ОАО НИЖЕГОРОДСКАЯ ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ
«АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ» (ОАО «НИАЭП»)

РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Концепция безопасности проекта Белорусской АЭС

Докладчик:

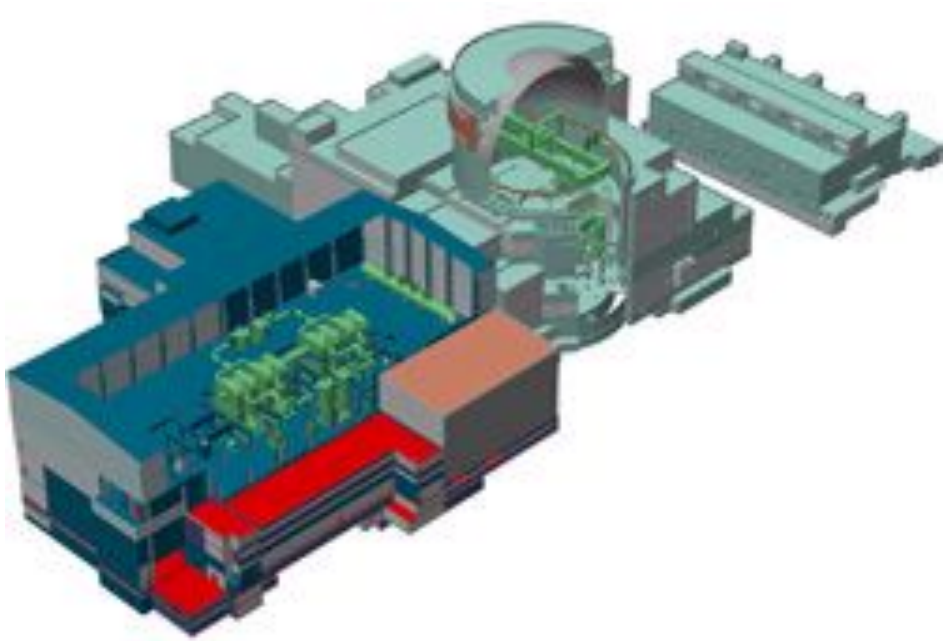
Д.В. Шкитилев –
главный инженер

Референция

Основой проекта Белорусской АЭС является проект строящейся Балтийской АЭС (серийный проект АЭС-2006) с реактором технологии ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), выполняемый в современной информационной среде и в соответствии с требованиями ядерной и радиационной безопасности.

Балтийская АЭС - результат эволюционного развития наиболее распространенного и, как следствие, наиболее технически совершенного типа станций – АЭС с ВВЭР (водо-водяными энергетическими реакторами). В качестве теплоносителя и в качестве замедлителя нейтронов в таком реакторе используется "легкая" (обычная) вода. Принятая в мире аббревиатура для этих реакторов – PWR (pressurized water reactor) – реактор с водой под давлением.

Референция



Ближайший аналог – Ленинградская АЭС, строящаяся по проекту серийной АЭС-2006.

АЭС-2006 является развитием Тяньваньской АЭС построенной в Китае по проекту ОАО "СПбАЭП" и сданной в коммерческую эксплуатацию в 2007 году.

По мнению ведущих экспертов, Тяньваньская АЭС является одной из самых передовых и безопасных действующих атомных станций в мире.

Основные принципы и подходы при проектировании

Параметры реакторной установки, характеристики оборудования машзала и конфигурация систем безопасности выбирались исходя из следующих основных принципов и подходов:

- ✔максимальное использование решений и обоснований уже разработанных проектов с реакторами ВВЭР (действующие АЭС с РУ В-320, Тяньваньская АЭС в КНР, АЭС с ВВЭР-640, АЭС — 91/99 для тендера в Финляндии);
- ✔минимизация рисков и улучшение эксплуатационных характеристик за счет использования апробированных технических решений и референтного оборудования;
- ✔улучшение характеристик оборудования и систем за счет снятия избыточного консерватизма и оптимизации проектных запасов;
- ✔обеспечение требуемого уровня безопасности, в том числе и при запроектных авариях, на основе выбора рациональной конфигурации систем безопасности с применением активных и пассивных элементов, позволяющих более широко реализовать принцип разнообразия и снизить влияние человеческого фактора;
- ✔снижение капитальных и эксплуатационных затрат за счет:
  1) применения серийного оборудования и сокращения номенклатуры оборудования;
  2) оптимизации решений по обращению с радиоактивными отходами и отработавшим топливом;
  3) усовершенствования технологии ремонтных работ;
  4) оптимизации численности эксплуатационного и ремонтного персонала;

