

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАПЕЛЬНОГО УНОСА БОРНОЙ КИСЛОТЫ НА ЕЕ НАКОПЛЕНИЕ В РЕАКТОРЕ ВВЭР В СЛУЧАЕ АВАРИИ

А.В. Морозов, А.В. Питык, С.В. Рагулин, А.Р. Сахипгареев,

А.С. Сошкина, А.С. Шлепки

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, 1



Рассмотрены процессы массопереноса борной кислоты при авариях с разрывом главного циркуляционного трубопровода в реакторах ВВЭР нового поколения, оснащенных пассивными системами безопасности. Представлены результаты расчета изменения концентрации борной кислоты в активной зоне реактора ВВЭР-ТОИ в случае аварийного процесса. Показано положительное влияние капельного уноса борной кислоты на процессы ее накопления и кристаллизации в активной зоне. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности этих процессов в активной зоне, что может привести к нарушению теплоотвода от твэлов. Представлен обзор имеющихся литературных данных о теплофизических свойствах растворов борной кислоты (плотность, вязкость, теплопроводность). Установлено, что имеющиеся сведения носят общий характер и не охватывают весь диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), характерных для возможной аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР. Показана необходимость экспериментального исследования процессов капельного уноса борной кислоты при параметрах, характерных для аварийных режимов ВВЭР, а также изучения теплофизических свойств борной кислоты в широком диапазоне концентраций.

Ключевые слова: ВВЭР, аварийный режим, борная кислота, накопление, капельный унос, теплофизические свойства растворов борной кислоты, плотность, вязкость, теплопроводность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследование процессов накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне реакторов ВВЭР нового поколения приобретает особую актуальность. Связано это прежде всего с требованиями к обеспечению безопасности, предъявляемыми к современным АЭС. Согласно требованиям EUR к базовому и расширенному проектированию атомных станций нового поколения с реакторами типа LWR, при запроектных авариях система отвода тепла от активной зоны (АЗ) должна быть рассчитана на 72 часа автономной работы. Как известно, в проекте «АЭС-2006» при возникновении аварийной ситуации с разрывом главного циркуляционного трубопровода работа пассивных систем безопасности (ПСБ) обеспечивает длительное (не менее

© *А.В. Морозов, А.В. Питык, С.В. Рагулин, А.Р. Сахипгареев,
А.С. Сошкина, А.С. Шлепки, 2017*

24-х часов) охлаждение АЗ реактора за счет подачи в нее раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из гидроемкостей первой (ГЕ-1) и второй (ГЕ-2) ступеней [1 – 4]. Согласно концепции обеспечения безопасности проекта «ВВЭР-ТОИ», охлаждение АЗ реактора за счет подачи в нее борного раствора должно осуществляться в течение 72-х часов. Для выполнения этой задачи планируется использование гидроемкостей третьей ступени (ГЕ-3). С учетом длительности процесса, кипения теплоносителя и малого содержания борной кислоты в паровой фазе не исключена вероятность кристаллизации борной кислоты на элементах внутрикорпусных устройств.

Вынос борной кислоты из АЗ с паром или за счет капельного уноса может существенно снизить риск ее кристаллизации. Следовательно, изучение процессов уноса борной кислоты из АЗ имеет важное прикладное значение для расчетов аварийных процессов на АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения, оснащенными пассивными системами безопасности. Кроме того необходимо отметить значимость теплофизических свойств борной кислоты, таких как плотность, вязкость, теплопроводность для проведения данных расчетов.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Для расчетов процессов накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне ВВЭР немаловажным является знание ее теплофизических свойств. В настоящее время данные о плотности, вязкости и теплопроводности растворов борной кислоты носят весьма общий характер и не охватывают весь диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), характерный для аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР. Тем не менее, в литературе встречаются сведения об экспериментальных исследованиях теплофизических свойств водных растворов борной кислоты.

