

# Тяжелые запроектные аварии

# Управление запроектными авариями

Управление запроектными авариями – это меры, направленные на достижение конечной цели – приведение энергоблока в устойчивое, безопасное и контролируемое состояние.

Исходные предпосылки для разработки мер по управлению тяжелыми авариями строятся на следующих принципах:

- - системы и компоненты АЭС содержат значительные консервативные запасы и сохраняют, по крайней мере, частично свою работоспособность в условиях тяжелых аварий;
- - большая часть тяжелых аварий развивается относительно медленно, и в распоряжении персонала имеется достаточно времени для вмешательства в развитие событий с тем, чтобы остановить развитие аварии, восстановить охлаждение топлива и сохранить целостность защитной оболочки.

# Стадии развития тяжелой аварии

- Потеря охлаждения активной зоны;
- Повреждение активной зоны;
- Расплавление активной зоны
- Проплавление (разрушение) корпуса реактора;
- Потеря герметичности (разрушение) защитной оболочки;
- Выброс радиоактивных материалов в окружающую среду сверх допустимых норм.

## Задачи управления

### Первый уровень.

- ✓ **Восстановить охлаждение активной зоны.** Критерий успешности действий – достижение в заданное время требуемых значений расхода охлаждающей воды. Если невозможно обеспечить требуемый расход воды, то должна быть предусмотрена подача воды в активную зону любым доступным расходом, чтобы замедлить процесс осушения а.з. и задержать повреждение и разрушение твэлов.

## Второй уровень.

- ✓ **Подача охлаждающей воды, сброс давления в первом контуре, сброс водорода через систему газоудаления.**

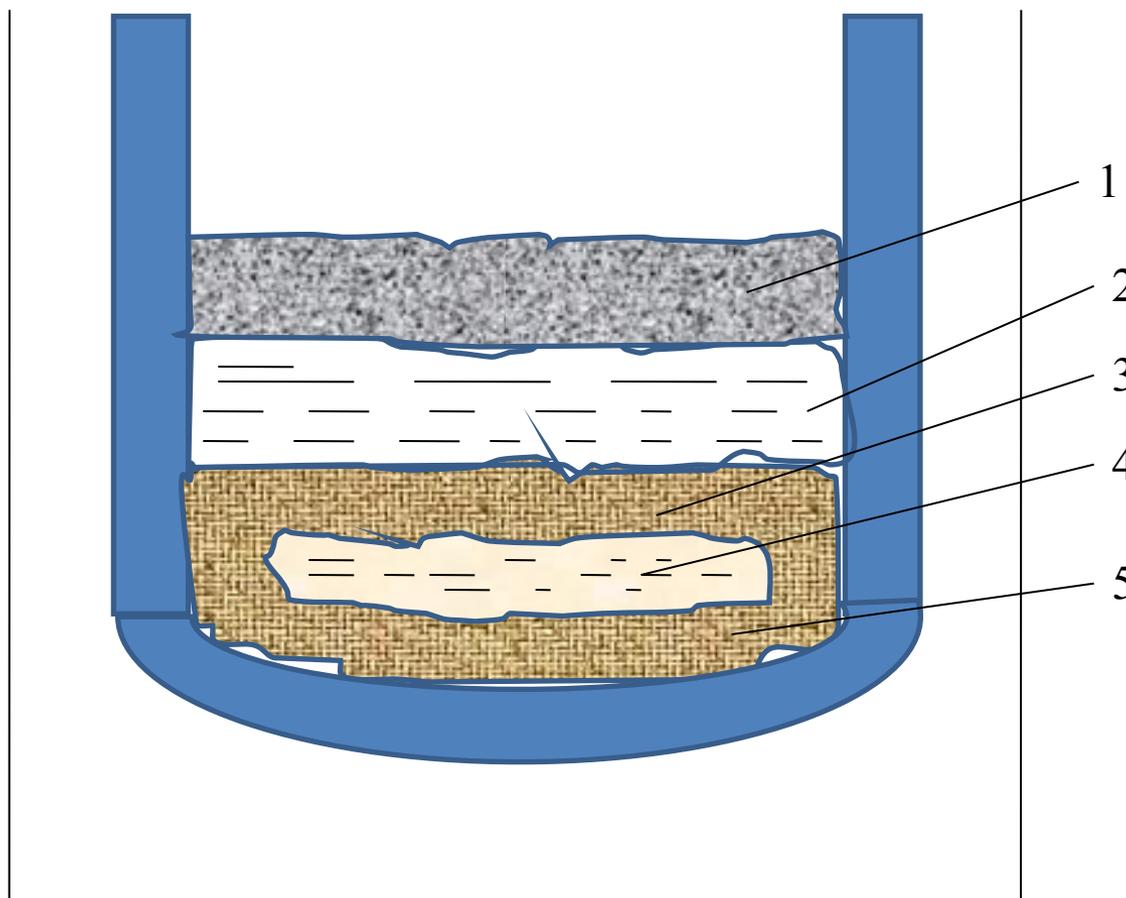
При сбросе давления вскипает теплоноситель, что способно задержать процесс разрушения а.з., ускорить срабатывание гидроемкостей САОЗ.

