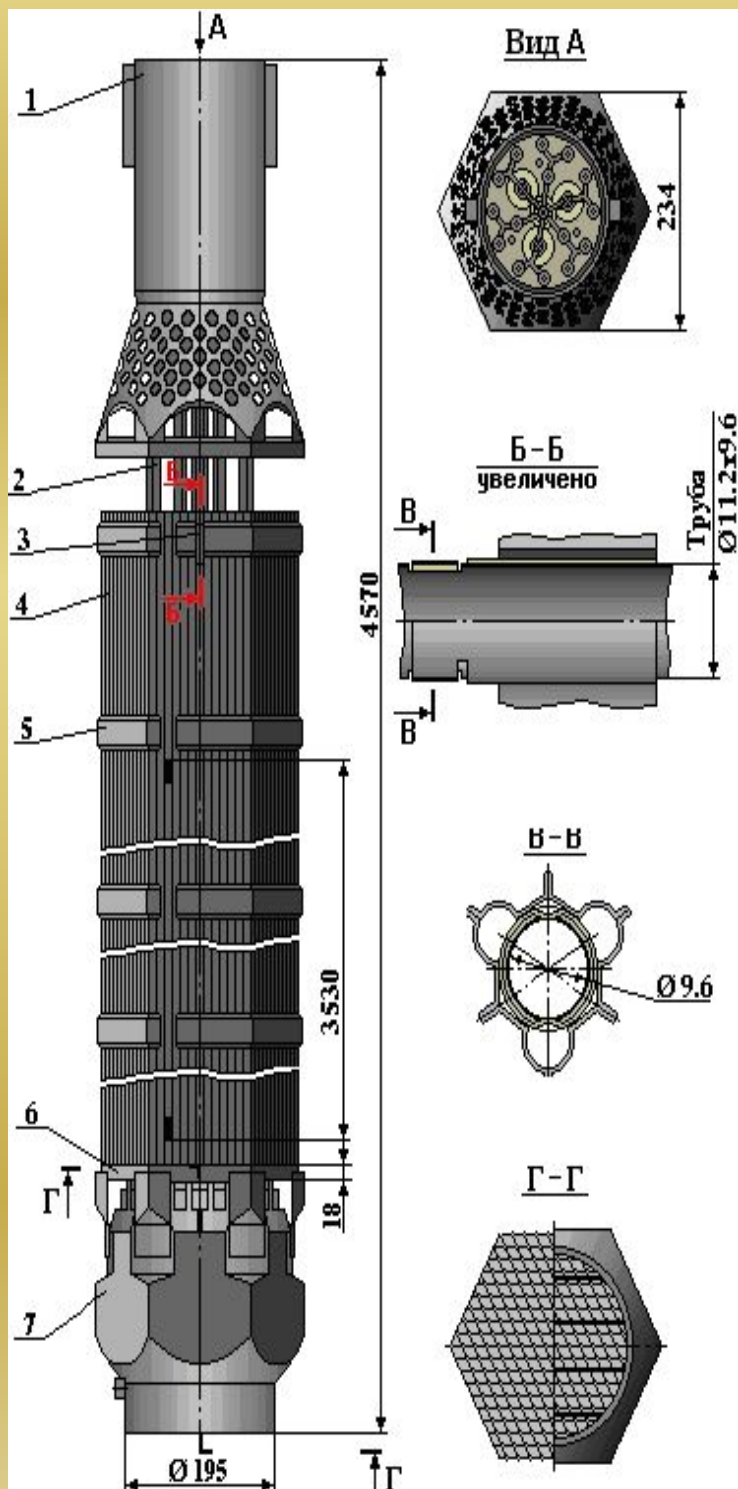
Оболочка ТВЭЛа

Для ТВЭЛов установлены следующие максимальные проектные пределы:

- температура оболочки не превышает 1200°C ;
- запас до кризиса теплообмена более $K_3 = 1,3$;
- внутритвэльное давление газов меньше номинального в реакторе;
- напряжение в оболочке меньше предела текучести;
- деформация оболочки меньше 1%;
- число ТВЭЛов с образованием микротрещин, через которые могут проникать газообразные продукты деления, не должно превышать 1%, а для ТВЭЛов с прямым контактом топлива с теплоносителем – 0,1% от общего числа ТВЭЛов в активной зоне.