В работе [5] представлены экспериментальные данные по плотности водных растворов борной кислоты, охватывающие широкий диапазон температур (25 – 300°C) и давлений (10 – 50 МПа). Однако в работе рассматривались растворы с концентрациями 3,1 – 43,4 г/кг, что существенно ниже возможной концентрации борной кислоты в АЗ реактора при возникновении аварийной ситуации.

На рисунке 1 представлен график зависимости плотности раствора борной кислоты от температуры с концентрациями 3,1; 18,6 и 43,4 г/кг при давлении 10 МПа [5].

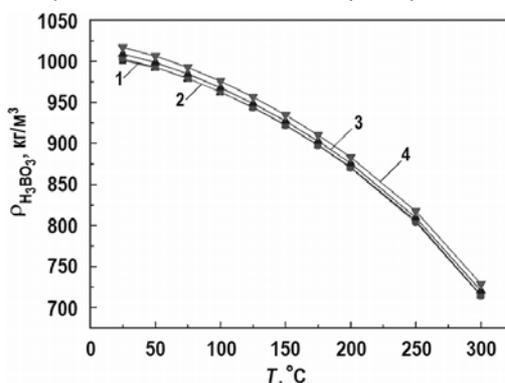


Рис. 1. Зависимость плотности раствора борной кислоты от температуры при $P = 10$ МПа. Концентрация борной кислоты: 1 – 0 г/кг (H_2O); 2 – 3,1 г/кг; 3 – 18,6 г/кг; 4 – 43,4 г/кг

В работе [6] представлены значения плотности и вязкости водных растворов борной кислоты с концентрациями 2,52; 25 и 45 г/кг при атмосферном давлении и температурах 65,6 и 100°C. Результаты представлены на рис. 2.

Данные о вязкости водных растворов борной кислоты в этом же диапазоне концентраций представлены на рис. 3.

Данные о динамической вязкости растворов борной кислоты в интервале температур 25 – 325°C и давлений 1 – 30 МПа даны в работе [7]. На рисунке 4 приведена зависимость вязкости водных растворов борной кислоты от температуры при давлении 1 МПа для концентраций 2 и 20 г/кг.

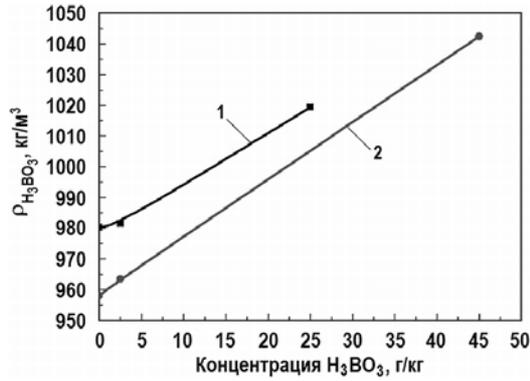


Рис. 2. Зависимость плотности водных растворов борной кислоты от концентрации при давлении 0,1 МПа [5]. Температура: 1 – 65,6°C; 2 – 100°C

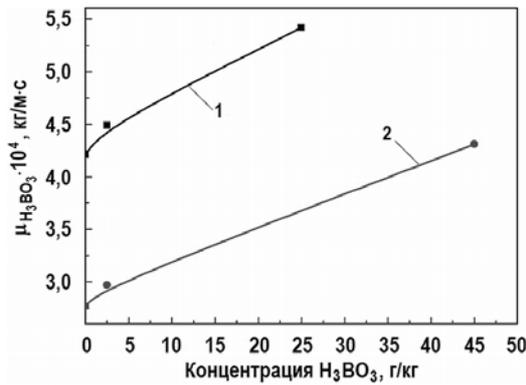


Рис. 3. Зависимость вязкости водных растворов борной кислоты от концентрации при давлении 0,1 МПа. Температура: 1 – 65,6°C; 2 – 100°C