## Третий и четвертый уровни.

- ✓ **Обеспечить подачу воды на охлаждение расплава активной зоны.**
- ✓ **Удержание расплава возможно в корпусе реактора, бетонной шахте, устройстве локализации расплава (УЛР)**

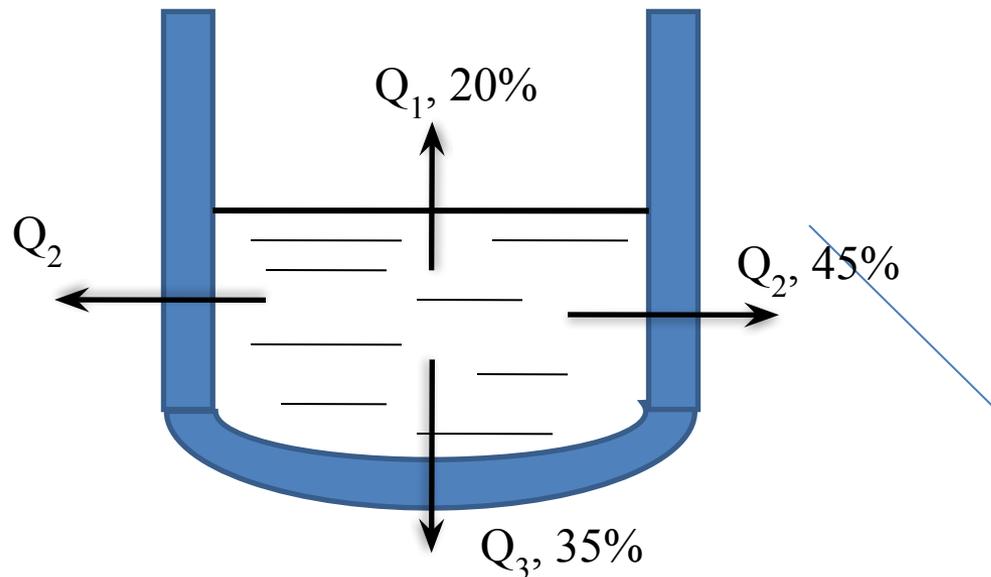
# Охлаждение корпуса реактора

1 – легкие  
компоненты (в  
частности  $B_4C$ ) при  
 $T \approx 1400^{\circ}C$   
2 – сталь при  
 $T \approx 2000^{\circ}C$ ;  
3 – кориум при  
 $T \approx 2000^{\circ}C$ ;  
4 – жидкий кориум  
при  $T \approx 2800^{\circ}C$ ;  
5 – затвердевший  
кориум при  
 $T \approx 1600^{\circ}C$