При значительном превышении проектных пределов может происходить разрушение оболочки ТВЭЛов. Так при температуре оболочки близкой к 1200°C , происходит паро-циркониевая реакция с большим выделением тепловой энергии. Это вызывает окисление и охрупчивание оболочки. При омывании охлаждающей водой нарушается ее герметичность, оболочка разрушается вследствие разбухания топливных таблеток, потери гелиевого зазора и возникновения значительных напряжений сжатия в ней.

ТВС



1 Головка

2 Канал (18 шт)

3 Труба центральная

4 ТВЭЛ (312 шт)

5 Дистанционирующая
решетка (15 шт)

6 Решетка нижняя

7 Хвостовик

Границы контура теплоносителя, охлаждающего активную зону

Контур теплоносителя реактора (первый контур) является третьим барьером, препятствующим выходу РАВ в окружающую среду.

Основными элементами первого контура являются:

- реактор, включая корпуса приводов системы управления и защиты (СУЗ);
- парогенератор;
- главный циркуляционный насос;
- компенсатор давления;
- измерительные устройства и приборы.
- трубопровод, соединяющий основные элементы и предназначенный для циркуляции теплоносителя;
- клапаны.

Основное назначение первого контура – отвод генерируемого тепла от активной зоны при нормальной работе реактора, после его остановки и при возникновении аварийных ситуаций.

Границы контура теплоносителя, охлаждающего активную зону

Герметичная система первого контура должна выдерживать без разрушения статические и динамические нагрузки, температурные воздействия, которые возникают в любых его узлах и компонентах (с учетом действия защитных приспособлений и их возможных отказов) при всех проектных исходных событиях.

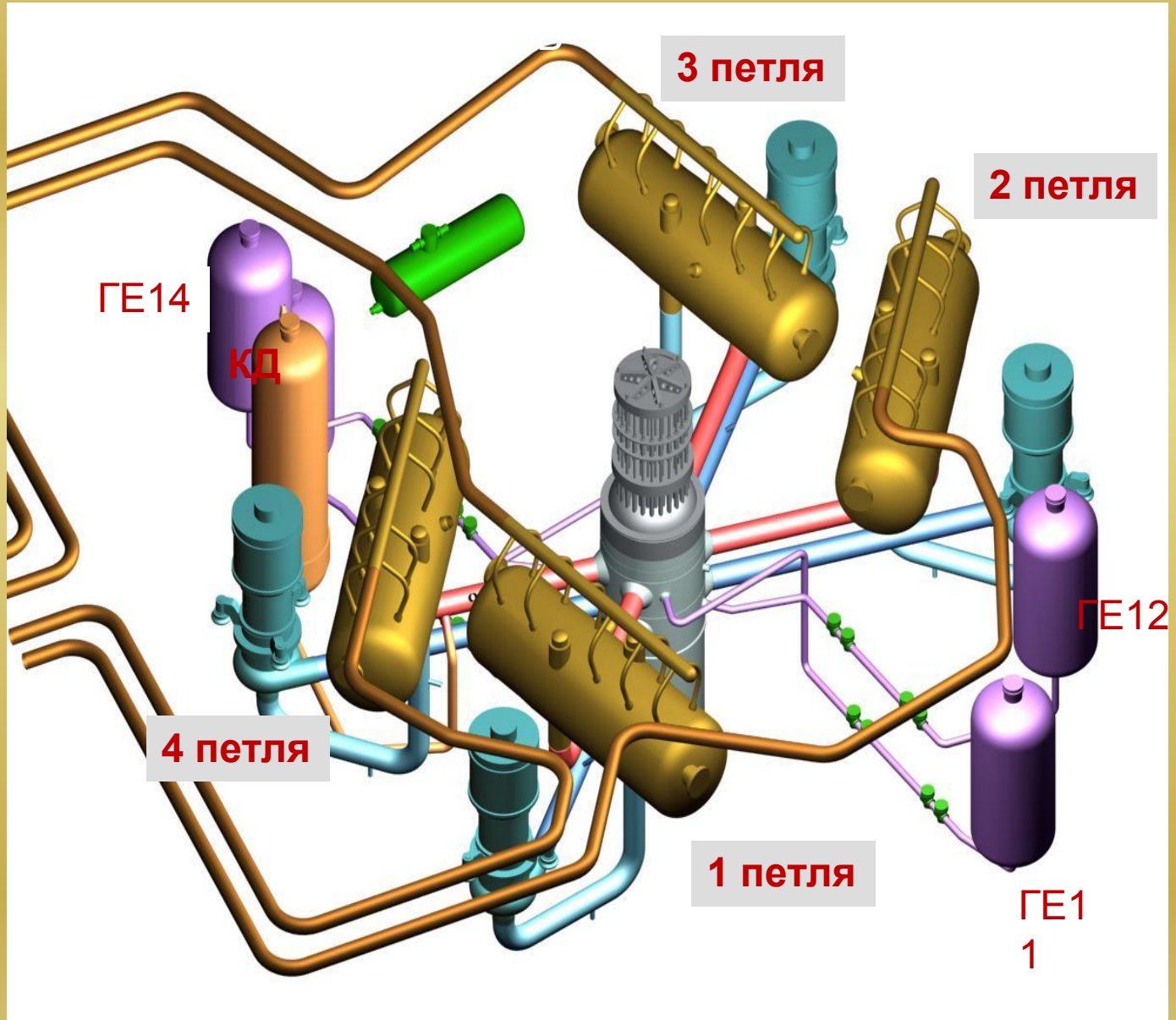
В качестве исходных событий необходимо учитывать непреднамеренные выделения энергии за счет:

- внезапного введения положительной реактивности при выбросе органа воздействия на реактивность (максимальной эффективности);
- введения холодного теплоносителя в активную зону или каким-либо другим положительным эффектом реактивности, связанным с теплоносителем.

Система также должна противостоять превышениям пределов по температуре и давлению. В составе контура имеются устройства и приспособления, контролирующие плотность и целостность его элементов и трубопроводов, сварных швов, утечки из контура и состояние металла корпуса реактора.

3-й барьер

Границы контура теплоносителя,
охлаждающего активную зону



4-й (и 5-й) барьер

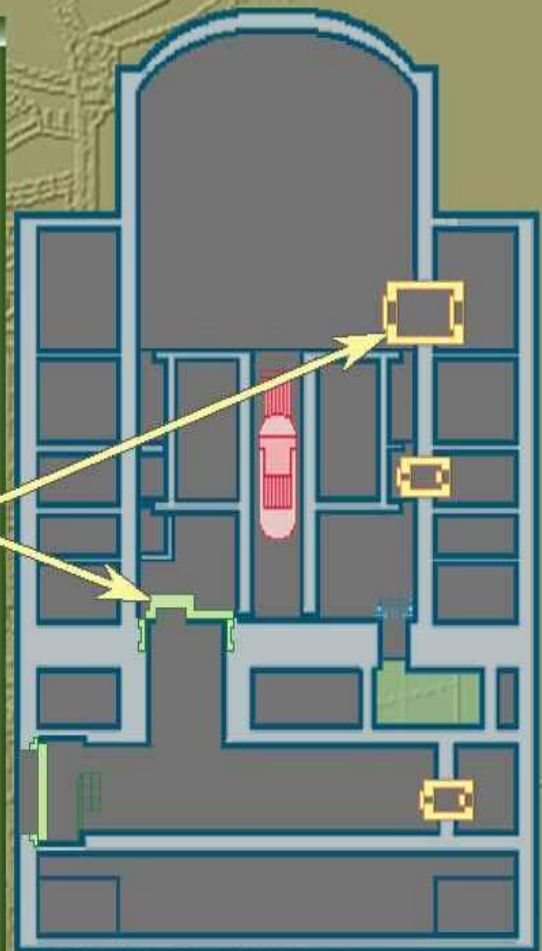
Герметичное ограждение РУ и биологическая защита

Системы безопасности Локализирующие системы безопасности

Система герметичного ограждения (СГО).

В качестве СГО проектом принята защитная оболочка, которая состоит из следующих элементов:

- * герметизирующая металлическая облицовка;
- * железобетонные ограждающие конструкции, включая систему преднапряжения оболочки;
- * шлюзы (людские и транспортные);



Герметичное ограждение РУ и биологическая защита

Герметичное защитное ограждение (ЗО) РУ – это совокупность строительных и других конструкций, которые, защищая пространство вокруг РУ и систем, работающих под давлением первого контура, создают предусмотренную проектом преграду и препятствуют выходу РАВ в окружающую среду в количествах, превышающих установленные пределы.