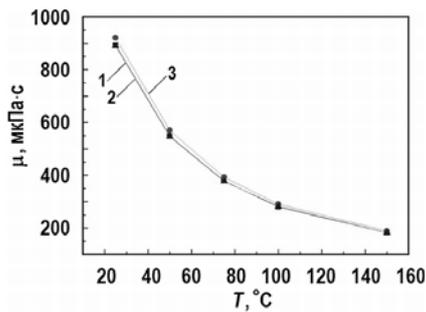


Рис. 4. Зависимость вязкости водных растворов борной кислоты от температуры при давлении 1 МПа. Концентрация борной кислоты: 1 – 0 г/кг (H₂O); 2 – 2 г/кг; 3 – 20 г/кг

Отметим, что исследования [6, 7] проводились с низкими концентрациями растворов борной кислоты и в интервале давлений, превосходящих давление в случае аварийного процесса.

Результаты исследований теплопроводности растворов борной кислоты представлены в работе [8]. Измерение теплопроводности проводилось методом плоского горизонтального слоя в интервале температур 290 – 430К, при давлениях 0,1 и 10 МПа для

растворов с концентрацией борной кислоты 1, 3 и 5% (рис. 5).

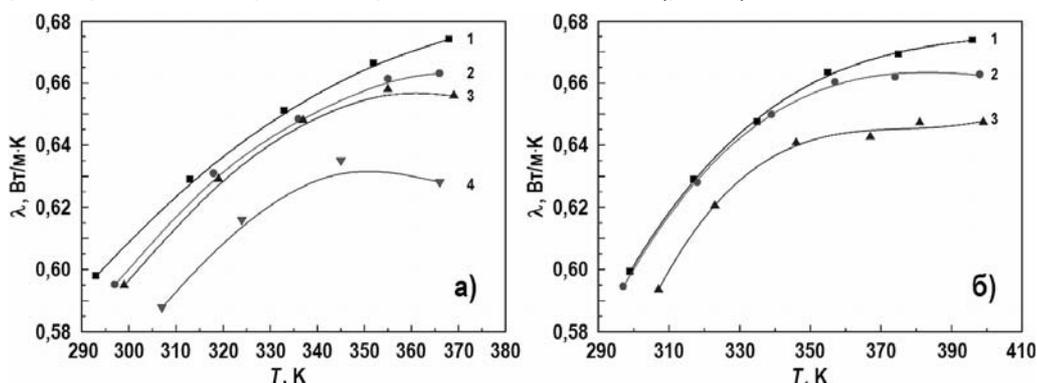


Рис. 5. Зависимость теплопроводности водных растворов борной кислоты от температуры и давления: а) – 0,1 МПа; б) – 10 МПа. Концентрация кислоты: 1 – 0% (H_2O); 2 – 1%; 3 – 3%; 4 – 5%

Ряд работ посвящен изучению теплофизических свойств буферизированных растворов борной кислоты, где в качестве подщелачивающих реагентов использовались фосфат или гидроксид натрия [9, 10]. Однако параметры исследованного теплоносителя не соответствуют водно-химическому режиму российских АЭС с ВВЭР, кроме того, как и во всех предыдущих работах, исследования проводились при довольно низких концентрациях борной кислоты.

Несмотря на то, что во всех рассмотренных работах говорится о результатах, полученных в опытах на растворах с малой концентрацией борной кислоты, и условиях проведенных экспериментальных исследований, не соответствующих параметрам, характерным для аварийных режимов АЭС с ВВЭР, данные говорят о том, что теплофизические свойства растворов H_3BO_3 отличаются от свойств воды, и это различие усиливается с увеличением концентрации кислоты.

О ПРОЦЕССАХ МАССОПЕРЕНОСА БОРНОЙ КИСЛОТЫ ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ АЭС С ВВЭР

Для того чтобы оценить вероятность кристаллизации борной кислоты в АЗ реактора, необходимо рассмотреть процессы ее массопереноса при возникновении аварийной ситуации (рис. 6).