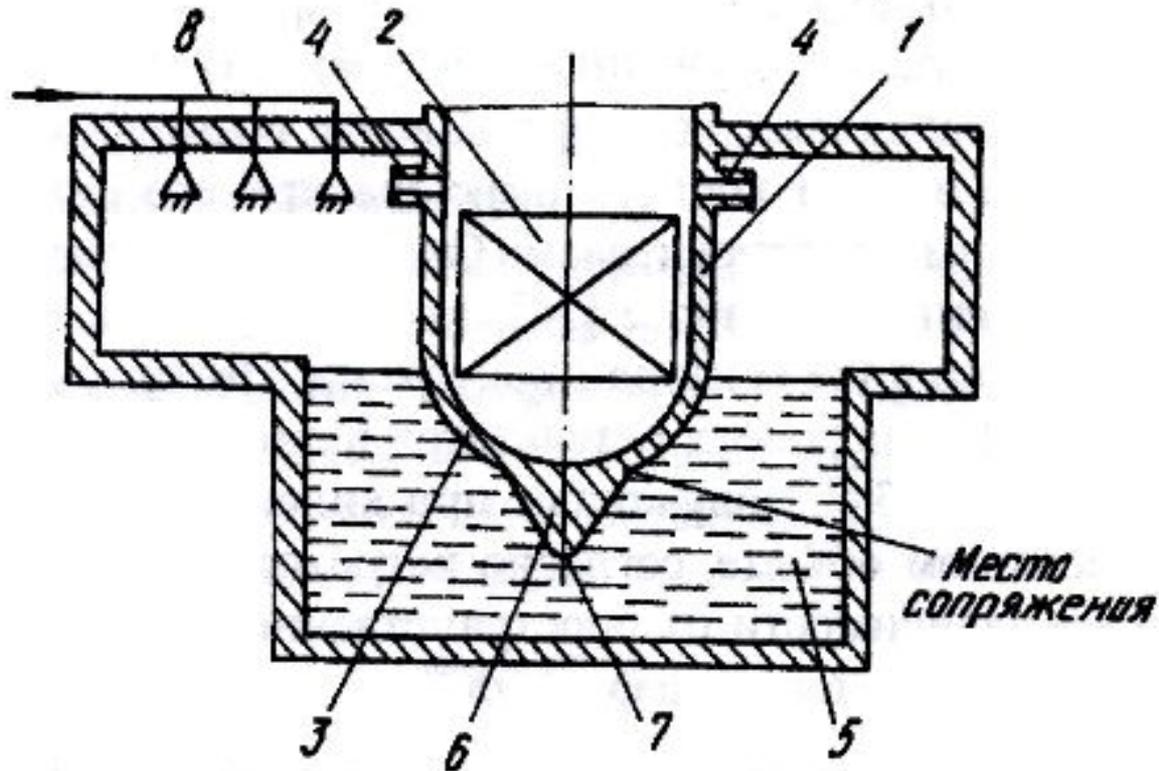


# Охлаждение корпуса реактора

- Критический тепловой поток на наклонных поверхностях (днище корпуса) Можно оценить по соотношению
- $q_{кр} = 0,310 + 0,0126 * \theta$ , МВт/м<sup>2</sup>, где  $\theta$  – угол наклона в градусах ( $\theta < 30^0$ ).
- Оценки показывают, что при пузырьковом кипении запас до кризиса в нижней (лобовой) точке днища значительно больше, чем на наклонных поверхностях.
- При пленочном кипении теплообмен на наклонных поверхностях лучше, чем в лобовой точке днища.

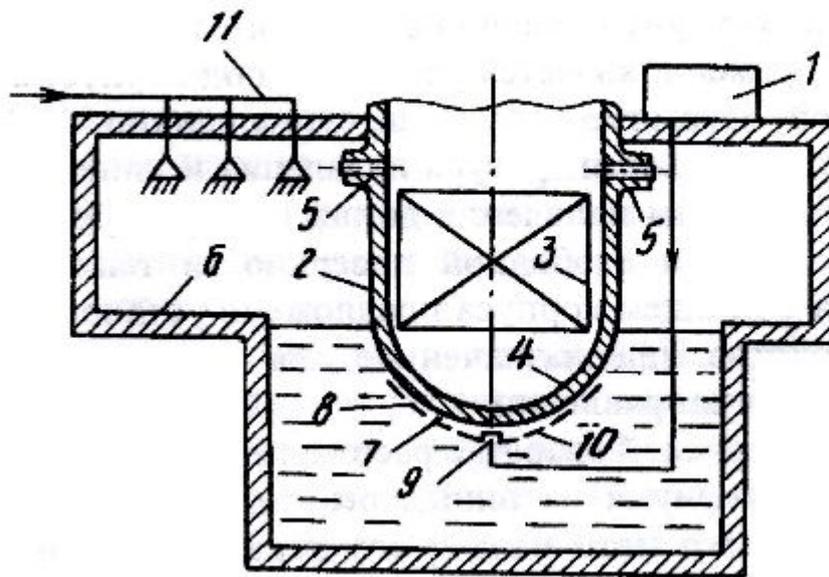


## Устройство для увеличения отвода тепла с днища корпуса



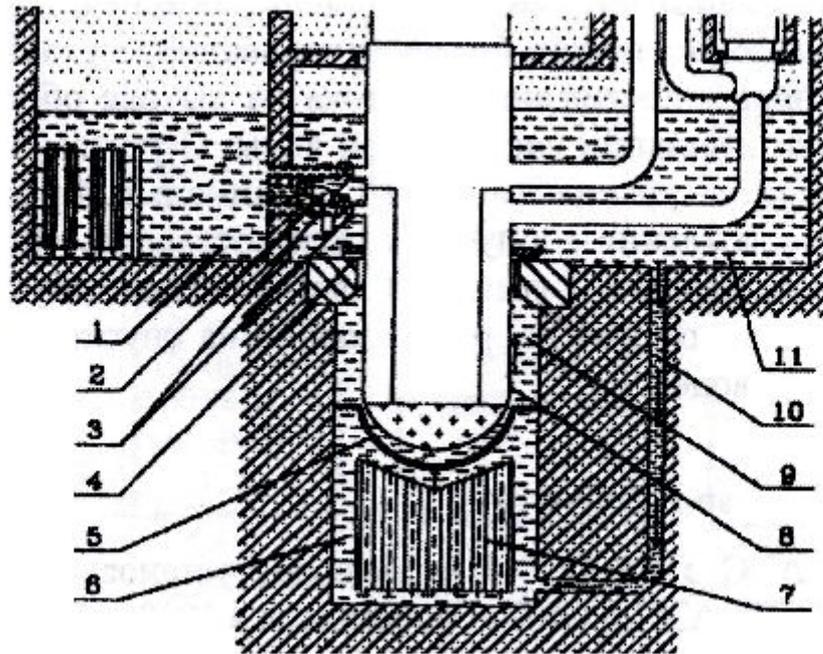
1 – корпус реактора, 2 – активная зона, 3 – днище реактора, 4 – патрубки, 5 – шахта реактора, 6 – конус на днище, 7 – закругленная вершина конуса, 8 – спринклерная система.

