

УДК 629.039.58

**АНАЛИЗ АВАРИЙ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
ANALYSIS OF ACCIDENTS WITH LOSS OF COOLANT**

А.Ю. Жолнерович

Научный руководитель – И.А. Евсеенко, ассистент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A. Zholnerovich

Supervisor – I. Yevseyenko, assistant
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: в статье рассматривается классификация аварий с потерей теплоносителя на АЭС с реакторами ВВЭР, детально рассматривается ход аварии с большой течью и ее воздействия на реакторную установку и гермообъем.

Abstract: the article discusses the classification of accidents with loss of coolant at WWER-type nuclear power plants, examines in detail the course of an accident with a large leak and its effects on reactor island.

Ключевые слова: авария, потеря теплоносителя, АЭС, ВВЭР, большая течь.

Keywords: accident, loss of coolant, nuclear power plant, VVER, large leak.

Введение

Спектр возможных размеров течей в ВВЭР лежит от малых течей до разрыва главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ). Сценарии аварий с потерей теплоносителя (ЛОСА) варьируются в зависимости от размера течи, положения течи, типа реактора, производительности систем аварийного охлаждения активной зоны реактора (САОЗ), типа главного циркуляционного насоса (ГЦН) [1]. Тем не менее, общепринято классифицировать ЛОСА's в терминах размера течи и обсуждать отдельно влияние положения течи и других параметров.

Основная часть

Исходными событиями, являющимися причиной потери теплоносителя первого контура, могут являться [2]:

- повреждения первого контура (разрывы ГЦТ и трубопроводов систем, соединенных с первым контуром);
- ложное срабатывание оборудования первого контура (открытие клапанов компенсатора объема, открытие клапанов на линиях подпитки и продувки первого контура).

В зависимости от места возникновения течи, ее последующей возможной локализации и тяжести последствий течь возможна внутри гермообъема (ГО) и с выходом в окружающую среду, что приведет к более серьезным последствиям.

Общая классификация течей приведена в таблице 1.

Большие течи относятся к течам, возникающим внутри гермообъема.

Таблица 1 – Классификация течей [1]

Очень малая течь	Малая течь (до Ду100)		Большая течь (до 2хДу850)	
			Средняя течь	
Потеря теплоносителя компенсируется системами нормальной эксплуатации	Медленное снижение давления; после выбега ГЦН устанавливаются условия для разделения потока		Быстрое снижение давления, турбулентный гомогенный поток при истечении, быстрое открытие и восстановление активной зоны	
	Требуется второй контур для отвода тепла, чтобы снизить давление в первом контуре	Поток энергии из течи достаточно большой, чтобы снизить давление в первом контуре		

При разрыве крупных трубопроводов происходит быстрое падение давления первого контура, что может привести к нарушению работы оборудования. Потеря теплоносителя первого контура – это прямое следствие нарушения третьего барьера безопасности, что является прямой угрозой разрушения оставшихся барьеров: твэлы разрушаются вследствие их перегрева, а гермооболочка вследствие избыточного давления пара. При повышении температуры оболочек твэлов выше 700 °С происходит пароциркониевая реакция, вследствие чего происходит окисление циркониевого сплава, выделение тепла и водорода, и потеря твэлами механической прочности [3].

Если рассматривать большую течь, а именно разрыв трубопровода с двусторонним истечением теплоносителя, то характерными для нее явлениями будут:

- очень быстрое падение давления;
- значительная турбулентность потоков;
- практически однофазное истечение теплоносителя;
- практически полное дренирование первого контура.

Основные стадии аварии при большой течи:

- течь теплоносителя и оголение активной зоны;
- срабатывание систем защиты и повторное заполнение первого контура;
- повторный залив реактора;
- длительный отвод остаточных тепловыделений активной зоны.

Период истечения. При образовании разрыва происходит быстрое падение давления в контуре, имеющее динамику, близкую к гиперболической функции. Скорость падения давления зависит от времени, за которое происходит полный разрыв трубопровода, и от времени распространения звуковых волн в объеме первого контура.

В аварийной петле происходит опрокидывание циркуляции, а создаваемое разряжение приводит к вытеснению теплоносителя из рабочих петель.

В течение секунды после образования разрыва в активной зоне образуется пар, мгновенно снижающий мощность реактора вследствие слабой нейтронно-

замедляющей способности пара, и создающий трудности в обеспечении теплоотвода от разогревающихся оболочек.

Пиковой температуры оболочка твэла за время аварии с двусторонним истечением теплоносителя из ГЦТ достигает дважды:

- при истечении теплоносителя в течение приблизительно 20 секунд, когда уменьшается теплоотвод вследствие кризиса кипения (количество тепла, выделяемое топливом, превышает количество тепла, отводимого теплоносителем) и оголяется активная зона;
- при повторном заполнении первого контура, происходящего при срабатывании систем аварийной защиты, в момент снижения расхода теплоносителя через активную зону.

