

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА БОРНОЙ КИСЛОТЫ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР В СЛУЧАЕ АВАРИИ

А.В. Морозов, А.В. Питык, С.В. Рагулин, Н.С. Ильичева, Д.Ф. Закиров
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского»,
Россия, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1, 249033
E-mail: sas@ippe.ru

Пассивные системы безопасности современных проектов атомных электростанций (АЭС) предусматривают возможность длительного (до 72 часов) автономного охлаждения активной зоны (АЗ) при запроектных авариях. В РФ проект реакторной установки ВВЭР-ТОИ, разработанный на основе проекта АЭС-2006, полностью соответствует принятым в мировой практике нормам и правилам. В данном проекте охлаждение активной зоны при запроектных авариях с разрывом главного циркуляционного контура и потерей всех источников переменного тока в течение 72 ч обеспечивается за счет функционирования пассивных систем безопасности (ПСБ). Системы гидроёмкостей первой, второй и третьей ступеней (ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3), входящие в состав ПСБ, за счет последовательной подачи в реактор раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг, предотвращают осушение активной зоны и способствуют отводу остаточного тепла от АЗ при течах из первого контура реакторной установки в условиях полной потери источников переменного тока при совместной работе с системой пассивного отвода тепла (СПОТ), отводящей тепло к окружающему воздуху.

Учитывая длительность аварийного процесса, кипение борсодержащего теплоносителя и малое содержание борной кислоты в паре, выходящем из реактора, в активной зоне могут возникнуть условия при которых возможно накопление и последующая кристаллизация борной кислоты. Данные процессы могут привести к появлению хлопьев борной кислоты в теплоносителе или образованию отложений на поверхностях тепловыделяющих элементов, что может привести к нарушению процесса отвода тепла от АЗ. В связи с этим, важное прикладное значение приобретают исследования, связанные с процессами массопереноса борной кислоты в активной зоне ВВЭР в случае аварии.

Для оценки возможности накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне ВВЭР был проведен расчетный анализ изменения концентрации борной кислоты в реакторе в аварийном режиме.

Вынос борной кислоты из активной зоны в случае аварии может осуществляться двумя способами – путем капельного уноса в составе пароводяной смеси и вследствие растворяющей способности пара. Известен ряд зависимостей, позволяющих определить величину влажности пара, выходящего из реактора [1]. Однако, эти зависимости покрывают ограниченный диапазон параметров и не всегда применимы для расчета капельного уноса влаги из активной зоны ВВЭР в течении всего периода аварии.

Для более корректного моделирования при проведении расчетного анализа весь аварийный процесс был разделен на два этапа (рис.1). В течение первого временного отрезка (ранняя стадия аварии) (рис.1.1) наблюдается очень высокое паросодержание в объеме жидкости, что приводит к тому, что вспененный уровень поднимается выше верхней перфорации реактора, и пароводяная смесь выплескивается из активной зоны в опускную шахту реактора и далее в разрыв трубопровода. Длительность данного этапа составляет ~ 7 часов. В дальнейшем интенсивность остаточного энерговыделения снижается, паросодержание в объеме жидкости уменьшается и уровень раствора борной кислоты устанавливается по высоте разорванного патрубка ГЦК (второй этап аварийного процесса – рис. 1.2).

При проведении расчета был сделан ряд допущений, необходимость которых обусловлена либо сложностью процессов, происходящих в контуре, либо недостаточностью данных по свойствам водных растворов борной кислоты. В частности, теплофизические свойства раствора борной кислоты, такие как плотность, вязкость и теплопроводность, были приняты равными параметрам для воды при соответствующих условиях.