Основные технико-экономические показатели проекта Балтийской АЭС

Наименование характеристики	Планируемая величина
Срок службы энергоблока, лет	50
Установленная номинальная мощность энергоблока, МВт (э)	1194
Коэффициент полезного действия, %- брутто	37,17
Коэффициент полезного действия, %- нетто	34,51
Расход электроэнергии на собственные нужды, %	7,15
Коэффициент готовности	0,92
Среднегодовой отпуск электроэнергии от одного блока при работе АЭС в базовом режиме без отпуска теплоты, млн.кВт*ч	8517,8
Сейсмические воздействия, баллы по шкале MSK-64: - для строительных конструкций зданий и сооружений, ПЗ/МРЗ - для неизменяемой части проекта (в т.ч. для оборудования реакторной установки)	 6/7 7/8

Общая характеристика

Каждый энергоблок оснащен реакторной установкой В-491 с водо-водяным энергетическим реактором с водой под давлением, а также турбиной К-1200-6,8/50 (число оборотов 3000 об/мин) с генератором переменного тока ТЗВ-1200-2УЗ электрической мощностью не менее 1195МВт.

Тепловая схема - двухконтурная.

В составе энергоблока АЭС работа реакторной установки предусматривается как в базовом режиме, так и в режимах маневрирования.

Реакторная установка включает в себя следующее основное оборудование и системы:

- ✔водо-водяной энергетический реактор корпусного типа номинальной тепловой мощностью 3200 МВт под давлением теплоносителя 16,2 МПа, теплоносителем и замедлителем в реакторе является вода с борной кислотой, концентрация которой изменяется в процессе эксплуатации, в качестве топлива в активной зоне реактора используется слабо обогащенный диоксид урана;
- ✔четыре горизонтальных парогенератора типа ПГВ-1000МКП с разреженной коридорной компоновкой теплообменных труб в трубном пучке, производительность каждого ПГ составляет (1602+112) т/ч сухого насыщенного пара давлением 7,0 МПа;
- ✔четыре главных циркуляционных насосных агрегата типа ГЦНА-1391;
- ✔главные циркуляционные трубопроводы Ду 850;
- ✔систему компенсации давления;
- ✔оборудование бетонной шахты реактора;
- ✔системы безопасности.

Общая характеристика

Второй контур - не радиоактивный и состоит из паропроизводительной части парогенераторов, главных паропроводов, одного турбоагрегата, вспомогательного оборудования и обслуживающих систем, оборудования деаэрации, подогрева и подачи питательной воды в парогенераторы.

Компоновка каждого энергоблока АЭС выполнена по принципу максимального блокирования основных зданий и сооружений с сохранением территориального разделения зданий с зоной контролируемого доступа и зданий свободного доступа.

Основное технологическое оборудование, примененное в проекте, имеет многолетний положительный опыт эксплуатации на отечественных АЭС и АЭС за рубежом, построенных по российским проектам.

Проект обладает высокой степенью лицензируемости, которая основывается на следующем:

- ✔проект базируется на критериях безопасности, содержащихся в нормативной документации, действующей в России, и учитывает рекомендации МАГАТЭ;
- ✔концепция проекта основана на использовании освоенной технологии предлагаемого оборудования, наличии прототипов, опыте сооружения и эксплуатации отечественных и зарубежных энергоблоков;
- ✔концепция проекта базируется на применении общепринятых и апробированных в ядерной энергетике технических решений.