Увеличение температуры оболочек твэлов неоднородно по объёму активной зоны и зависит от выгорания топлива конкретного твэла и времени прохождения кризиса кипения на его поверхности.

По сигналам защитных систем срабатывает аварийная защита, запускается САОЗ, отключаются ГЦН и турбина, изолируется контайнмент.

Теплоноситель из реактора в первые секунды истекает с вдвое большей скоростью, чем от парогенератора. Восходящий поток в активной зоне кратковременно восстанавливается в момент начала двухфазного истечения и дополняется вскипанием теплоносителя в напорной камере реактора (НКР). Течение теплоносителя из горячих трубопроводов рабочих петель, дренирование компенсатора объема и парогенераторов поддерживают нисходящий поток в активной зоне.

Минимум уровня теплоносителя в реакторе достигается раньше окончания истечения в связи со срабатыванием САОЗ, расход от которой в какой-то момент начинает превышать расход течи.

Повторное заполнение контура. Период повторного заполнения определяется временем, в течение которого борный раствор гидроемкостей (ГЕ) САОЗ достигает НКР. Расход теплоносителя от ГЕ САОЗ первоначально значительно превышает расход от САОЗ высокого и низкого давления.

В течение этого временного интервала происходит падение и дальнейший рост температур оболочек, вследствие подачи и уменьшения со временем расхода борного раствора. Длительность этого периода по расчетам составляет около 20 секунд.

Повторный залив активной зоны. В момент достижения теплоносителем САОЗ активной зоны создается фронт охлаждения, генерирующий паровую подушку, создающую противодействие теплоносителю, заполняющему активную зону. Пар также создается вне активной зоны за счет передачи теплоты трубопроводов и оборудования первого контура и передачей тепла от второго контура, причем уменьшение давления в системе приводит к увеличению удельного объема пара в петлях. Теплоноситель, подводимый от САОЗ, уменьшает удельный объем пара, т.е. приводит к снижению давления в контуре.

При опустошении ГЕ САОЗ насосы САОЗ высокого и низкого давления подают теплоноситель для продолжения процесса повторного залива. Вода входит в активную зону и снижает температуру твэлов до температуры

насыщения, при этом часть пароводяной смеси охлаждает верхние уровни активной зоны.

В наиболее горячих областях активной зоны фронты охлаждения создают двумерные восходящие потоки, а в наиболее холодных периферийных областях жидкость падает вниз. При возрастании температур оболочек твэлов до 800–900 °С при наличии в них избыточного давления более 2 МПа, может произойти разбухание, деформация и нарушение герметичности твэлов, уплотняющие проходные сечения каналов течения теплоносителя, незначительно ухудшающие теплосъем. На свежих твэлах вероятность разрыва оболочки меньше вследствие малого давления газообразных продуктов распада (требуется температура более 1200 °С). При прохождении пароциркониевой реакции выделяется большое количество водорода, который может достигнуть взрывоопасной концентрации в объеме контейнента. Также в случае разрыва выделяется большое количество неконденсирующихся газов, азота из ГЕ САОЗ, газообразные продукты деления, в т.ч. инертные радиоактивные газы.

Повторный залив завершается около 100–150 секунд с момента появления течи, и сопровождается полным охлаждением активной зоны. После этого устанавливается баланс утечки теплоносителя и подачи от САОЗ. При долговременном охлаждении тепло отводится в контейнмент, откуда оно передается в окружающую среду. Это является завершением состояния большой течи.

Воздействие большой течи на РУ и контейнмент. Режим рассматриваемой аварии оказывает негативное воздействие на оборудование реакторной установки и контейнмент. Падение давления в контуре создает скачкообразные градиенты давления в различных точках оборудования, что оказывает на оборудование разрушающее действие. Изменение режимов теплоотвода от топлива создаёт угрозу для протекания пароциркониевой реакции, разрушения оболочек твэлов и выхода в ГО большого объема водорода и радиоактивных газов. Выход в ГО большого объема теплоносителя с его последующим вскипанием создает избыточное давление, которое может нарушить герметичность контейнента и допустить выход большой активности в окружающую среду.

Заключение

Аварии с потерей теплоносителя являются одними из самых опасных проектных аварий, т.к. приводят к нарушению целостности твэлов, разрушению оборудования, выходу теплоносителя и активности в ГО (и, возможно, в окружающую среду). Большая течь в очень малое время способна оказать необратимые воздействия на реакторную установку, и ее сдерживание требует отлаженной работы совокупности защитных систем, работа которых частично рассмотрена в данной статье.

Литература

1. Уменьшение количества теплоносителя: большие аварии с потерей теплоносителя [электронный ресурс] / аварии с потерей теплоносителя. – Режим доступа:

<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2011/documents/074.pdf> / . – Дата доступа: 05.10.2022.

2. Расчетное обоснование теплогидравлических характеристик реактора и РУ ВВЭР/ В.П. Спассков, Ю.Г. Драгунов [и др.]. – М: ИКЦ Академкнига, 2004. – 340 с.

3. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций / В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов. – М: ИздАТ, 2002. – 480 с.