

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯЖЕЛОЙ СТАДИИ АВАРИИ С ПОЛНЫМ ОБЕСТОЧИВАНИЕМ НА РБМК

Бабайцев В.Н., Краюшкин А.В., Смирнова А.К., Тупотилов И.А.
(«НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия)

Введение

В настоящее время имеется устоявшееся представление, что авария с полным обесточиванием включает в себя все другие запроектные аварии, которые могут приводить к тяжелым последствиям, за исключением аварий реактивного характера, т.к. средства управления такими авариями практически отсутствуют из-за скоротечности их развития. Ниже рассматривается развитие аварии на тяжелой стадии с учетом и без каких-либо действий по ослаблению ее последствий. На основании этого анализа формулируются возможные меры по ослаблению последствий аварии.

1. Объект моделирования и сценарий аварии

Моделирование тяжелой стадии запроектной аварии с полным обесточиванием выполнялось при помощи разработанной специально для РБМК программы «STEPAN-T», в которой реактор описывается в трехмерной полномасштабной геометрии. В частности, расчетная модель включала не только активную зону с реальной загрузкой топливом и стержнями СУЗ, но и боковой и торцевые отражатели, а также окружающие реактор металлоконструкции, прежде всего схемы Е, ОР, Л и Д. Моделируемые конструкции показаны на рисунке 1.

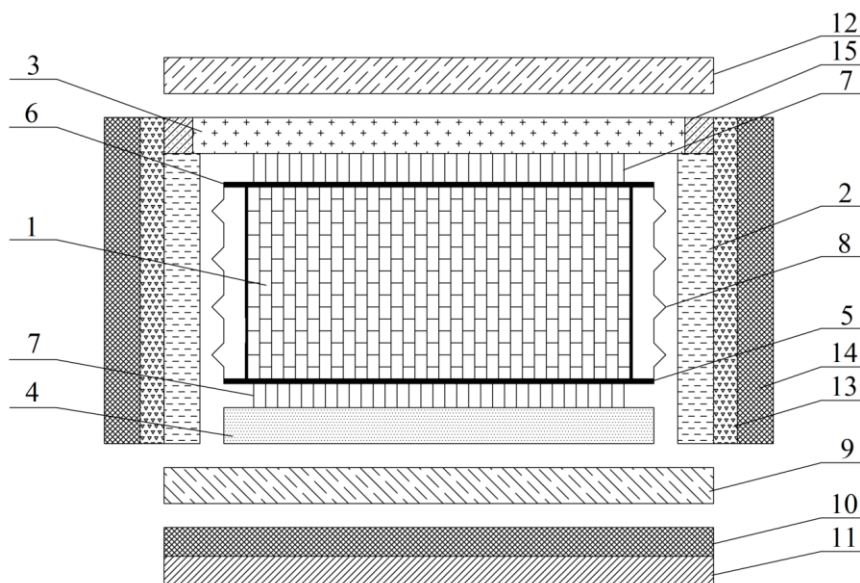


Рис.1. Схема реактора:

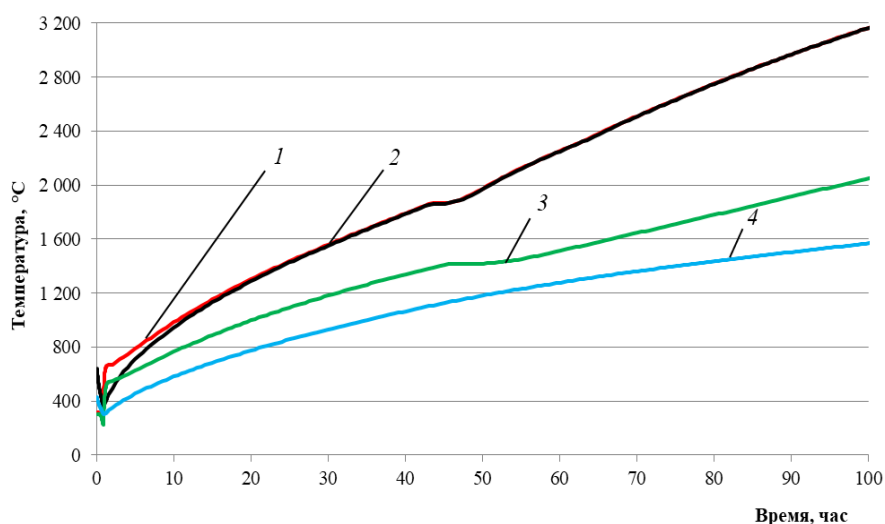
- 1 – графитовая кладка; 2 – бак водяной биологической защиты (схема Л);
3 – верхняя биологическая защита (схема Е);
4 – нижняя плита (схема ОР); 5 – блоки нижней защиты; 6 – блоки верхней защиты; 7 – тракты технологических каналов; 8 – кожух реактора (схема КЖ); 9 – зона НВК, включая «крест»; 10 – бетон (2м); 11 – грунт (2м); 12 – зона ПВК, включая плитный настил; 13 – песок; 14 – боковая биологическая защита – бетон (2м); 15 – схема Д

Рассматривался следующий сценарий аварии – реактор заглушен, на начальном интервале порядка 1 час давление в контуре МПЦ снижается до атмосферного, при этом восстановить охлаждение активной зоны не удастся, начинается разогрев обезвоженного реактора.

2. Развитие аварии с полным обесточиванием без управляющих воздействий

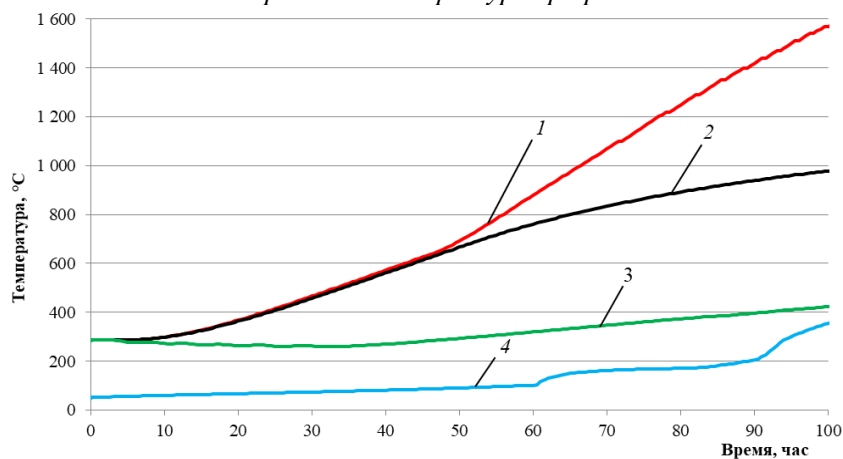
Моделирование развития аварии без управляющих воздействий необходимо, чтобы понять временную последовательность и характер разрушений, которые неизбежны в такой аварии, и на основании этого предложить меры по ослаблению последствий аварии.

После сброса давления остатки воды в контуре циркуляции будут выкипать, и начнется разогрев обезвоженного реактора. На рисунке 2а приведены распределения температур в активной зоне, а на рис.2б – зависимости температур внутренних поверхностей схем Е, ОР, КЖ и Л.



а

- 1 – максимальная температура топлива;
- 2 – максимальная температура графита;
- 3 – средняя температура топлива;
- 4 – средняя температура графита



б

- 1 – максимальная температура внутренней поверхности схемы ОР;
- 2 – максимальная температура внутренней поверхности схемы Е;
- 3 – максимальная температура схемы КЖ;
- 4 – максимальная температура внутренней поверхности схемы Л

Рис.2. Зависимости температуры от времени в активной зоне (а), в окружающих активную зону металлоконструкциях (б).

Разрушение алюминиевых конструкций реактора (гильз стержней КРО, оболочек стержней УСП и АЗ) можно ожидать в районе 5 час, когда температуры в активной зоне достигнут 660 °С.

К 36 час после начала аварии максимальная температура достигнут значения 1450 °С, при котором последуют разрушения стальных элементов активной зоны (пэлы КРО и ДП).