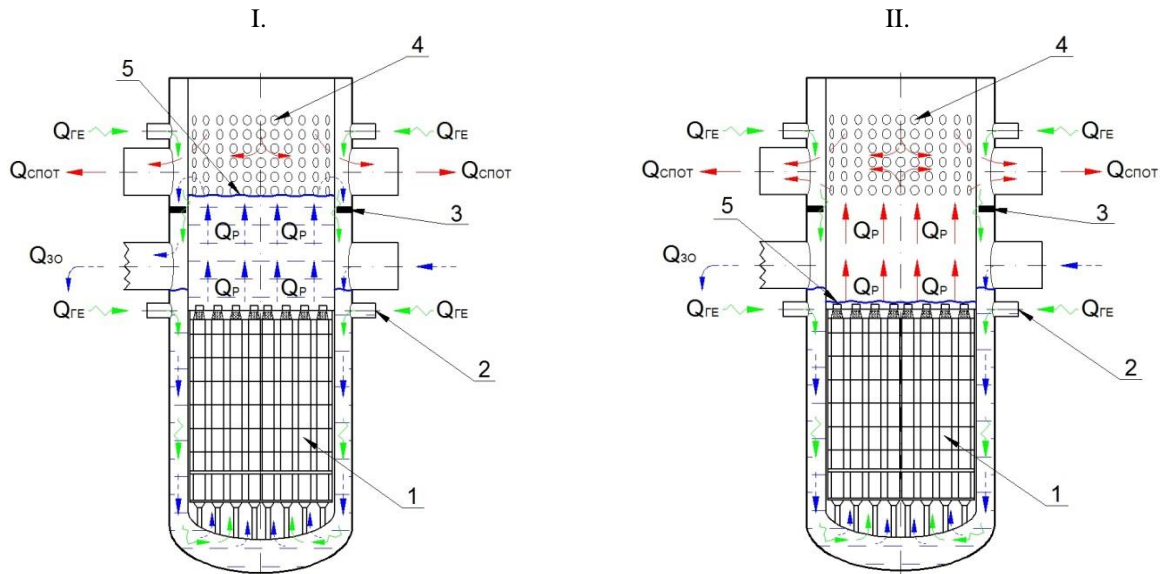


Рис. 1. Массоперенос борной кислоты в РУ ВВЭР при авариях с разрывом главного циркуляционного трубопровода: 1 – активная зона; 2 – патрубок системы аварийного охлаждения зоны; 3 – разделительный борт; 4 – перфорация шахты реактора; 5 – уровень жидкости;

→ – поток пара; - - - → – поток конденсата и теплоносителя;
 ~~~~~ → – поступление раствора борной кислоты из систем гидроемкостей;

$Q_P$  – тепловая энергия, выделяющаяся в реакторе;  $Q_{30}$  – энергия поступающего из течи в объём защитной оболочки пара;  $Q_{GE}$  – доля энергии, отводимая жидкостью из гидроемкостей;  $Q_{СПОТ}$  – часть тепловой энергии, уходящая с паром на конденсацию в парогенератор за счет теплообмена в СПОТ

Проведенная расчетная оценка показала превышение уровня предельной концентрации борной кислоты в активной зоне ВВЭР через ~ 43 часа после начала аварии. Концентрация  $H_3BO_3$  в конце 72 часов аварийного процесса составит ~ 1130 г/кг  $H_2O$ , что существенно превышает предельную концентрацию борной кислоты, которая при рассматриваемой температуре насыщения воды составляет 415 г/кг. Данный процесс может вызвать ее кристаллизацию на поверхности твэлов и ухудшение отвода тепла от АЗ. Отметим, что данный расчет был проведен с использованием ряда консервативных допущений и не учитывал вынос борной кислоты из активной зоны вследствие растворяющей способности пара. В ходе проведения расчетного анализа было установлено, что в настоящий момент существует неопределенность в имеющихся зависимостях для вычисления влажности пара и паросодержания среды на выходе из активной зоне ВВЭР в случае аварии. Данные параметры являются определяющими при анализе процессов массопереноса борной кислоты. Для устранения имеющихся неопределенностей необходимы экспериментальные исследования процессов массопереноса  $H_3BO_3$  при параметрах, характерных для аварийных режимов АЭС с ВВЭР.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10649).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: Высшая школа, 1986. - 448 с.