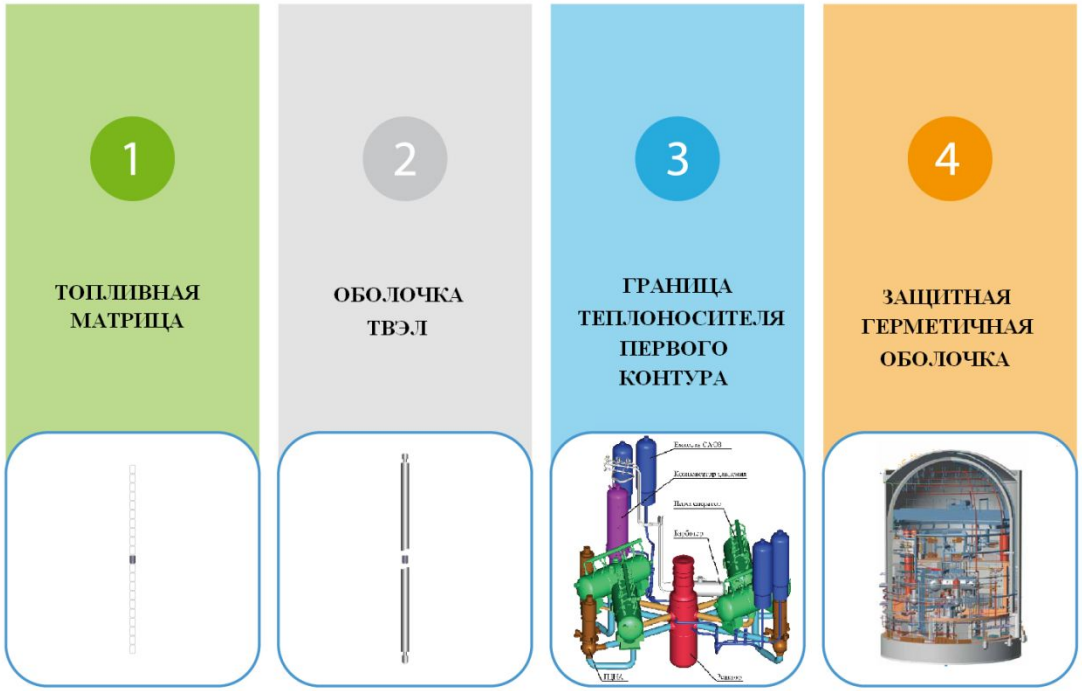
Защита населения и окружающей среды

Обеспечение радиационной безопасности организуется и осуществляется в целях предотвращения недопустимого воздействия источников ионизирующего излучения на персонал, население и окружающую среду в районе размещения АЭС. Концепция по обеспечению радиационной и ядерной безопасности в проекте Белорусской АЭС основана на:

- **требованиях российских действующих правил и норм по безопасности в области атомной энергетики с учетом их дальнейшего развития;**
- **современной философии и принципах безопасности, выработанных мировым ядерным сообществом и закрепленных в нормах безопасности МАГАТЭ;**
- **работах Международной консультативной группы по ядерной безопасности (INSAG), требованиях EUR;**
- **комплексе отработанных и проверенных эксплуатацией технических решений;**
- **верифицированных и аттестованных расчетных методах, кодах и программах, отработанной методологии анализа безопасности, достоверной базе данных;**
- **организационных и технических мерах по предотвращению и ограничению последствий тяжелых аварий;**
- **опыте разработки установок нового поколения повышенной безопасности;**
- **обеспечении низкой чувствительности к ошибкам и ошибочным решениям персонала;**
- **обеспечении низких рисков значительных выбросов радиоактивных веществ при авариях;**
- **обеспечении возможности выполнения функций безопасности без подвода энергии извне;**
- **обеспечении отсутствия необходимости эвакуации населения, проживающего вблизи АЭС, при тяжелых авариях.**

Основа безопасности

В основу обеспечения безопасности в проекте АЭС заложен принцип глубокоэшелонированной защиты - применение системы барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду и системы технических и организационных мер по защите барьеров и сохранению их эффективности и непосредственно по защите населения.



Для АЭС с реакторами ВВЭР такими барьерами являются

- ✔топливная матрица
- ✔герметичные оболочки твэл
- ✔границы контура теплоносителя, охлаждающего активную зону реактора (реактор, компенсатор давления, главные циркуляционные насосы, коллекторы I контура парогенераторов, соединительные трубопроводы I контура)
- ✔герметичное ограждение помещений, внутри которых размещено оборудование и трубопроводы реакторной установки;

Основа безопасности

Система технических и организационных мер состоит из пяти уровней защиты:

Первый уровень:

✔консервативный проект, основанный на использовании современных норм;
✔обеспечение качества на всех стадиях создания АЭС;
✔контроль состояния барьеров безопасности при эксплуатации;
✔культура безопасности.