В районе 44 час температуры в активной зоне приближаются к значению в 1850 °С, начинается разрушение циркониевых элементов (канальная труба, элементы ТВС). Соответственно, последует разрушение ТВС и геометрия топлива в каналах изменяется с кластерной на геометрию, условно называемую «топливным столбом».

Начиная с момента около 72 часов с начала аварии, когда топливные столбы образовались в большинстве каналов (в 1000 каналов из 1661), появится неопределенность в дальнейшем развитии аварии:

- либо схема ОР будет проплавлена с последующим проникновением топливосодержащих масс (ТСМ) в подреакторное помещение;
- либо схема ОР разрушится из-за нагрева и топливо вместе с графитом и материалами схемы ОР провалится в подреакторное помещение.

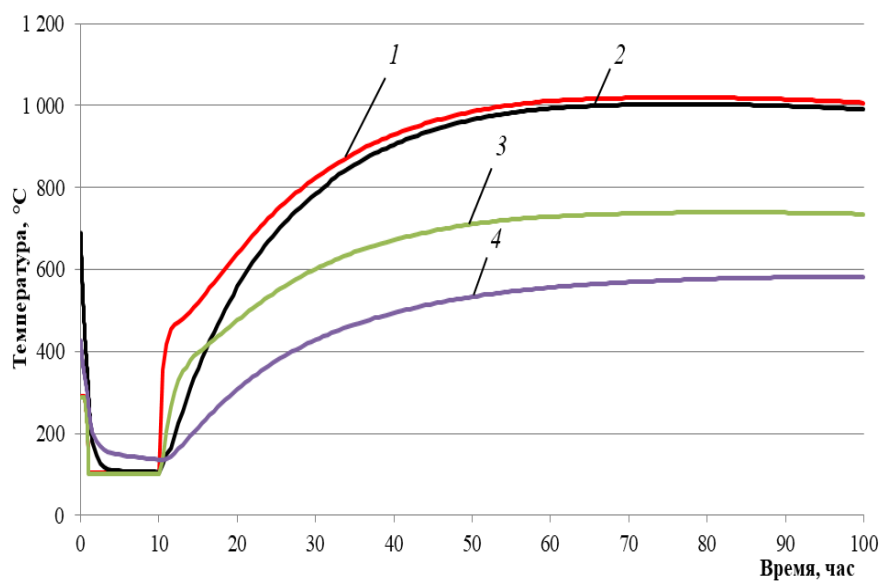
В пользу первого варианта говорят данные, полученные на аварийном Чернобыльском 4-м энергоблоке [1, 2], в которых установлено, что схема ОР не разрушилась, но один квадрант в ней был проплавлен. Как видно из рисунка 2а, к 50 час топливо начинает проникать в схему ОР.

3. Возможные меры по ослаблению последствий аварии с полным обесточиванием

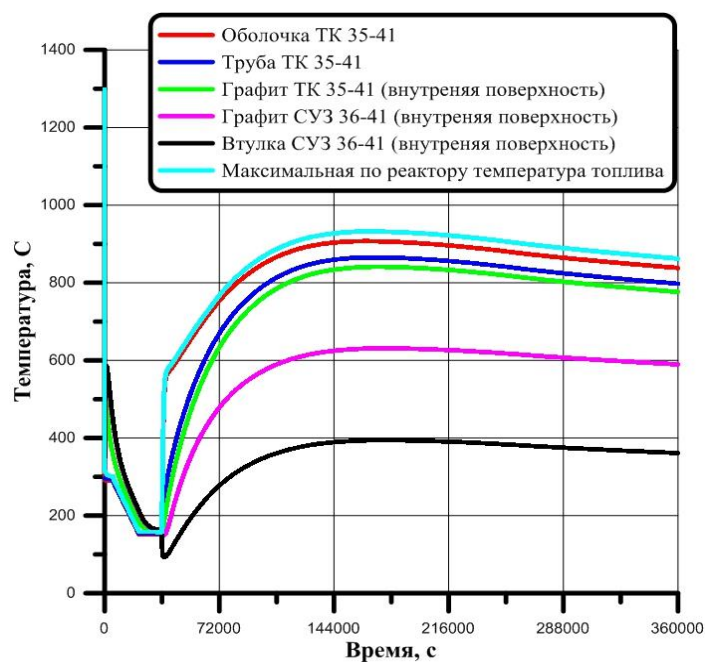
3.1. *Подача теплоносителя в автономный контур СУЗ*