Пространство, закрытое герметичным ограждением, создает одно или несколько герметичных помещений.

В защитном ограждении РУ с ВВЭР-1000 (рисунок 48) размещены компоненты первого контура и бассейн с отработавшим топливом. Это защитное ограждение является последним барьером защиты от РАВ, выбрасываемых вместе с теплоносителем из первого контура в аварийных условиях.

Основной функцией герметичного защитного ограждения является:

выдерживать внутреннее повышение давления при возникновении аварии с нарушением герметичности первого контура;

ограничивать во взаимодействии с защитными (САОЗ) и локализирующими (спринклерной, вентиляционной) системами выделяющуюся энергию теплоносителя, вытекающего при аварии из первого контура для предотвращения повышения давления и температуры в ограждении сверх допустимых значений;

препятствовать выходу РАВ за пределы ГО при ядерных авариях.

КОНТАЙНМЕНТ – ДВОЙНАЯ ЗАЩИТНАЯ ОБОЛОЧКА



**Внутренняя оболочка из предварительно
напряженного
железобетона**

Внутренний диаметр мм 44000

Толщина мм 1200

Толщина металлической облицовки мм 6,0

Расчетное давление при проектной аварии
МПа 0,5

Расчетная температура °С 150

Свободный объем пространства под
оболочкой М³ 75000

**Внешняя оболочка из монолитного
железобетона**

Внутренний диаметр мм 50000

Толщина мм 800

Зазор между оболочками мм 1800

Герметичное ограждение РУ и биологическая защита

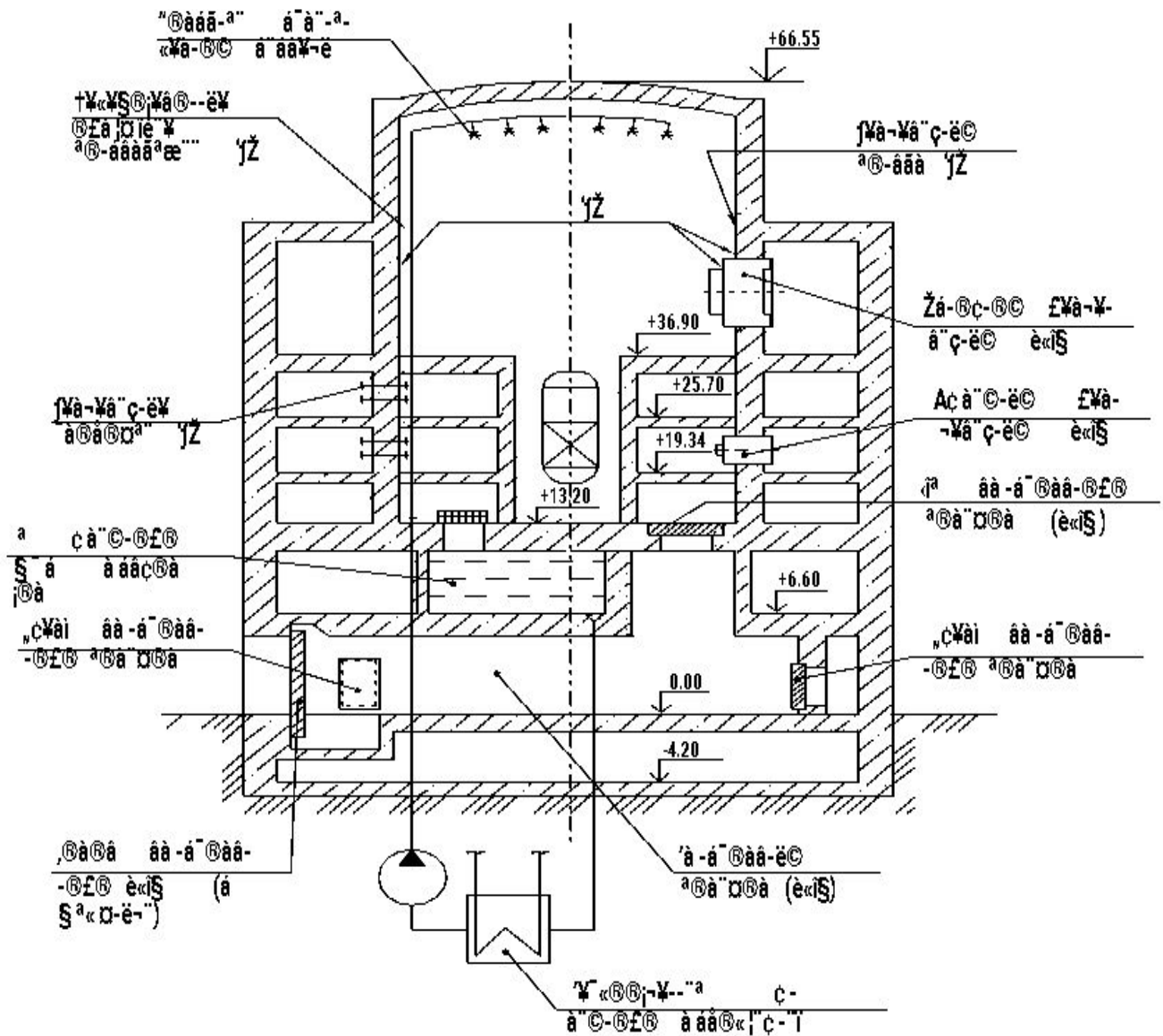
В состав ГО входят:

- герметизирующая металлическая облицовка;
- железобетонные ограждающие конструкции;
- основной, транспортный и аварийный шлюзы;
- предохранительные клапаны;
- изолирующая арматура и герметичные проходки, участки технологических трубопроводов.

Защитное ограждение, в соответствии с конструкцией, рассчитано на давление 0,5 МПа и температуру 170⁰С в течение 24 часов в аварийных условиях. Максимальная скорость утечки не должна превышать 0,1 % в день от объема воздуха при предельно допустимом давлении [46].

Нарушение герметичности ГО в процессе ядерных аварий может произойти при повышении давления и температуры, что приводит к появлению трещин в корпусе и разгерметизации уплотнений проходок.

Герметичное ограждение РУ и биологическая защита



Уровни глубокоэшелонированной защиты

Принцип глубокоэшелонированной защиты (ГЭЗ) предусматривает не только использование систем, оборудования и инженерно-технических средств для обеспечения безопасности, но также учитывает деятельность персонала (организацию эксплуатации АЭС, руководство и контроль администрации, подготовленность и действия персонала). Важную роль в реализации этого принципа выполняют уровни ГЭЗ.

Уровни ГЭЗ – это система технических и организационных мер, направленных на защиту физических барьеров, сохранение их эффективности с целью защиты персонала, населения и окружающей среды. Они включают пассивные системы, автоматические системы безопасности (СБ) и СБ, включающиеся вручную, а также комплекс организационно-технических мероприятий, предусмотренных для обеспечения выполнения важных функций безопасности.

Уровни глубокоэшелонированной защиты

Система защиты барьеров и меры по преодолению возникающих аномальных и аварийных ситуаций в соответствии с принципом ГЭЗ являются основой управления нарушениями, инцидентами и авариями для обеспечения выполнения функциональных задач безопасности на АЭС.

- Система технических и организационных мер образует пять уровней глубоко эшелонированной защиты и включает следующие уровни.
- **Уровень 1** (Условия размещения АЭС и предотвращение нарушений нормальной эксплуатации):
 - оценка и выбор площадки, пригодной для размещения АЭС;
 - установление санитарно-защитной зоны, а также зоны наблюдения вокруг АЭС, на которой осуществляется планирование защитных мероприятий;

Уровни глубокоэшелонированной защиты

- разработка проекта на основе консервативного подхода с развитым свойством внутренней самозащищенности РУ;

обеспечение требуемого качества систем (элементов) АЭС и выполняемых работ;

- эксплуатация АЭС в соответствии с требованиями нормативных документов, технологических регламентов и инструкций по эксплуатации;
- поддержание в исправном состоянии систем (элементов), важных для безопасности, путем своевременного определения дефектов, принятия профилактических мер, замены выработавшего ресурс оборудования и организация эффективно действующей системы документирования результатов работ и контроля;
- подбор и обеспечение необходимого уровня квалификации персонала АЭС для действий при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая предаварийные ситуации и аварии, формирование культуры безопасности.