При разрыве главного циркуляционного трубопровода происходит последовательное срабатывание систем ГЕ-1, ГЕ-2 и ГЕ-3, обеспечивающих подачу борной кислоты в АЗ реактора. Значительный объем борной кислоты, поступившей в АЗ из систем гидроемкостей в первое время после начала аварии, будет вынесен за счет активного парообразования, так как в случае аварии с разрывом ГЦК реактор переходит в аварийный испарительный режим работы. Кроме раствора борной кислоты, поступившей от гидроаккумуляторов ПСБ в реактор, примерно через 1,5 ч после начала аварии начинается поступление в АЗ конденсата из парогенераторов трех неаварийных петель при температуре насыщения в первом контуре вследствие работы системы пассивного отвода тепла [11 – 14]. В районе днища реактора происходит смешение потоков конденсата с потоками раствора борной кислоты, поступающими из систем гидроемкостей, следовательно, кристаллизация борной кислоты в этой области представляется маловероятной. Кристаллизация возможна в АЗ за счет взаимодействия смешанных потоков с более холодными элементами внутрикорпусных устройств. Часть борной кислоты, уносимой из АЗ вместе с паром за счет капельного уноса, будет поступать в парогенераторы, где при контакте с их конструктивными элементами будет происходить ее осаждение. В дальнейшем этот процесс может привести к отравлению парогенератора. Кроме того, часть борной кислоты будет выноситься в разрыв трубопровода первого контура.

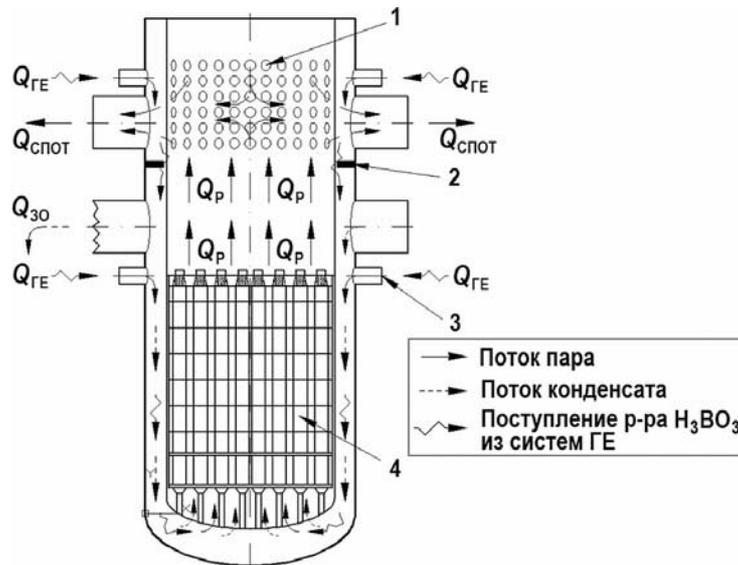


Рис. 6. Массоперенос борной кислоты в РУ ВВЭР при авариях с разрывом главного циркуляционного трубопровода: 1 – перфорация шахты реактора; 2 – разделительный бурт; 3 – патрубок системы аварийного охлаждения зоны; 4 – активная зона

Снижение концентрации борной кислоты в АЗ также возможно в результате ее капельного уноса. Для оценки накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне ВВЭР и влияния капельного уноса на эти процессы был проведен оценочный расчет изменения концентрации борной кислоты в реакторе в аварийном режиме. При расчетах основной целью было определение значения капельного уноса, при котором концентрация борной кислоты в АЗ не будет превышать предельную.

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

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:

- при вычислениях в системе выделялись объемы АЗ и напорной камеры реактора (НКР) – пространства между выгородкой АЗ и корпусом реактора; при значениях температур, характерных для аварии с разрывом ГЦК (120 – 140°C), появляется зазор между разделительным кольцом корпуса и шахтой реактора, позволяющий раствору борной кислоты, поступающему в нижнюю и верхнюю камеры реактора, перемешиваться, поэтому при расчете рассматривается один общий объем, обозначенный как НКР, из которого борная кислота поступает в АЗ;

- свойства растворов борной кислоты в АЗ и НКР одинаковы по всему объему;
- вся вода, поступающая в АЗ и НКР, находится при температуре насыщения;
- давление в системе принималось постоянным и равным 0,3 МПа в течение всего аварийного процесса;

- вся борная кислота, изначально находившаяся в первом контуре, а также поступившая в реактор из гидроаккумуляторов системы GE-1 в течение первых минут после начала аварии, выносится в защитную оболочку.