Особенностью и одновременно преимуществом реакторов типа РБМК является наличие автономного контура охлаждения каналов СУЗ. В количестве около 200 штук каналы СУЗ равномерно распределены по активной зоне и охлаждаются теплоносителем при низком давлении.

На рисунке 3 приведены результаты расчетов по программам «STEPAN-T» (а) и «KLADKA-2» (б) температур в активной зоне. Данные программы отличаются друг от друга как степенью детализации описания активной зоны, так и способами построения расчетной модели. Рассматривался следующий сценария запроектной аварии, переходящей в тяжелую: в начальный момент времени происходит обесточивание энергоблока, и реактор заглушается с номинальной мощности. Контур СУЗ обезвоживается. Через 1,5 часа начинается снижение давления в КМПЦ так, чтобы скорость расхолаживания реактора не превышала 30 °С/ч. Далее осуществляется подпитка КМПЦ водой от ГБ САОР и из деаэраторов, что позволяет отодвинуть время начала разогрева активной зоны к моменту 10 ч после наступления исходного события. В этот же момент восстанавливается охлаждение контура СУЗ (кроме ячеек КОО, которые к 10 ч постулировано обезвоживаются) от альтернативных источников водоснабжения, а подпитка КМПЦ водой после 10 ч полностью прекращается.



1 – максимальная температура топлива;
 2 – максимальная температура графита;
 3 – средняя температура топлива;
 4 – средняя температура графита
 (а)



(б)

Рис. 3. Зависимости температуры в активной зоне от времени полученные по «STEPAN-T» (а) и «KLADKA-2» (б)

Из рисунков 3а и 3б видно, что максимальная температура топлива не поднимется более чем до 1050 °С в ходе аварии.

Таким образом, при восстановлении охлаждения через контур СУЗ можно ожидать разгерметизации значительной части топливных сборок (при температуре 700°С, критерий приемлемости установленный для всех энергоблоков РБМК), но тяжелые последствия аварии этим ограничатся. Разрушение топлива и окружающих реактор конструкций не последует.

3.2. Охлаждение баков схемы Л

За счет утечки тепла за пределы активной зоны будут нагреваться баки схемы Л – боковой биологической защиты, на которые опирается верхняя металлоконструкция – схема Е. Для предотвращения потери устойчивости вертикальных стенок баков и проседания вниз схемы Е требуется организовать подпитку водой баков схемы Л. В отсутствии подпитки вода из баков будет выкипать. Снижение уровня воды в баках схемы Л, в случае развития аварии по сценарию без управляющих воздействий, представлено на рисунке 4.

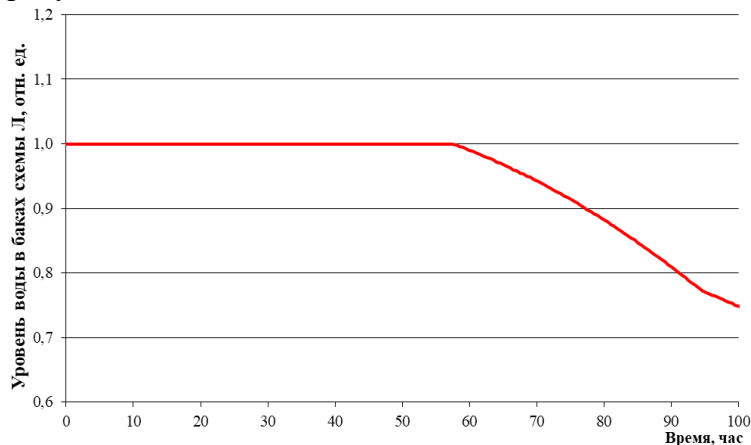


Рис.4. Уровень воды в баках схемы Л

3.3. Охлаждение опорной металлоконструкции, схемы ОР

Организация охлаждения схемы ОР могла бы остановить движение разрушенного топлива вниз в подаппаратное помещение, образовав своеобразную ловушку для разрушенного топлива. Однако, технические возможности для такого охлаждения представляются неясными.