Уровни глубокоэшелонированной защиты

Уровень 2 (Предотвращение проектных аварий системами нормальной эксплуатации):

- выявление отклонений от нормальной работы и их устранение;
- управление при эксплуатации с отклонениями.

Уровень 3 (Предотвращение запроектных аварий системами безопасности):

- предотвращение перерастания исходных событий в проектные аварии, а проектных аварий в запроектные с применением систем безопасности;
- ослабление последствий аварий, которые не удалось предотвратить, путем локализации выделяющихся радиоактивных веществ.

Уровни глубокоэшелонированной защиты

Уровень 4 (Управление запроектными авариями):

- предотвращение развития запроектных аварий и ослабление их последствий;
- защита герметичного ограждения от разрушения при запроектных авариях и поддержание его работоспособности; возвращение АЭС в контролируемое состояние, при котором прекращается цепная реакция деления, обеспечивается постоянное охлаждение ядерного топлива и удержание радиоактивных веществ в установленных границах.

Уровень 5 (Противоаварийное планирование):

- подготовка и осуществление при необходимости планов противоаварийных мероприятий на площадке АЭС и за ее пределами.

Уровни глубоко эшелонированной защиты при эксплуатации энергоблока АЭС

5 уровень

Планирование мероприятий по защите персонала и населения

4 уровень

Управление запроектными авариями

3 уровень

Предотвращение и ликвидация аварий СБ

2 уровень - предотвращение аварийных ситуаций и проектных аварий системами нормальной эксплуатации.

1 уровень - Создание условий, предотвращающих нарушения нормальной эксплуатации

Значения параметров технологического процесса и характеристик систем и оборудования находятся в режиме:

эксплуатационных пределов

пределов безопасной эксплуатации

проектных пределов для аварии

санитарно-защитных норм и допустимых воздействий на население и окружающую среду

Уровень 1. Создание условий, предотвращающих нарушения нормальной эксплуатации:

- оценка и выбор площадки, пригодной для размещения АС;
- разработка проекта на основе консервативного подхода с развитым свойством внутренней самозащищенности РУ;
- обеспечение требуемого качества систем (элементов) АС и выполняемых работ;
- эксплуатация АС в соответствии с требованиями нормативных документов, технологических регламентов и инструкций по эксплуатации;
- поддержание в исправном состоянии систем (элементов), важных для безопасности, путем своевременного определения дефектов, принятия профилактических мер, замены выработавшего ресурс оборудования и организации эффективно действующей системы документирования результатов работ и контроля;
- подбор персонала АС и обеспечение необходимого уровня его квалификации для действий в условиях нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварийные ситуации и аварии;
- формирование культуры безопасности.



Уровень 2 (Предотвращение проектных аварий системами нормальной эксплуатации):

- своевременное выявление отклонений от нормальной работы и их устранение;
- управление при нарушениях нормальной эксплуатации.



Уровень 3 (Предотвращение аварий системами безопасности):

- предотвращение развития отказов оборудования и ошибок персонала в проектные аварии, а проектных аварий - в запроектные с применением систем безопасности;
- ослабление последствий аварий, которые не удалось предотвратить, путем удержания выделяющихся радиоактивных веществ локализуемыми системами безопасности.

Уровень 4 (Управление запроектными авариями):

- предотвращение развития запроектных аварий и ослабление их последствий;
- защита герметичного ограждения от разрушения при запроектных авариях и поддержания его работоспособности;
- возвращение АС в контролируемое состояние, при котором прекращается цепная реакция деления, обеспечивается постоянное охлаждение ядерного топлива и удержание радиоактивных веществ в установленных границах.



Уровень 5 (Планирование мероприятий по защите персонала и населения):

- установление санитарной зоны и зоны наблюдения вокруг АС;
- подготовка и осуществление при необходимости планов мероприятий по защите персонала и населения.

