

УДК 621.039.76

Устройство локализации расплава – ловушка для АЭС с ВВЭР

Воронюк Д.Ю.

Научный руководитель – к.т.н., доцент ЧИЖ В.А.

Новым устройством, применяемым для локализации и захлаживания расплава активной зоны при тяжелой аварии водо-водяного ядерного реактора, является внекорпусная ловушка тигельного типа, размещаемая в подреакторном пространстве бетонной шахты. Непосредственно для локализации расплава используется водоохлаждаемый стальной корпус – основной элемент ловушки. Он частично заполнен жертвенным материалом, который состоит из специально подобранной оксидной композиции и стали, с которым взаимодействует поступающий расплав. Отвод тепла от образующегося расплава к охлаждающей воде происходит через стенки корпуса и частично от поверхности ванны.

Функционирование устройства локализации расплава (УЛР) во время запроектной аварии с выходом расплава за пределы корпуса реактора определяется принятой концепцией локализации расплава. Она включает следующие характерные особенности:

- для охлаждения расплава используется вода, которая самотеком поступает с пола боксов парогенераторов и из шахт ревизии внутрикорпусных устройств ядерного реактора; снаружи корпус ловушки охлаждается водой, поступающей в бетонную шахту с пола боксов парогенераторов;
- генерируемый в ловушке пар отводится в пространство контеймента через каналы, размещенные в ферме-консоли, запаса охлаждаемой воды достаточно для ее подачи в корпус УЛР пассивным способом из шахт ревизии в течение 24 часов;
- корпус ловушки обеспечивает отвод тепла от ванны расплава снизу и с боковой стороны;
- защита расположенных выше строительных конструкций от теплового излучения с зеркала расплава до завершения формирования ванны расплава осуществляется специальными теплозащитными экранами и последующей подачей воды на поверхность расплава;
- обеспечение инверсии металлической и оксидной компонент перед подачей воды на зеркало расплава гарантирует отсутствие паровых взрывов, так как безопасность подачи воды на расплав оксидов подтверждена результатами исследований;
- отсутствие воды в наполнителе, расположенном в корпусе УЛР, до момента поступления в него расплава обеспечивается конструктивными методами.

В общем случае поступающий в ловушку расплав состоит из субокисленного кориума и стали. Кориумом называется расплав, содержащий ядерное топливо и расплавленные компоненты внутрикорпусных устройств. Расчеты и экспериментальная проверка показали, что кориум содержит две несмешивающиеся между собой компоненты: металлическую и оксидную. Металлическая компонента кориума образуется в результате расплава стальных внутрикорпусных устройств и стенки ядерного реактора. Оксидная компонента кориума образуется в результате расплавления таблеток с ядерным топливом и растворении в этом расплаве металлического циркония и оксида циркония, образовавшегося в результате окисления металлического циркония водяным паром и кислородом воздуха. Плотность металлических компонентов кориума (около 7 г/см^3) меньше, чем оксидных компонентов (около 8 г/см^3), что вызывает расслоение этих расплавов при совместном присутствии.

Основными свойствами кориума являются:

- высокое теплосодержание и температура до 2800°C , что грозит расплавлением любых материалов, с которыми кориум контактирует;
- высокая концентрация сильных восстановителей (циркония и хрома), которые при контакте с водяным паром окисляются с образованием газообразного водорода, а при контакте с твердыми оксидами вызывают образование аэрозолей субоксидов типа SiO , Al_2O , AlO и т.п.; при контакте со стальными конструкциями эти восстановители образуют легкоплавкие эвтектики, что снижает механическую прочность конструкции.

Схематично корпус ловушки с внутрикорпусными конструкциями показан на рисунке 1.

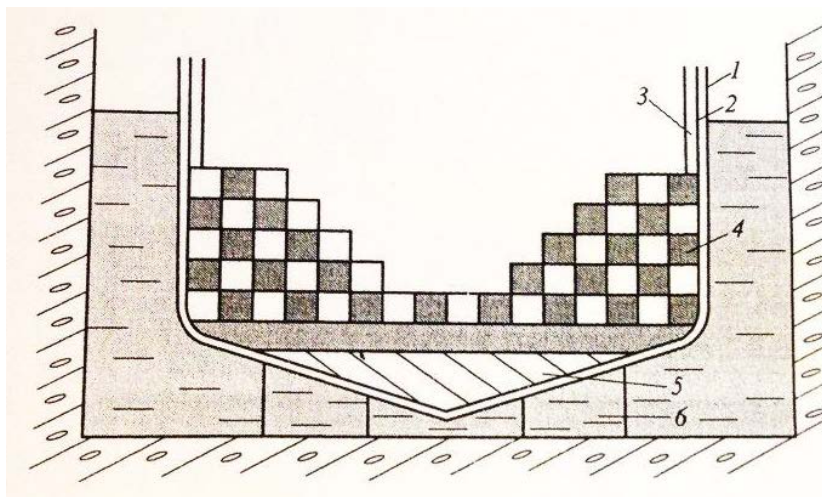


Рисунок 1 – Ловушка расплава

1 – корпус; 2 – корзина; 3 – теплозащитный экран; 4 – ОЖМ и СЖМ; 5 – бетон; 6 – опора

Рассматривая условия формирования ванны расплава в ловушке, необходимо отметить, что, хотя внутреннее пространство корпуса занято жертвенным материалом, размещение последнего в форме крупноячеистой структуры не препятствует затеканию расплава. Поэтому первая порция расплавленной стали заполняет свободное пространство в нижней части корпуса. Однако при этом расплав первое время не контактирует с корпусом, защищенным стальной корзиной. Толщина стенки корзины, которая вместе с другими внутрикорпусными стальными конструкциями выполняет функцию стального жертвенного материала (СЖМ), максимальна среди прочих элементов СЖМ, основным назначением которого является уменьшение температуры поступающего расплава стали. Расплав начинает контактировать со стенкой корпуса ловушки только после расплавления корзины.