4. Повторная критичность в ходе аварии с полным обесточиванием

Зависимость реактивности реактора от времени, полученная по программе «STEPAN-T», для сценария аварии без управляющих воздействий, представлена на рис. 5. Кроме подкритичности в горячем состоянии (при текущих температурах расчета) реактора приведена также зависимость реактивности от времени в случае охлаждения активной зоны до температур порядка 100 °С. Из рисунка 5 видно, что в «горячем» состоянии подкритичность сохраняется несмотря на уход поглотителей в момент около 40 ч и выход из топлива продуктов давления в момент около 100 ч.

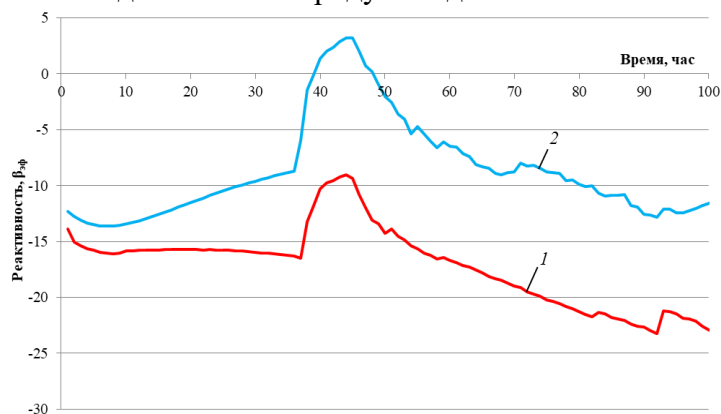


Рис. 5. Зависимости реактивности от времени:

- 1 – реактивность в горячем состоянии;
- 2 – реактивность в холодном состоянии

Однако в холодном состоянии после ухода поглотителей может быть получена значительная надкритичность. Поддержанию большой подкритичности в горячем состоянии способствует большой отрицательный эффект реактивности от разогрева графита, который обеспечивается за счет уран-эрбиевого топлива (увеличение поглощения на резонансе при 0,47 эВ), и также большой отрицательный эффект от образования топливных столбов. Остальные сопутствующие разогреву активной зоны эффекты реактивности подробно изложены в [3]. В сценарии с восстановлением охлаждения контура СУЗ поглотители остаются неповрежденными и подкритичность в ходе аварии обеспечивается.

5. Генерация водорода в ходе аварии с полным обесточиванием

После сброса давления в контуре МПЦ большая часть воды испарится. Некоторое количество (по проведенным оценкам около 30т) остается в водяных коммуникациях (в каналах) под схемой ОР. Нагреваемая в основном от схемы ОР, эта вода будет давать небольшой расход пара, который, поднимаясь в активную зону, будет вступать в реакцию с цирконием оболочек твэлов и канальных труб. Зависимость температуры труб нижних водяных коммуникациях от времени показана на рис 6.