Уровни глубоко эшелонированной защиты при эксплуатации энергоблока АЭС

5 уровень

Обеспечивает защиту населения в случае тяжелых аварий

4 уровень

Обеспечивает сохранение уцелевших при аварии барьеров безопасности мерами и средствами по управлению авариями

3 уровень

Обеспечивает преодоление проектных аварий

2 уровень

Обеспечивает обнаружение и предотвращение развития отклонений от условий нормальной эксплуатации

1 уровень

Обеспечивает поддержание блока в рамках и условиях нормальной эксплуатации

Значения параметров технологического процесса и характеристик систем и оборудования находятся в режиме:

эксплуатационных пределов

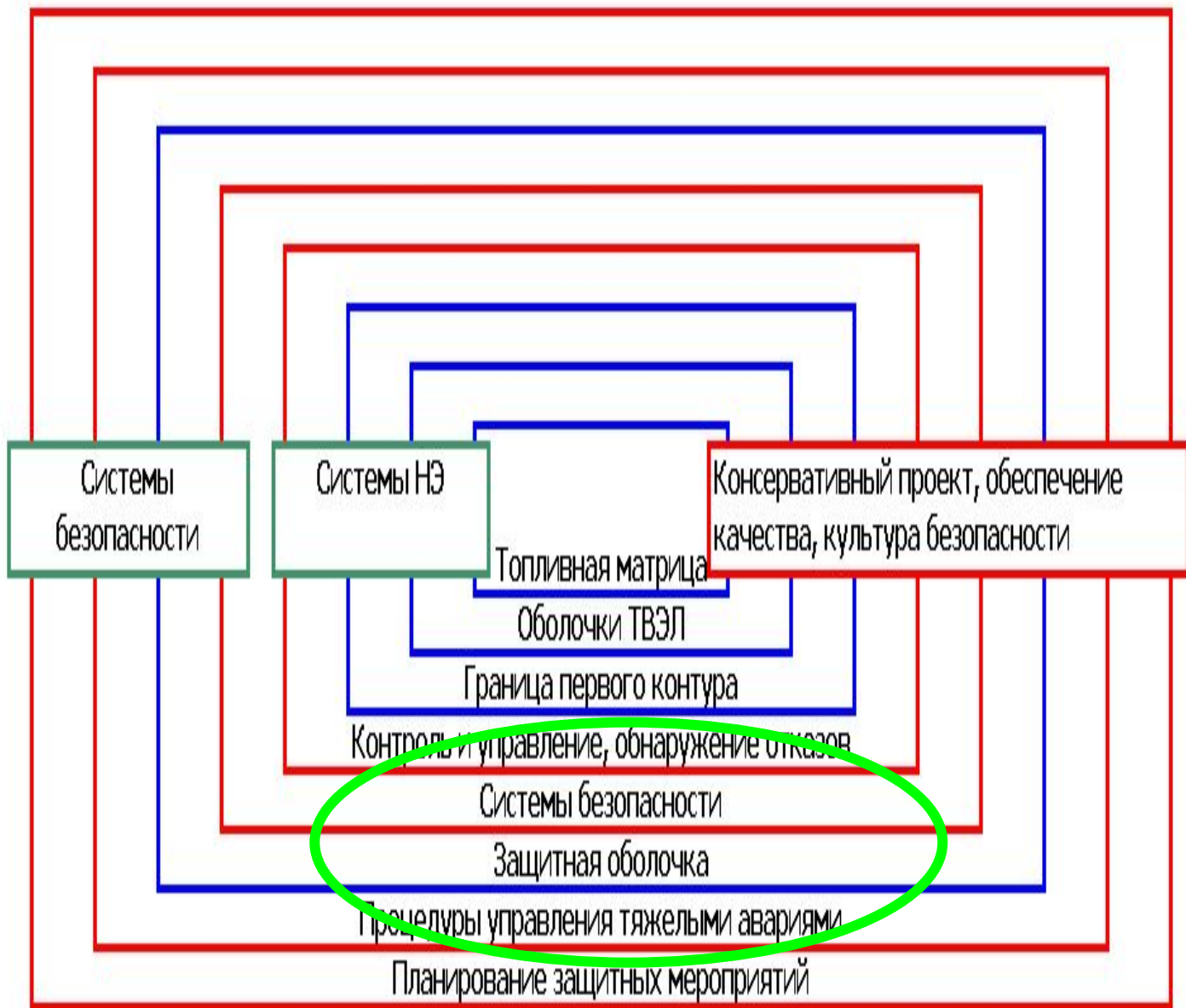
пределов безопасной эксплуатации

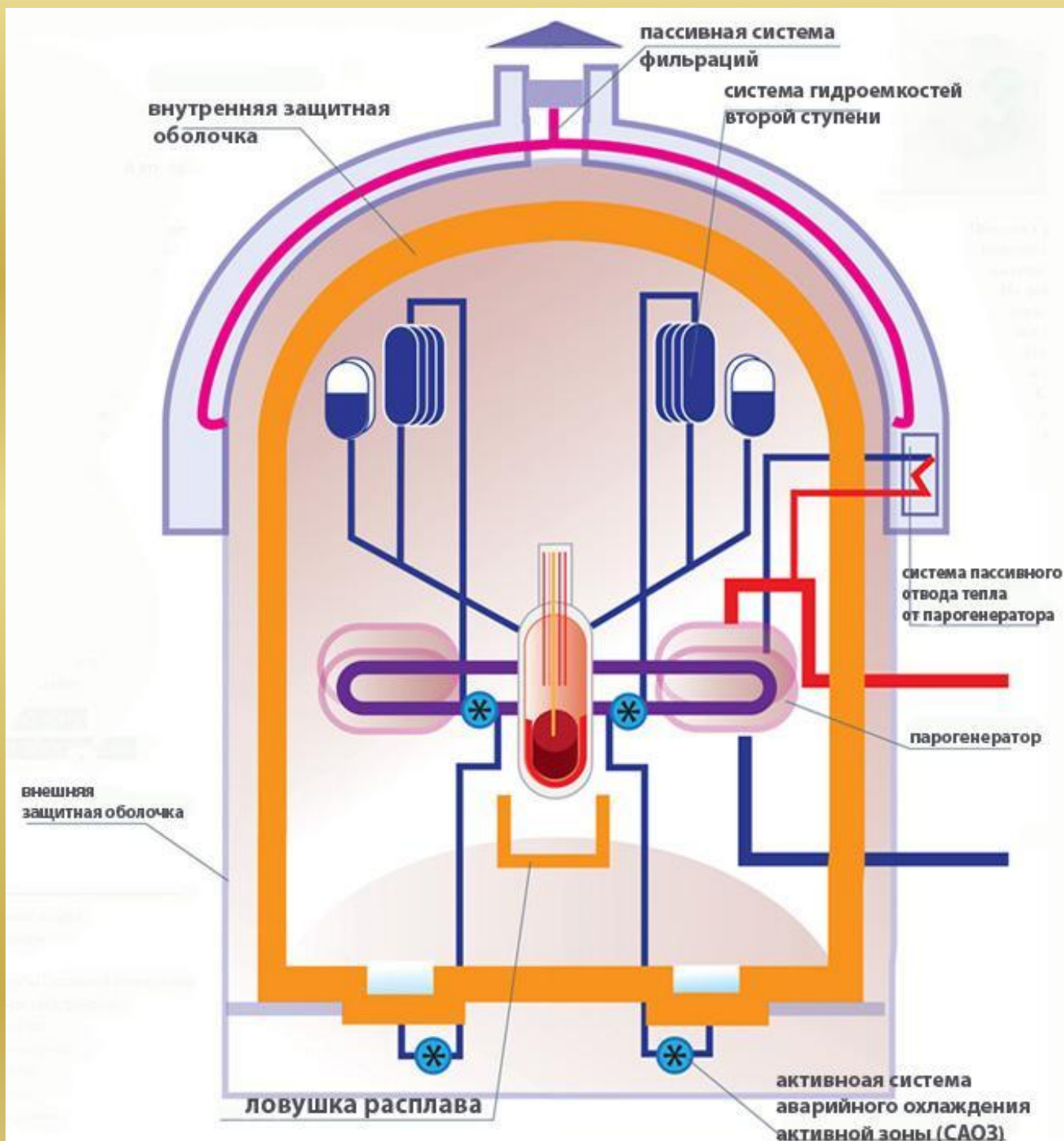
проектных пределов для аварии

санитарно-защитных норм и допустимых воздействий на население и окружающую среду



Область условий расширенного проектирования для эшелонированной защиты





Учись учиться!