В связи с недостаточностью справочных данных теплофизические свойства раствора борной кислоты, такие как плотность, вязкость и теплопроводность, были приняты равными параметрам для воды при соответствующих условиях.

При расчете было принято, что номинальная мощность реактора составляет $3,2 \cdot 10^9$ Вт. Характер изменения остаточного тепловыделения (N_{A3}) в активной зоне реактора после его остановки представлен в табл. 1 [15].

Начальными данными для проведения расчетов служили параметры систем гидроемкостей пассивного залива ГЕ-2 и ГЕ-3 (табл. 2) [16].

Таблица 1

Остаточное тепловыделение в активной зоне ВВЭР

Время, с	100	1000	$10 \cdot 10^3$	$28,8 \cdot 10^3$	$37,8 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$500 \cdot 10^3$	$147 \cdot 10^4$	$216 \cdot 10^4$
Остаточное тепловыделение, относит. ед.	0,0331	0,0206	0,0105	0,0077	0,0072	0,0067	0,0055	0,0053	0,0033	0,0022	0,0018

Таблица 2

Параметры систем гидроемкостей пассивного залива АЗ ВВЭР

Параметр	Значение				
	ГЕ-2				ГЕ-3
Длительность ступени, с	100 – 5430	5431 – 10860	10861 – 29000	29001 – 86400	86401 – 259200
Расход раствора борной кислоты от одного канала, кг/с	10,0	5,0	3,3	1,6	1,6

Конденсационная мощность парогенераторов была получена из результатов экспериментальных исследований на крупномасштабном стенде в ГНЦ РФ-ФЭИ [10].

$$N_{\text{спот}} = \begin{cases} 144,8 - 5,885 \cdot 10^{-4} \tau + 1,499 \cdot 10^{-9} \tau^2 & \text{при } \tau < 86400; \\ -131,25 + 7,619 \cdot 10^4 / \sqrt{\tau} & \text{при } \tau \geq 86400. \end{cases}$$

где $N_{\text{спот}}$ – конденсационная мощность парогенератора, кВт; τ – время, с.

В активной зоне энергия остаточного тепловыделения будет расходоваться на испарение раствора, поступающего в АЗ из НКР:

$$N_{A3} = G_N \cdot r + G_{12} (h' - h_{\text{НКР}}),$$

где G_N – расход выпара, кг/с; G_{12} – расход перетока раствора борной кислоты из НКР в АЗ, кг/с; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг; h' – энтальпия воды при температуре насыщения, кДж/кг; $h_{\text{НКР}}$ – энтальпия раствора борной кислоты в НКР, кДж/кг.

Массовый расход борной кислоты, выходящий из АЗ за счет процессов капельного уноса, прямо пропорционален массовому расходу пара [17]:

$$G_{\text{Re}} = k_{\text{Re}} G_N, \tag{1}$$

где G_{Re} – массовый расход капельного уноса борной кислоты из АЗ и НКР, кг/с; k_{Re} – доля влаги, уносимой с паром (отношение массы капель к массе сухого пара).

Выходящая из объема АЗ пароводяная смесь, содержащая пар и капли раствора борной кислоты, замещается раствором борной кислоты, поступающим из НКР, и конденсатом из парогенераторов:

$$G_{12} = G_N + G_{\text{Re}}. \tag{2}$$

На основании этого можно записать изменение массы борной кислоты (Δm^B_{A3}) в

объеме АЗ за интервал времени Δt :

$$\Delta m^B_{A3} = (G_{12}C_{HKP} - G_{Re}C_{A3})\Delta t,$$

где C_{HKP} – концентрация раствора борной кислоты в НКР, г/кг; C_{A3} – концентрация раствора борной кислоты в АЗ, г/кг.