## Устройство для увеличения отвода тепла с днища корпуса



1 – подача сжатого воздуха, 2 – корпус реактора, 3 – активная зона, 4 – днище корпуса, 5 – патрубки, 6 – шахта реактора, 7 – зазор, 8 – перфорированная оболочка, 9 – патрубков для ввода газа, 10 – отверстия в оболочке, 11 – спринклерная система.

# Схема наружного охлаждения корпуса ВВЭР-640



1 – топливный бассейн, 2 – уравнивающая линия, 3 – АБР, 4 – опорный узел, 5 – обечайка, 6 – бетонная шахта, 7 – ловушка-вытеснитель, 8 – корпус реактора, 9 – подъемный кольцевой канал, 10 – опускной канал (8 шт.), 11 – аварийный бассейн.

# Проект ВВЭР-640

Основные особенности.

Запас до кризиса теплообмена от днища корпуса не менее 1,8.

Тепло, отводимое от корпуса воздухом в условиях нормальной эксплуатации, – 30 кВт (сопоставимо с отводимым вентиляцией теплом).

Подъёмные каналы для отвода пароводяной смеси при естественной циркуляции заполняются после заполнения бетонной шахты (исключается образование воздушных пробок)

## Ограничения концепции удержания расплава в корпусе реактора

Предпосылки удержания расплава в корпусе появляются только после нескольких суток от начала развития тяжелой аварии (для РУ большой мощности, свыше 3000 МВт).

Необходимо исключить возникновение кризиса теплообмена на поверхности корпуса (в ряде случаев это требует специальных устройств в подреакторном пространстве для интенсификации теплообмена)

# УЛР

Расположение – под реактором с охлаждением водой.

Неопределенности:

- паровой взрыв
- выбор оптимальных размеров охлаждающих каналов
- выбор оптимальных размеров частиц пористой засыпки

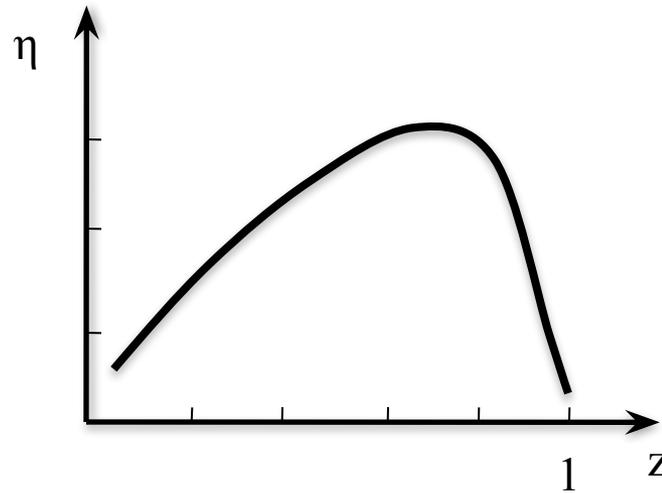
# Паровой взрыв

- *Паровым взрывом* называется быстрое (за время порядка 1 мс) образование большого количества пара, сопровождающееся локальным ростом давления вследствие перехода тепловой энергии (испарение) в механическую (расширение)
- **Паровой взрыв** может произойти при наличии нескольких **условий**:
- - смесь расплава и теплоносителя должна иметь пористую (ячеистую) структуру, достаточно компактную, чтобы волна давления могла распространяться внутри нее;
- - в этой смеси должно быть достаточно теплоносителя для образования нужного количества пара;
- - должен быть импульс давления, который привел бы к срыву пленки пара и интенсификации теплообмена.
- При паровом взрыве возможны механические разрушения конструкций. Масштабы разрушения зависят от скорости образования пара.
- Скорость образования пара определяется интенсивностью теплообмена кориума с теплоносителем.
- Механическая энергия взрыва  $E$  зависит от коэффициента конверсии  $\eta$ , т.е. от доли тепловой энергии  $Q$ , превращенной в механическую:

- $E = Q * \eta$

# Паровой взрыв

- Коэффициент конверсии достигает максимального значения при соотношении объемных теплоемкостей расплава и воды 1,5 – 2.



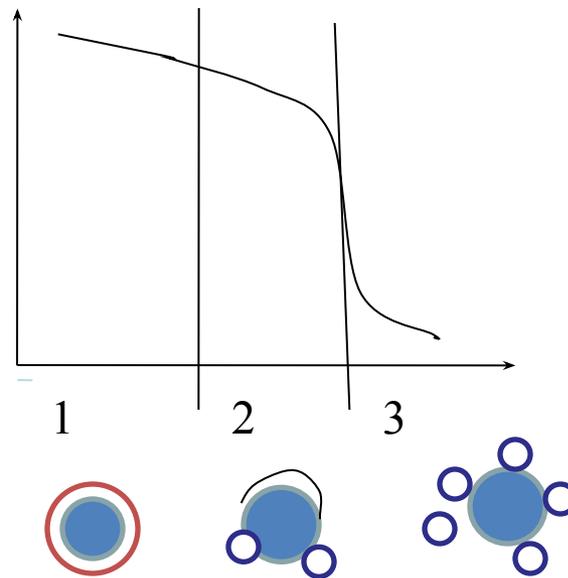
$$z = m_k * c_k / (m_k * c_k + m_T * c_T)$$

Зависимость коэффициента конверсии от объемных теплоемкостей кориума (k) и теплоносителя (T)

- При других соотношениях интенсивность меньше: либо мало расплава т.е.е мало тепла, либо мало теплоносителя, т.е. недостаточно пара.
- Интенсивность теплообмена в значительной степени зависит от степени дробления расплава, т.е. от фрагментации. Чем мельче фрагменты, тем больше суммарная поверхность контакта с теплоносителем, тем больше образуется пара и больше результирующий эффект от взрыва.