Второй уровень:

✔управление при нарушениях эксплуатации и выявлении отказов.
Этот уровень включает в себя защиты и блокировки, резервные механизмы нормальной эксплуатации и предусматривается для обеспечения постоянной целостности барьеров.

Третий уровень:

✔Защитные, управляющие, локализующие и обеспечивающие системы безопасности, которые предусматриваются в проекте для предотвращения развития отказов и ошибок персонала в проектные аварии, а проектных аварий в запроектные аварии и для удержания радиоактивных продуктов внутри системы локализации.

Основа безопасности

Четвертый уровень:

✔управление аварией, включая защиту локализующих функций.

Пятый уровень:

✔противоаварийные меры вне площадки с целью ослабления последствий выброса радиоактивных продуктов во внешнюю среду.

Применение принципа глубокоэшелонированной защиты позволяет выполнить требования полноты учета возможных состояний АЭС с обеспечением разумной достаточности мер безопасности.

Защита от внешних воздействий

Наиболее значимые воздействия, учтенные в проекте:

Внешние взрывы

Компоненты АЭС, связанные с безопасностью, разработаны с учетом ударной волны, вызванной внешним взрывом. Давление во фронте ударной волны принято равным 30 kPa, продолжительность стадии сжатия 1 с.

Авиакатастрофы

Проектом АЭС предусматривается возможность падения самолета.

Снеговая и ледовая нагрузка

Пиковая (экстремальная) снеговая нагрузка, принятая в проекте, равна 4,1 kPa.

Ураганы, смерчи, торнадо

Связанные с безопасностью компоненты разработаны с учетом ветровой нагрузки при скорости ветра 30 м/с на высоте 10 м. Нагрузки, принятые в проекте, – нагрузки, наведенные вихрем класса 3,60 по шкале Fujita.

Наводнения

АЭС разработана с учетом возможности наводнения.

Сейсмические нагрузки

АЭС разработана с учетом землетрясения максимальным горизонтальным ускорением на уровне земли, равным 0,25 g.

Защита от внешних воздействий

Системы и элементы АЭС в составе базового варианта проекта разработаны исходя из следующих природных и техногенных проектных воздействий:

- ✔максимального расчетного землетрясения (МРЗ) до 8 баллов по шкале MSK-64 с максимальным горизонтальным ускорением на свободной поверхности грунта 0,25g;
- ✔проектного землетрясения (ПЗ) до 7 баллов по шкале MSK-64 с максимальным горизонтальным ускорением на свободной поверхности грунта 0,12g;
- ✔падения самолета и прочих летящих предметов весом 5,7 т со скоростью 100 м/с;
- ✔внешней ударной волны с давлением сжатия во фронте 30 кПа и продолжительностью фазы сжатия до 1 с;
- ✔ветровой нагрузки при скорости ветра до 30 м/с на высоте 10м.

Вокруг реактора предусмотрена двойная защитная оболочка. Наружная оболочка защищает от вышеуказанных внешних воздействий.

Внутренняя герметичная оболочка с металлической облицовкой позволяет выдерживать давление и высокие колебания температур при проектных авариях.