Как было отмечено, раствор борной кислоты из НКР будет перетекать в объем АЗ как в сообщающийся сосуд с расходом G_{12} , а излишки раствора, находящегося в объеме активной зоны реактора, будут переливаться через разорванный ГЦТ в объем гермооболочки. На основании этого можно определить массу раствора, вылившейся в объем гермооболочки за время Δt и изменение массы борной кислоты в объеме НКР (Δm^B_{HKP}) за тот же временной интервал:

$$G_{ГО} = G_{ГЕ} + G_{СПОТ} + G_{Re} - G_N,$$

$$\Delta m^B_{HKP} = (G_{ГЕ} C_{ГЕ} + G_{Re} C_{A3} - G_{12} C_{HKP} - G_{ГО} C_{HKP})\Delta t.$$

Для определения расхода выпара с учетом (1), (2) получим выражение для расчета остаточного энерговыделения:

$$N_{A3} = G_N [(h'' - h_{HKP}) + k_{Re}(h' - h_{HKP})],$$

где h'' – энтальпия сухого пара при температуре насыщения, кДж/кг.

На основании этого расход выпара равен

$$G_N = N_{A3} / [(h'' - h_{HKP}) + k_{Re}(h' - h_{HKP})].$$

Изменение концентрации борной кислоты в активной зоне (ΔC_{A3}) и напорной камере реактора (ΔC_{HKP}) за интервал времени Δt составит соответственно

$$\Delta C_{A3} = \Delta m^B_{A3} / m_{A3}, \quad \Delta C_{HKP} = \Delta m^B_{HKP} / m_{HKP}.$$

Изменение энтальпии раствора в НКР (Δh_{HKP}) будет равно отношению суммарной энтальпии потоков, входящих в НКР, к сумме массы раствора борной кислоты, уже находящейся в НКР, и массы потоков, поступающих в данный объем за единицу времени. В объем НКР поступает раствор борной кислоты от систем гидроемкостей и из АЗ путем капельного уноса. Помимо этого необходимо учитывать поступление потоков конденсата, имеющего температуру насыщения, от парогенераторов трех неаварийных петель.

$$\Delta h_{HKP} = \frac{(G_{ГЕ}h_{ГЕ} + G_{СПОТ}h' + G_{Re}h_{A3})\Delta t}{m_{HKP} + (G_{ГЕ} + G_{СПОТ} + G_{Re})\Delta t},$$

где $G_{ГЕ}$ – расход раствора борной кислоты от ГЕ, кг/с; $h_{ГЕ}$ – энтальпия раствора борной кислоты в ГЕ, кДж/кг; $G_{СПОТ}$ – расход конденсата от ПГ, кг/с; h_{A3} – энтальпия раствора борной кислоты в АЗ, кДж/кг; m_{HKP} – масса воды в НКР, кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты расчета изменения концентрации раствора борной кислоты в АЗ реактора в зависимости от величины капельного уноса представлены на рис. 7.

Величина капельного уноса определялась из расчета по формуле (1) с учетом различных факторов, которые могут как увеличивать влажность пара, так и уменьшать ее при проходе пароводяной смеси через блок защитных труб.

Как видно из графика, величина капельного уноса может сыграть существенную роль в процессе накопления борной кислоты. В случае, если капельный унос составит 0,2%, концентрация борной кислоты в АЗ будет равна ~ 1700 г/кг, при 2% – ~ 1060 г/кг; если же величина капельного уноса составляет 4%, то в конце 72-х часов концентрация H_3BO_3 будет равна ~ 722 г/кг. Все эти значения существенно превышают предельную концентрацию борной кислоты, которая для параметров аварии составляет 415 г/кг.