# Паровой взрыв

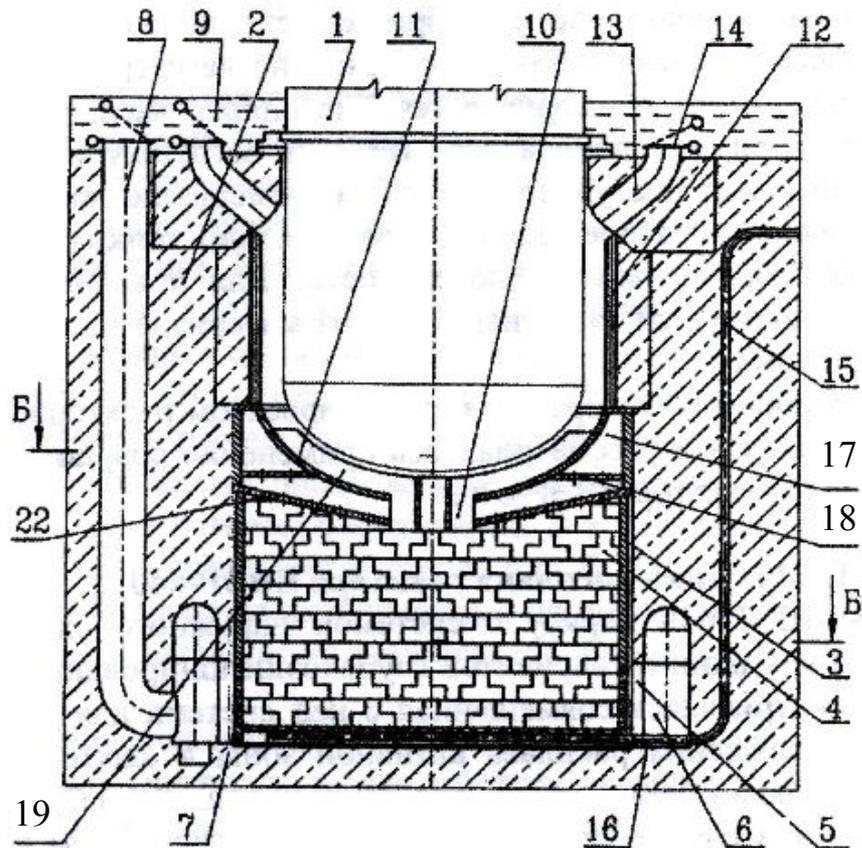
- Один из ключевых вопросов при оценке парового взрыва – знание того, как быстро отводится тепло от расплавленной частицы.
- Вначале происходит пленочное кипение с довольно низким коэффициентом теплоотдачи  $\sim 2 - 3 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$
- При разрушении паровой пленки интенсивность теплообмена резко возрастает, температура расплава быстро уменьшается.



# Охлаждение корпуса реактора

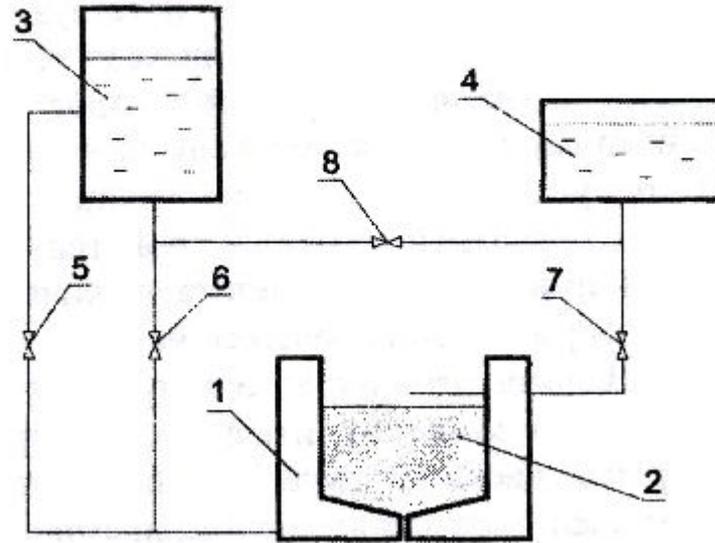
- При тяжелой аварии с расплавом а.з. в корпусе реактора возникает объем расплавленных материалов. Состав этого расплава сложный и неоднородный.
- Внутри расплава возникают потоки из-за естественной конвекции. Интенсивность этих потоков зависит от разности температур по самому расплаву, а также от свойств расплава.
- Свойства кориума неоднородны по объему. Расчет теплообмена зависит от толщины различных слоев кориума, их теплофизических свойств. Здесь очень большая неопределенность.
- Ответ на многие вопросы мог бы дать эксперимент, но проводить такие эксперименты очень сложно, небезопасно и дорого.
- Чтобы не расплавился корпус, надо его интенсивно охлаждать. Охлаждение возможно снаружи.
- Чтобы определить не разрушится ли корпус реактора, необходимо определить среднюю температуру корпуса, и собственно перепад температуры в самом корпусе.
- Это позволяет оценить термические напряжения, а также запас до плавления материала корпуса.
- Охлаждение корпуса снаружи может происходить при разных режимах теплообмена.
- При пузырьковом кипении коэффициент теплоотдачи можно оценить по зависимости ( $P \approx 0,1 \text{ Мпа} = 1 \text{ атм}$ )  $\alpha = 4,35 * q^{0,7} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$