Наряду с СЖМ в состав ЖМ входит окисидный жертвенный материал (ОЖМ). Его роль в ловушке тигельного типа чрезвычайно велика. ОЖМ состоит в основном из Fe_2O_3 и Al_2O_3 и изготавливается в виде керамических блоков по определенной технологии, обеспечивающей ОЖМ комплекс строго заданных свойств. Окисидный жертвенный материал предназначен для изменения состава и свойств взаимодействующего с ним расплава оксидов. Что касается взаимодействия расплава с металлом, то температура начала интенсивного химического взаимодействия с расплавом стали, содержащим Zr, составляет приблизительно $1800^{\circ}C$. Поэтому если температура расплава металла меньше $1800^{\circ}C$, то результатом взаимодействия является медленный перегрев ОЖМ с разложением Fe_2O_3 до Fe_3O_4 и FeO.

Таким образом, первая порция расплава стали охлаждается вследствие разогрева и плавления СЖМ. В дальнейшем, до начала поступления второй порции расплава, происходит выход расплава стали на стенку корпуса ловушки и ее постепенная кристаллизация на внутренней поверхности корпуса. Блоки ОЖМ, размещенные в пределах слоя металлического расплава первой порции, после плавления удерживающих их стальных конструкций всплывают, образуя поверхностный слой, частично ограниченный сверху неповрежденными внутрикорпусными конструкциями. Также практически не поврежденным остается сплошной донный слой ОЖМ, размещенный над слоем бетона в нижней конической части корзины.

В начальный период поступления второй порции расплава субокисидный кориум $UO_2 - ZrO_2 - Zr$ (расплав оксидов), будучи тяжелее расплава стали, опускается в нижнюю часть свободного пространства корпуса, вытесняя расплав стали первой порции вверх, где он смешивается с расплавом стали второй порции. Взаимодействие расплава субокисидного кориума с ОЖМ исследовалось экспериментально, и было установлено, что процесс окисления протекает до полного окисления Zr. Дальнейшее взаимодействие расплава

полностью окисленного кориума с ОЖМ происходит при свободноконвективном теплообмене, и плавление ОЖМ резко замедляется. Если в зоне поступления расплава кориума сохранился СЖМ, он плавится и смешивается с расплавом стали. На внутренней поверхности корпуса или на поверхности закристаллизованного слоя стали начинается кристаллизация расплава оксидов. При взаимодействии ОЖМ с расплавом кориума его компоненты переходят в расплав и уменьшают его плотность. После как ее значение становится меньше плотности расплава стали, происходит пространственная инверсия расплавов, в результате чего расплав стали окончательно располагается в нижней части корпуса.

В принципе, угрозу целостности корпуса ловушки могут представлять динамические нагрузки. К ним относятся нагрузки, которые могут возникнуть при падении больших масс, воздействии струи расплава или развитии взрывных процессов.

Воздействия на корпус ловушки ударных нагрузок при падении твердых фрагментов и струи расплава исключаются благодаря демпфирующим свойствам корзины и крупноячеистой структуры размещения ЖМ, а также механическим свойствам СЖМ и ОЖМ. Возможность паровых взрывов в подреакторном пространстве бетонной шахты в результате поступления расплава в воду исключается благодаря герметизации пространства внутри корпуса ловушки и дренирования подаваемой (до поступления расплава) воды за пределы корпуса. Детонация водорода, генерируемого в ловушке (главным образом, вследствие парометаллических реакций в течение промежутка времени до инверсии расплавов), не может развиваться вследствие его малой концентрации.

Таким образом, возможные динамические нагрузки на корпус ловушки либо физически не реализуемы, либо не представляют опасности. Поэтому выполнение условий непроплавления корпуса благодаря запасу до кризиса пузырькового кипения и неразрушения при пластическом деформировании, которые определяются тепловым нагружением корпуса ловушки в процессе формирования ванны расплава, обеспечивает сохранение его целостности и эффективность локализации и захлаживания расплава в характерных условиях тяжелой аварии АЭС с ВВЭР-1000.

Таким образом, возможности инженерных и управляющих мероприятий, обусловленные принятой концепцией локализации расплава кориума, позволяют рассматривать ловушку тигельного типа как довольно универсальное средство для применения на АЭС с легководными реакторами. Варьирование размерами корпуса ловушки, массой, составом и расположением в нем ЖМ позволяет оптимизировать условия локализации и при наличии достаточного пространства в бетонной шахте и необходимого запаса охлаждающей воды обеспечить возможность применения ловушки тигельного типа без принципиальных ограничений по единичной мощности и конструкции реактора.

Литература

1. Бешта С.В. [и др]. Формирование ванны расплава активной зоны ядерного реактора в ловушке тигельного типа для АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2011. № 5. С. 61-65.