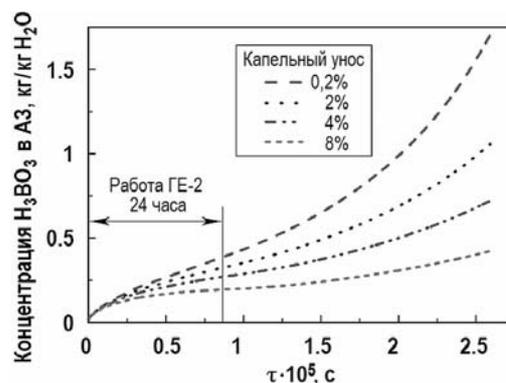


Рис. 7. Изменение концентрации борной кислоты в АЗ реактора при различных значениях капельного уноса

В случае, если значение капельного уноса составит 8%, концентрация H_3BO_3 в АЗ реактора составит ~ 423 г/кг, что незначительно превышает ее предельную концентрацию.

Таким образом, можно говорить, о существенном снижении риска кристаллизации борной кислоты на элементах внутрикорпусных устройств при аварийном процессе РУ ВВЭР, если значение капельного уноса из активной зоны H_3BO_3 превысит 8%. Еще раз отметим, что при проведении данного расчета не учитывался вклад выноса борной кислоты за счет растворяющей способности пара. Данный процесс также может оказать положительное влияние на накопление и кристаллизацию кислоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты, указывающие на возможность превышения предельной концентрации борной кислоты при длительном аварийном процессе АЭС с ВВЭР (после 24-го часа аварии). Риск кристаллизации может быть снижен за счет наличия процессов капельного уноса борной кислоты из АЗ. Доказательством этому служат полученные при расчете значения максимальной концентрации H_3BO_3 , зависящие от величины влажности пара. Таким образом, показано положительное влияние капельного уноса на процессы накопления и кристаллизации борной кислоты. Проведенный анализ литературных данных показал, что имеющиеся сведения о свойствах борной кислоты недостаточны для выполнения полноценных расчетов процессов в активной зоне ВВЭР в случае аварии. Это связано, с одной стороны, с низкими значениями исследованных концентраций H_3BO_3 , с другой стороны, с несоответствием экспериментальных условий параметрам аварийных режимов ВВЭР. Следовательно, для более детального расчетного анализа процессов накопления и кристаллизации борной кислоты необходимо знание ее теплофизических свойств в более широком диапазоне концентраций. Расширение этого диапазона возможно только путем проведения экспериментальных исследований.

Работа выполнена по гранту Российского научного фонда (проект №16-19-10649).

Литература

1. Калякин С.Г., Ремизов О.В., Морозов А.В., Юрьев Ю.С., Климанова Ю.В. Обоснование проектных функций системы пассивного залива ГЕ-2 усовершенствованного проекта АЭС с реактором ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 2. – С. 94-101.
2. Ремизов О.В., Морозов А.В., Цыганок А.А. Экспериментальное исследование неравновесных теплогидравлических процессов в системе пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 115-123.
3. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР. // Теплоэнергетика. – 2012. – № 5. – С. 22-27.
4. Калякин С.Г., Сорокин А.П., Пивоваров В.А. и др. Экспериментальные исследования теплофизических процессов в обоснование безопасности ВВЭР нового поколения. // Атомная энер-