# Ловушка расплава ВВЭР-640



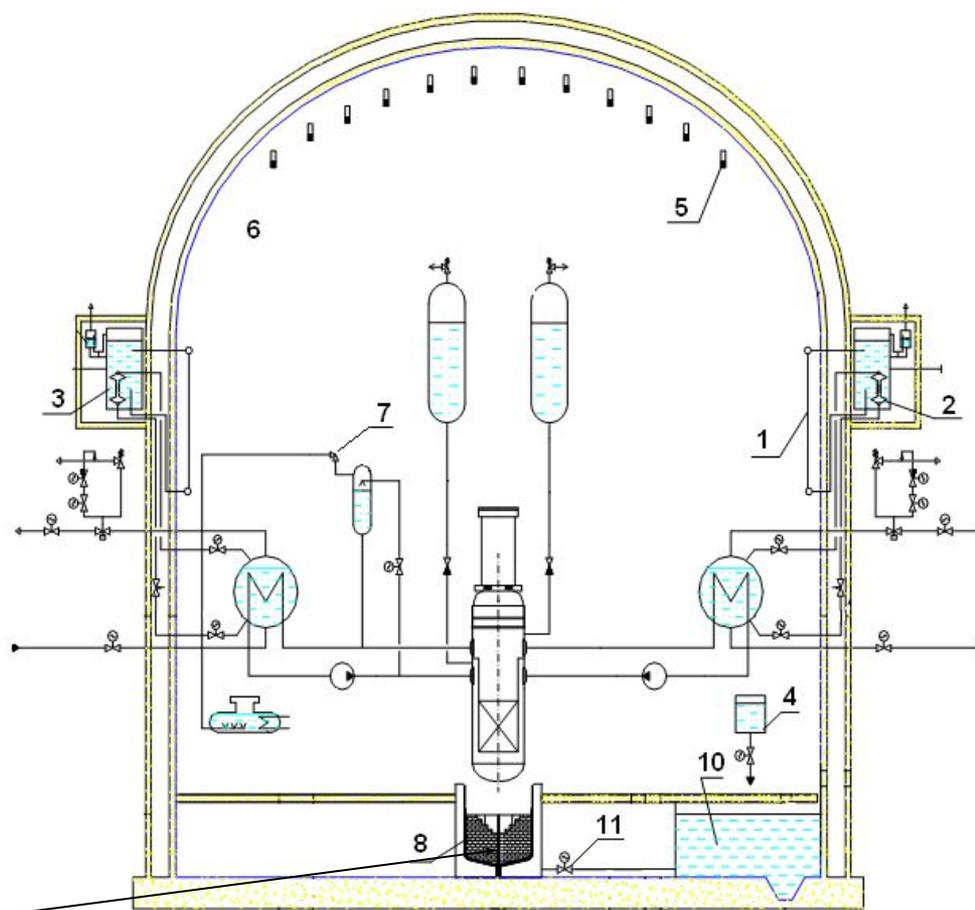
1 – корпус реактора, 2 – шахта реактора, 3 – корзина ловушки, 4 – тугоплавкие элементы, 5 – окна для прохода теплоносителя, 6 – напорный кольцевой коллектор, 7 – отверстия в корзине, 8 – опускной канал, 9 – аварийный бассейн, 10 – отверстие в обечайке, 11 – обечайка, 12 – теплоизоляция, 13 – подъемный канал, 14 – обратный клапан, 15 – линии подачи воздуха, 16 – коллектор подачи воздуха, 17 – внешний компенсатор паровых пузырей, 18 – перегородка для гашения ударной волны, 19 – опорные ребра