Концепция систем безопасности

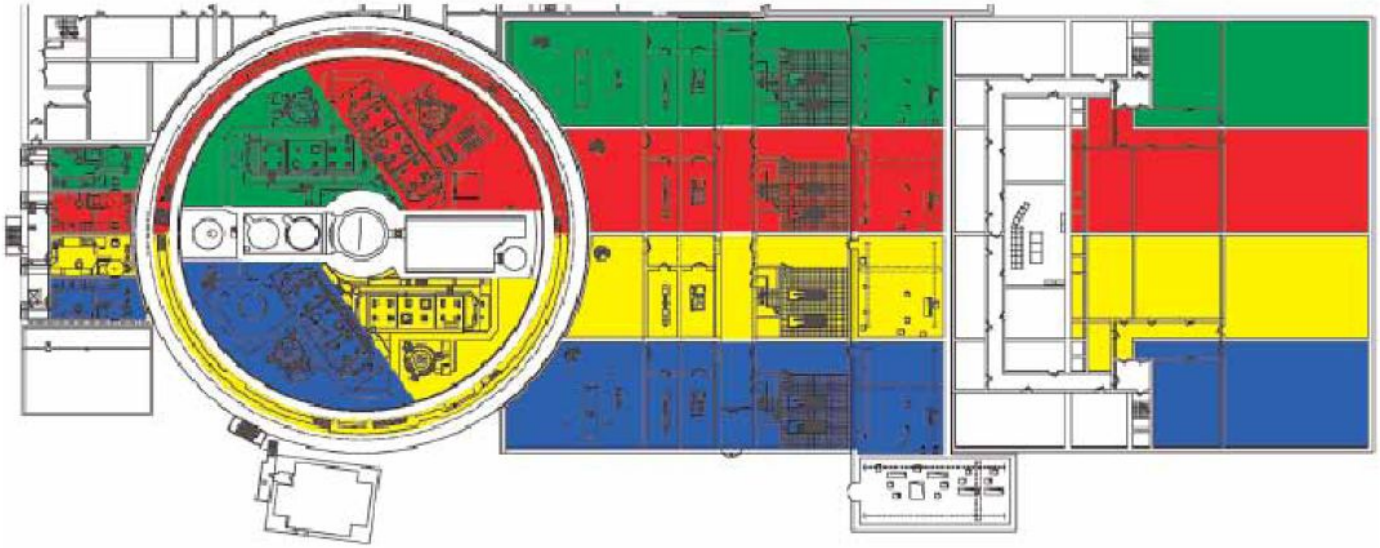
Системы безопасности состоят из четырех полностью независимых каналов. Мощность, быстрота действия и другие характеристики каждого канала выбраны исходя из условий обеспечения ядерной и радиационной безопасности при любых исходных событиях, рассматриваемых в проекте.

За счет расположения каналов систем безопасности в отдельных помещениях достигнута высокая степень физического разделения каналов.

Каналы безопасности отделены один от другого огнестойкими физическими барьерами по всей границе канала, включая коммуникации между зданиями. Прямые связи между разными каналами безопасности не допускаются.

Предусматривается физическая защита каналов безопасности от несанкционированного доступа персонала.

Концепция систем безопасности



Физическое разделение каналов безопасности

Концепция систем безопасности

Основные принципы проектирования технических и специальных технических средств, обеспечивающих безопасность АЭС-2006, соответствуют требованиям действующих нормативно-технических документов России и рекомендациям МАГАТЭ.
Перечень основных принципов проектирования технических и специальных технических средств, используемых в проекте.

Принцип проектирования	Реализация в проекте
Принцип единичного отказа	**Детерминистически положен в основу всех СБ за счет применения четырехканальной структуры**
Пассивность	**1) Применяется для отдельных систем/элементов СБ (например, обратный клапан, гидроемкость САОЗ под давлением азота, разрывная мембрана (барботер);** **2) Применены пассивные технические средства управления ЗПА (СПОТ ПГ, СПОТ ЗО), резервирующие критические функции безопасности**
Разнообразие	**Применяется. Резервирование систем безопасности по выполнению основных функций безопасности выполняют системы, использующие отличное от СБ оборудование и по возможности принцип действия**
Физическое разделение	**Применяется. Все четыре канала СБ, включая обеспечивающие и управляющие системы безопасности, территориально разделены, что обеспечивает защиту от отказов по общей причине при пожаре, падении самолета, терроре. Пункты управления энергоблоком (БПУ, РПУ, ЗПУПД) также разнесены по различным помещениям/зданиям.**