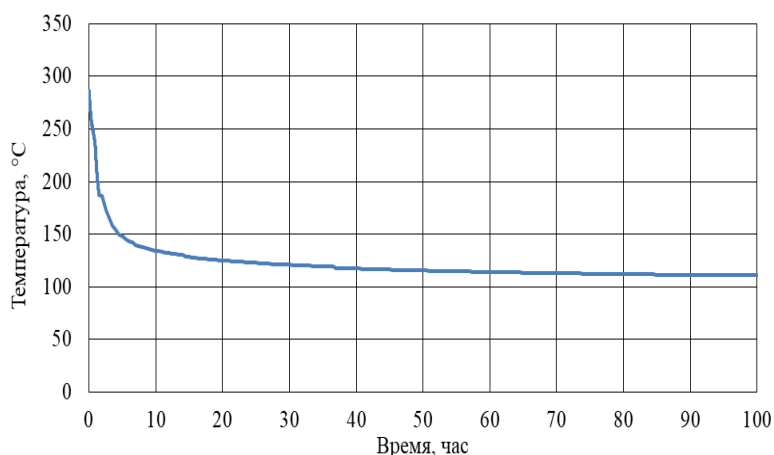


Рис. 6. Зависимости температуры НВК от времени

На рис. 7 представлена зависимость сгенерированного водорода от времени для двух вариантов, без управляющих воздействий и с восстановлением охлаждения через автономный контур СУЗ.

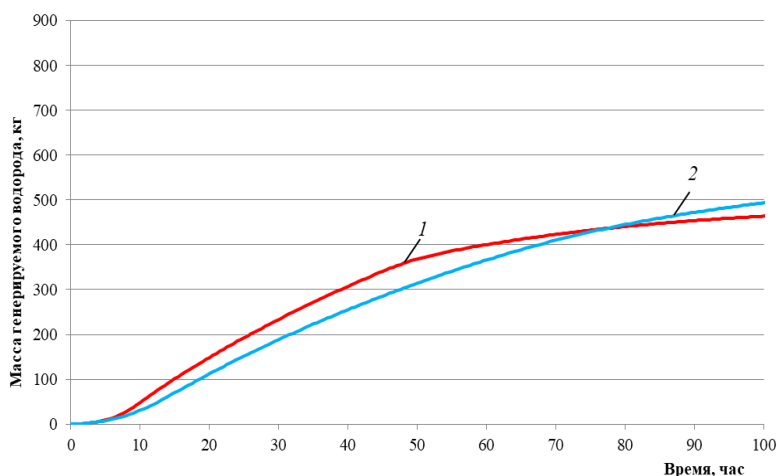


Рис.7. Зависимость массы сгенерированного водорода от времени:
1 — авария протекает без управляющих воздействий;
2 — задействовано охлаждение активной зоны через контур СУЗ

Таким образом, проблема генерации водорода остается и в случае задействования охлаждения контура СУЗ для ослабления последствий аварии.

5.1. Возможные варианты снижения генерация водорода на тяжелой *стадии аварии с полным обесточиванием*

Как упоминалось ранее, от разогревающейся активной зоны нагревается нижняя металлоконструкция – схема ОР. А от схемы ОР, в свою очередь нагреваются нижние водяные коммуникации (НВК), расположенные под активной зоной (на рисунке 8 показаны под цифрой 3). Остающаяся в топливных каналах на уровне схемы ОР и в НВК вода будет испаряться, приводя к генерации водорода за счет пароциркониевой реакции. По проведенным оценкам в НВК может находиться существенный объем теплоносителя, порядка 30 т.

Одним из способов удаления воды из НВК и, соответственно, прекращении или существенного ослабления генерации водорода на тяжелой стадии аварии с полным обесточиванием, служит дренажирование запасов теплоносителя в водяных коммуникациях через элементы КМПЦ. Схема петли КМПЦ представлена на рис. 8.