## Схема подачи воды в УЛР



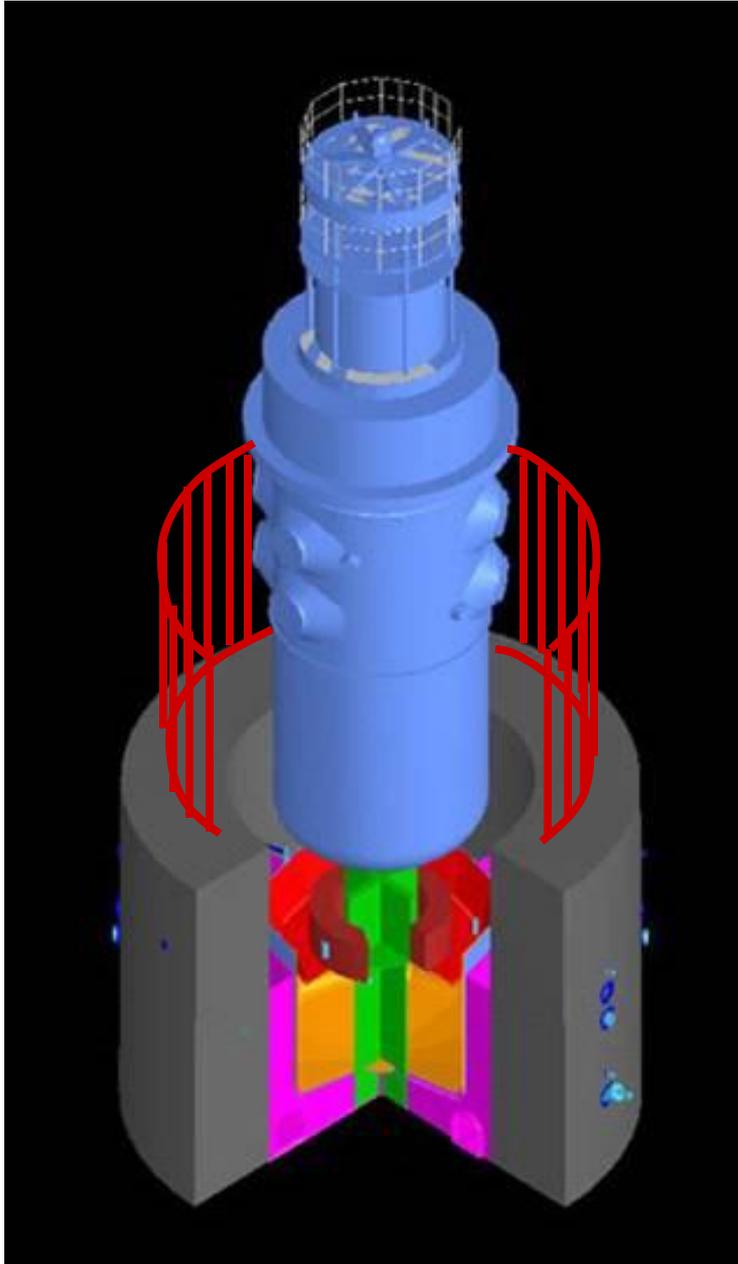
1 – теплообменник УЛР, 2 – кориум и жертвенный материал, 3 – шахта ревизии ВКУ, 4 – бассейн выдержки, 5-8 арматура с электроприводом.