Состав систем безопасности

Наименование	Число каналов и эффективность
Защитные, локализующие, обеспечивающие и управляющие системы безопасности	
1. Система САОЗ высокого давления	4 x 100%
2. Система САОЗ низкого давления	4 x 100%
3. Система аварийного ввода бора	4 x 50%
4. Системы аварийной питательной воды и отвода тепла через БРУ-А	4 x 100%
5. Спринклерная система защитной оболочки	4 x 50%
6. Система отвода остаточного тепла и расхолаживания РУ через первый контур	4 x 100%
7. Система промконтура охлаждения ответственных потребителей	4 x 100%
8. Система технической воды ответственных потребителей	4 x 100%
9. Системы вентиляции помещений СБ	4 x 100%
10. Система локализующей арматуры герметичной оболочки	2 x 100%
11. Система хранения борированной воды	2 x 100%
12. Система аварийного газоудаления	2 x 100%
13. Система защиты первого контура от превышения давления	2 x 100%
14. Система защиты второго контура от превышения давления	2 x 100%
15. Система отсечения главных паропроводов (БЗОК)	2 x 100%
16. Система обеспечения аварийного электропитания от дизель-генераторов	4 x 100%

Состав систем безопасности

Наименование	Число каналов и эффективность
Пассивные системы безопасности	
19. Система гидроемкостей САОЗ	4 х 50%
20. Система герметичных ограждений реакторного отделения	+
Системы по управлению ЗПА	
21. Система пассивного отвода тепла через ПГ (СПОТ ПГ)	4 х 33%
22. Система пассивного отвода тепла из объема герметичной оболочки (СПОТ ЗО)	4 х 33%
23. Система локализации расплава	1 х 100%
24. Система удаления водорода из герметичной оболочки	1 х 100%
25. Система химического связывания летучих форм йода	1 х 100%
26. Средства по аварийному снижению давления в I контуре	2 х 100%
27. Вентиляционная система для поддержания разрежения в пространстве между оболочками	2 х 100%

Системы по преодолению запроектных аварий (ЗПА)

На случай прекращения подачи электроэнергии предусмотрен целый ряд мер управления запроектными авариями. На случай аварии предусмотрены системы охлаждения реакторной установки, которые могут работать в течение длительного времени в автономном режиме, отводя тепло от реактора и поддерживая его в безопасном состоянии.

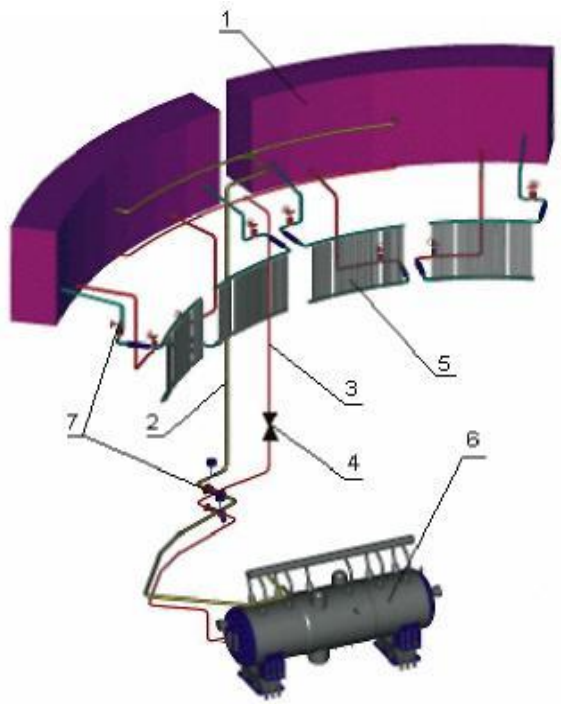
<u>Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки</u>

Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки относится к техническим средствам преодоления запроектных аварий и предназначена для длительного (автономный режим — не менее 24 часов) отвода тепла от защитной оболочки при ЗПА.

Система обеспечивает снижение и поддержание в заданных проектом пределах давления внутри защитной оболочки и отвод конечному поглотителю тепла, выделяющегося под защитную оболочку, при запроектных авариях, включая аварии с тяжелым повреждением активной зоны.

<u>Система пассивного отвода тепла через парогенераторы</u>

Система пассивного отвода тепла через парогенераторы предназначена для длительного отвода остаточного тепла активной зоны конечному поглотителю через второй контур при запроектных авариях. Система дублирует соответствующую активную систему отвода тепла к конечному поглотителю в случае невозможности выполнения ее проектных функций.