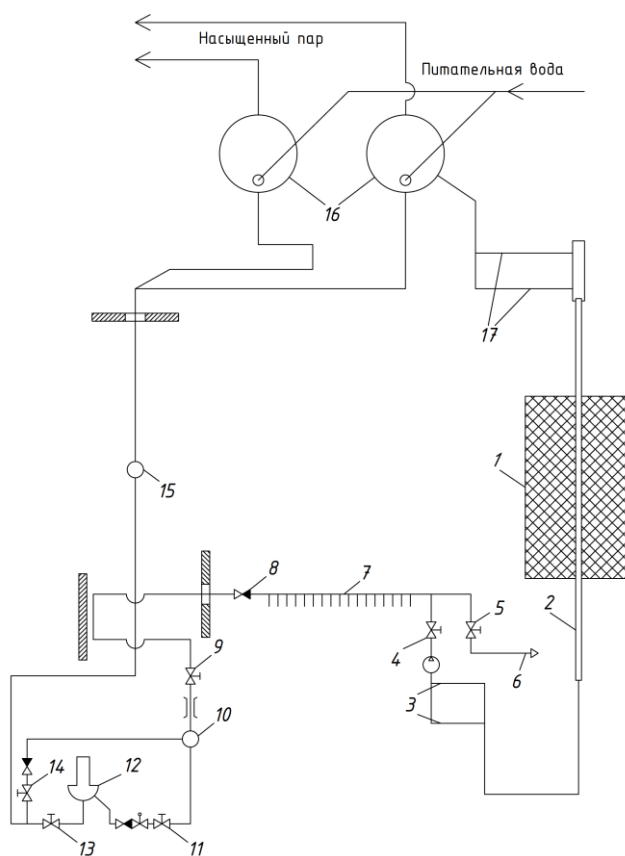


Рис.8. Схема одной петли КМПЦ:

- 1 – активная зона; 2 – технологический канал;
 3 – водяные коммуникации; 4, 5, 9, 11, 13, 14 – запорно-регулирующий клапан (ЗРК);
 6 – система продувки тупиковых зон; 7 – раздаточный групповой коллектор (РГК);
 8 – обратный клапан; 10 – напорный коллектор; 12 – главный циркуляционный насос;
 15 – всасывающий коллектор; 16 – барабан-сепаратор; 17 – пароводяные коммуникации

Контур МПЦ имеет достаточно разветвленную структуру, в нем имеется множество дренажных и технологических теплогидравлических линий, исходя из этого, способ дренажирования, предлагаемый ниже, не является единственным. Но в

тоже время обсуждаемый способ не требует подключения дополнительного оборудования или каких-либо соединений.

Осуществить дренажирование теплоносителя из НВК можно следующим путем:

- на первоначальной стадии аварии, после заглушения реактора, производить сброс давления в КМПЦ не до атмосферного, а оставлять в контуре избыточное, порядка 2÷4 атм.;
- далее перекрыть КМПЦ запорно-регулирующими клапанами (ЗРК) 13 и 14, а также отключить часть гидравлической схемы, включая ГЦН, клапаном 9, при этом клапаны на пути следования теплоносителя от НВК до РГК (клапаны 4 и 5) должны быть в открытом положении;
- после закрытия ЗРК дренажирование можно осуществить следующим способом: из тупиковой зоны РГК предусмотрена линия продувки, для удаления из контура отложений продуктов коррозии, продувка осуществляется по трубопроводам каждого РГК и, соответственно, данную систему можно использовать для дренажирования теплоносителя из НВК;
- используя данную методику можно удалить либо теплоноситель из зоны НВК, прекратив этим генерацию водорода на тяжелой стадии аварии или, по крайней мере, существенно уменьшить генерацию.

Заключение

Из полученных результатов можно сделать несколько выводов.

Проведенные расчеты показали, что в ходе аварии повторная критичность не возникает несмотря на уход из а.з. поглотителей из-за их плавления при достижении температуры 1450 °С – температуры плавления стали. Этот вывод, однако, относится только к «горячему» состоянию реактора. При попытках охлаждения а.з. в момент, близкий к моменту ухода поглотителей, возможно возникновение надкритичности.

Восстановление охлаждения через контур СУЗ является эффективной мерой по ослаблению последствий аварии.

Интегральная генерация водорода достигает существенных величин как в варианте с восстановлением охлаждения через контур СУЗ, так и без управляющих воздействий.

Предложены возможные меры по снижению массы генерируемого водорода.

Список литературы

1. Э.М. Пазухин. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования, Радиохимия, т. 36:, вып. 2, стр. 97–141, 1994 г.
2. Киселев А.Н., Чечеров К.П. Модель процесса разрушения 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС, Атомная энергия, т.91, вып.6, 2001г.
3. А.В. Краюшкин, И.А. Тупотилов. Запроектная авария с полным обесточиванием РБМК. Анализ возможности возникновения повторной критичности, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2022. – №. 5. – С. 90–96.