# Расположение ловушки кориума



Ловушка  
кориума

## Устройство локализации расплава (ловушка расплава)

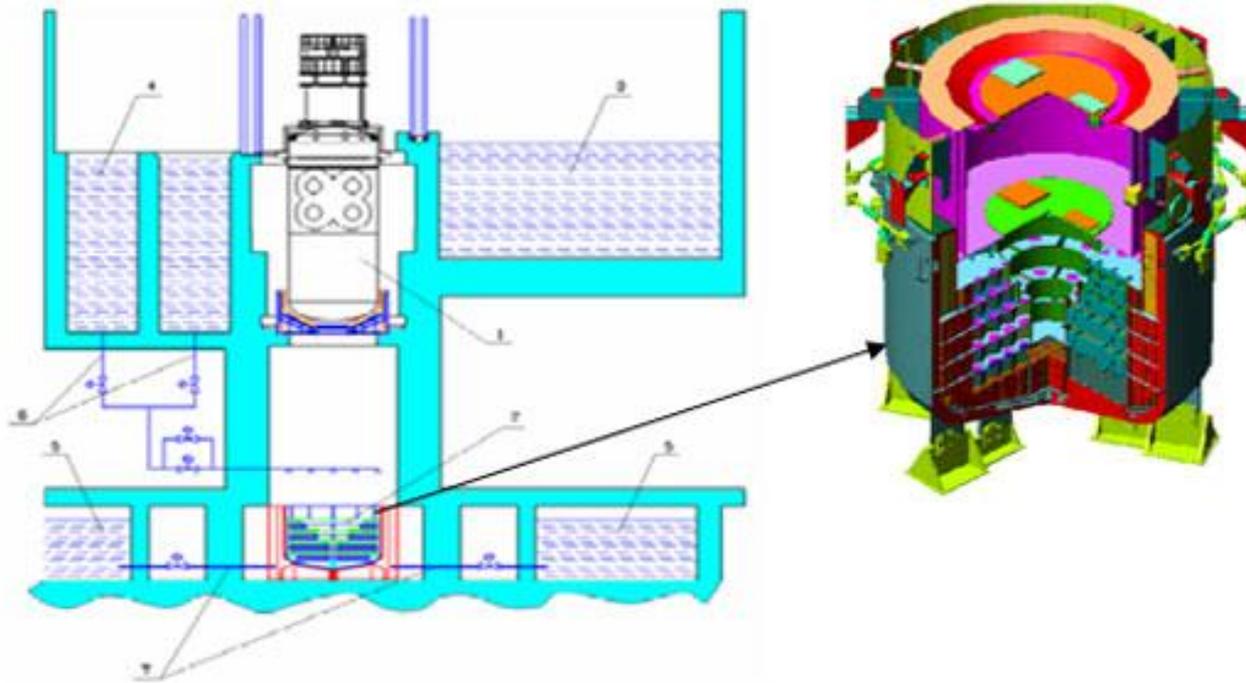


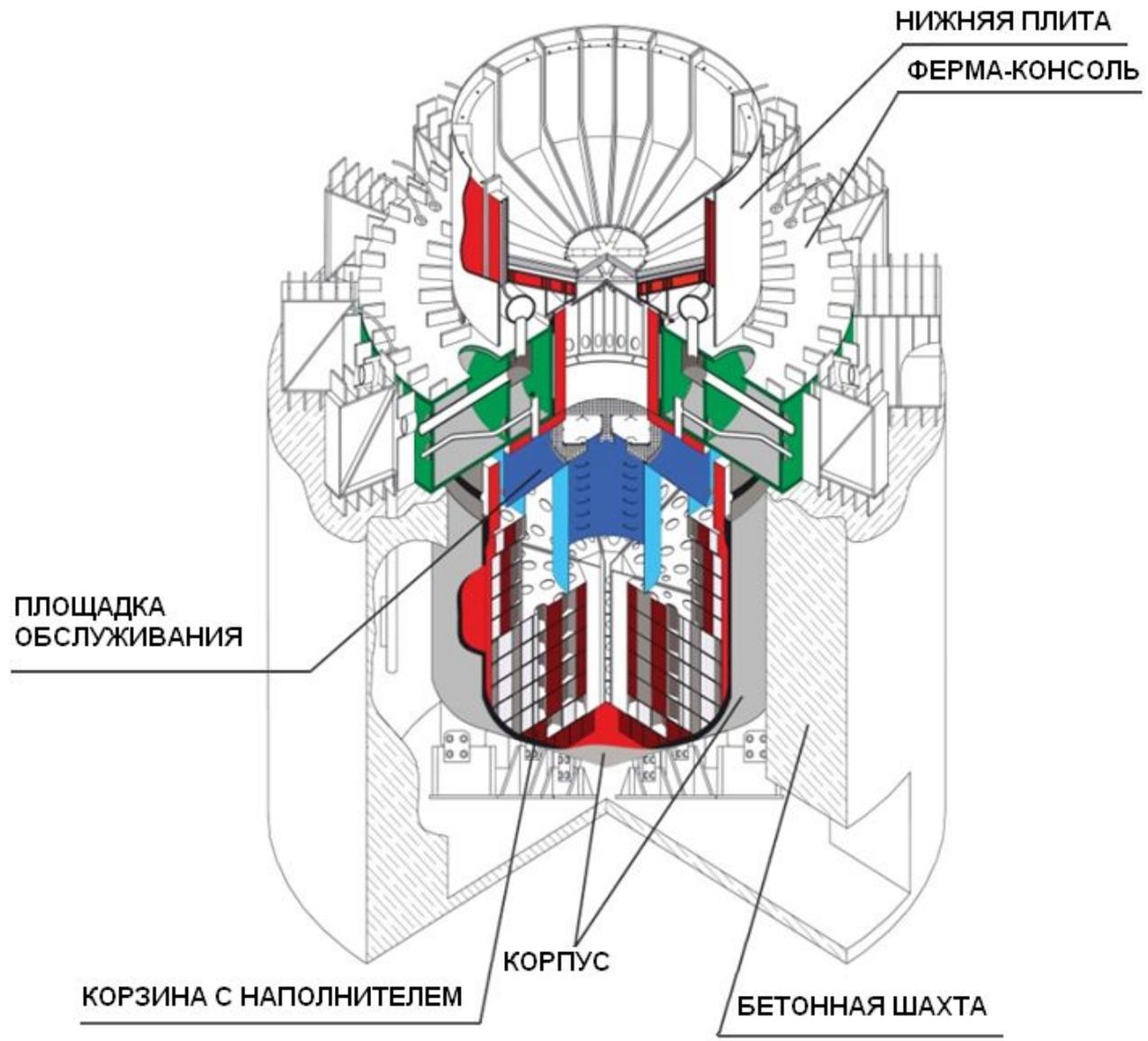
Размещается в шахте  
реактора

Функции:

- Защита шахты реактора от термомеханического воздействия кориума;
- Прием и размещение твердых и жидких составляющих кориума;
- Обеспечение теплоотвода из кориума к охлаждающей воде;
- Обеспечение подкритичности расплава;
- Уменьшение выхода водорода и радионуклидов под защитную оболочку.

# УЛР ВВЭР-1200





# Ловушка расплава



# Принципиальная схема УЛР

Взаимное влияние  
Слабости на  
на температуру  
расплава