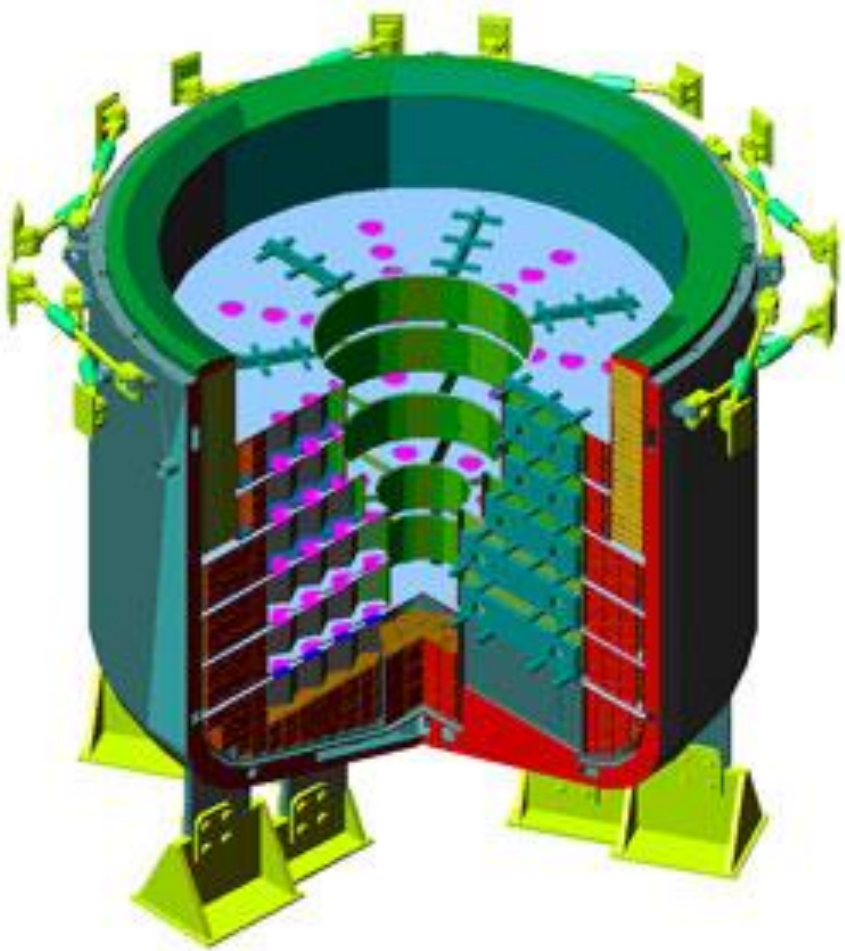
1 – баки аварийного отвода тепла
2 – паропроводы
3 – трубопроводы конденсата
4 – клапаны СПОТ ПГ
5 – теплообменники СПОТ ЗО
6 – парогенератор
7 – отсечная арматура

Системы по преодолению запроектных аварий (ЗПА)

Система локализации расплава (УЛР)

Система (или устройство) локализации расплава - уникальная российская технология безопасности, которая является одним из технических средств, специально предусмотренных для управления тяжелыми запроектными авариями на внекорпусной стадии.

В УЛР осуществляется прием, размещение и охлаждение расплава материалов активной зоны, внутрикорпусных устройств и корпуса реактора вплоть до полной кристаллизации.



Системы по преодолению запроектных аварий (ЗПА)

Система удаления водорода из защитной оболочки

Система контроля и удаления водорода из защитной оболочки состоит из двух независимых подсистем:

- ✔системы удаления водорода из защитной оболочки;
- ✔системы контроля концентрации водорода под защитной оболочкой.

Система удаления водорода из защитной оболочки обеспечивает:

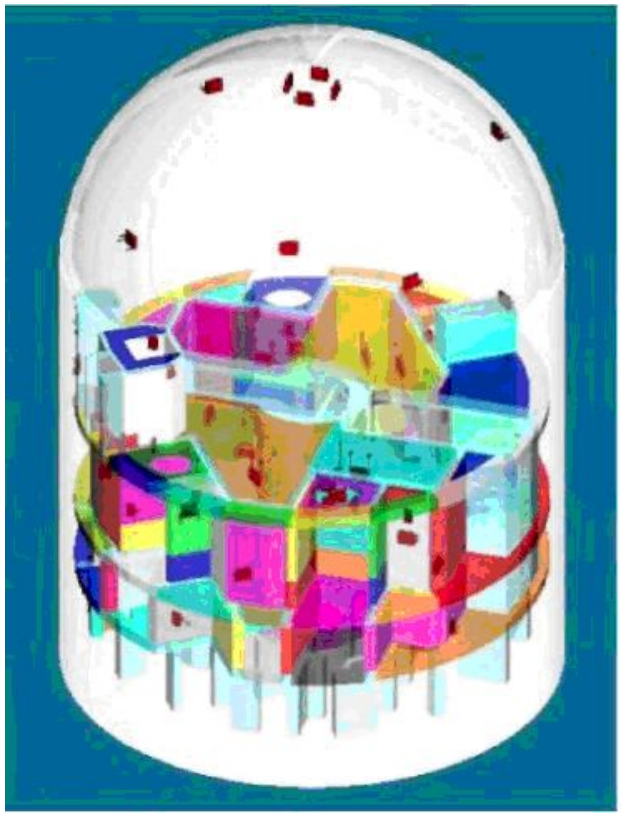
при проектных авариях поддержание концентраций водорода в смеси с водяным паром и воздухом ниже концентрационных пределов распространения пламени в расчетном диапазоне изменения параметров среды в помещениях под защитной оболочкой;

при запроектных авариях поддержание концентрации водорода на уровнях, исключающих детонацию и развитие быстрого горения в больших объемах (соизмеримых с размерами основных отсеков контаймента).

В состав оборудования системы удаления водорода входит комплект пассивных автокаталитических рекомбинаторов водорода (ПАРВ) и стенд для проведения контрольно-выборочных испытаний.

Системы по преодолению запроектных аварий (ЗПА)

Расположение пассивных автокаталитических рекомбинаторов водорода (ПАРВ) в ГО



Смонтированный ПАРВ

Устойчивость АЭС к воздействиям, аналогичным произошедшим на АЭС «Фукусима»

В «запроектной» ситуации энергоблоки АЭС «Фукусима-1» не выдержали действия перекрестных факторов – землетрясения и цунами. Хотя при их проектировании была предусмотрена защита от воздействия каждого в отдельности природного явления.

Катастрофа, которая произошла на Фукусиме, в принципе невозможна на Белорусской АЭС. Все технические решения, которые закладываются в проект, являются достаточными, чтобы обеспечить ее безопасную эксплуатацию.

Энергоблоки в Японии образца 60-х годов прошлого века относились к 1-му поколению реакторов.

Проект Балтийской АЭС, по аналогу которого будет сооружаться Белорусская АЭС, это проект атомной электростанции поколения III+, он был разработан в качестве базового для разных стран, в т.ч. сейсмоактивных.

Как было показано выше, проект Балтийской АЭС рассчитан на сейсмическую активность в 7 баллов, а реакторная установка – на 8 баллов. Однако землетрясений такой силы в районе размещения Белорусской АЭС быть не может.

Устойчивость АЭС к воздействиям, аналогичным произошедшим на АЭС «Фукусима»

Дополнительно предусмотрены следующие меры по защите от запроектных аварий:

- ✔двойная защитная оболочка вокруг реактора. Наружная оболочка защищает от внешних воздействий (ветровые нагрузки, торнадо, землетрясения, наводнения, ураганы, падение легкого самолета и др.). Внутренняя герметичная оболочка с металлическим покрытием позволяет выдерживать давление и высокие колебания температур при проектных авариях.
- ✔в проекте предусмотрено четыре активных канала систем безопасности. Оборудование каждого из них помещено в обособленные помещения, каналы безопасности обеспечивают выполнение функции безопасности независимо друг от друга.
- ✔система пассивного отвода тепла от парогенератора и от защитной оболочки.
- ✔система рекомбинаторов водорода в случае его образования исключит вероятность взрыва и разрушения строительных конструкций гермооболочки.
- ✔«ловушка расплава» - обеспечит удержание и охлаждение топлива даже в гипотетической ситуации, когда тепло от реактора не отводится и происходит плавление активной зоны с выходом радиоактивного вещества из корпуса реактора.

В случае возникновения нештатных ситуаций системы безопасности обеспечат безопасный останов и расхолаживание Белорусской АЭС.

Спасибо за внимание!