- гия. – 2014. – Т. 116. – Вып. 4. – С. 241-246.
5. Азизов Н.Д., Ахундов Т.С. Термические свойства водных растворов борной кислоты при 298–573 К. // Теплофизика высоких температур – 1996. – Т. 34. – Вып. 5. – С. 798-802.
6. WCAP-17021-NP, Rev. 1 Summary of Tests to Determine the Physical Properties of Buffered and Un-buffered Boric Acid Solutions, January 2010. Электронный ресурс <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11220A169.pdf> (дата обращения: 13.01.2017)
7. Аванесян А.С., Ахундов Т.С. Экспериментальное исследование коэффициента динамической вязкости водных растворов борной кислоты. Препринт АН АрмССР. – Ереван. – 1980. – 20 с.
8. Гусейнов Г.Г., Гусейнов Э.Г. Исследование теплопроводности водных растворов электролитов и пористых материалов, насыщенных флюидом. // Fizika, Baki, Elm. – 2007. – Т. 13. – №. 1-2. – С. 13-25.
9. Yassin A. Hassan, Serdar Osturk, Suya Lee Rheological characterization of buffered boric acid aqueous solutions in light water reactors. // Progress in Nuclear Engineering. – 2015. – Vol. 85. – PP. 239-253.
10. Tuunanen J., Tuomisto J., Raussi P. Experimental and analytical studies of boric acid concentrations in a VVER-440 reactor during the long-term cooling period of loss-of coolant accidents. // Nuclear Engineering and Design. – 1992. – Vol. 148. – PP. 217-231.
11. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме. // Теплоэнергетика. – 2012. – №5. – С. 16-21.
12. Berkovich V.M., Peresadko V.G., Taranov G.S. et al. Experimental study on Novovoronezh NPP-2 steam generator model condensation power in the event of the beyond design basis accident. // Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants. – San Diego. CA. USA. June 13-17, 2010. – PP. 186-192.
13. Лукьянов А.А., Зайцев А.А., Морозов А.В. и др. Расчетно-экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на работу модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при запроектной аварии. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – №4. – С. 172-182.
14. Морозов А.В., Шлепкин А.С. Анализ влияния режимных факторов на работу модели парогенератора ВВЭР в режиме конденсации пара. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2016. – Вып. 3. – С. 91-99.
15. Копытов И.И., Калыкин С.Г., Беркович В.М., Морозов А.В., Ремизов О.В. Experimental investigation of non-condensable gases effect on Novovoronezh NPP-2 steam generator condensation power under the condition of passive safety systems operation. // Proceedings of the XVIIth International Conference on Nuclear Engineering. ICONE17. – Brussels. – 2009. – PP. 735-743.
16. Шмаль И.И., Иванов М.А. Процессы массопереноса борной кислоты в аварийных режимах. // Сб. докл. IX научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: АО ОКБ «Гидропресс». – 2015. – С. 25-29.
17. Стерман Л.С., Тевлин С.А., Шарков А.Т. Тепловые и атомные электростанции. – М.: Энергоиздат, 1982. – 345 с.

Поступила в редакцию 10.03.2017 г.

Авторы

Морозов Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, доктор техн. наук

E-mail: sas@ipre.ru

Питык Анна Валерьевна, аспирант

E-mail: anna.pityk@gmail.com

Рагулин Сергей Владимирович, инженер-исследователь

E-mail: sas@ipre.ru

Сахипгареев Азамат Радикович, аспирант

E-mail: sas@ipre.ru

Сошкина Александра Сергеевна, мл. научн. сотрудник

E-mail: sas@ipre.ru

Шлепкин Александр Сергеевич, аспирант

E-mail: alekstqel@mail.ru

UDC 621.039.58

ESTIMATION OF INFLUENCE OF BORIC ACID DROP ENTRAINMENT TO ITS ACCUMULATION IN THE WWER REACTOR IN THE CASE OF ACCIDENT

Morozov A.V., Pityk A.V., Ragulin S.V., Sahipgareev A.R., Soshkina A.S., Shlyopkin A.S.

JSC «State Scientific Centre of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

In framework of implementation of the «WWER-TOI» project special attention is paid to reactor safety assurance in emergency situation with main coolant circuit rupture and loss of all AC power supply for 72 hours. This problem is solved by operation of passive safety systems (PSS), which provide reactor core cooling (RC) by boric acid series feed with concentration of 16 g/kg to the reactor from the hydro accumulator systems. As it known, reactor core at this time is in a boiling state, respectively, take into account low acid concentration in the vapor phase, increase of amount of boric acid in the coolant and achieving its crystallization conditions on the nuclear fuel element outer surface is possible, it may lead to heat transfer deterioration. Consequently, the issues related to the boric acid accumulation in the WWER reactor core and its possible crystallization acquire a special applicability.

In this article the processes of boric acid mass transfer in case of the emergency situation with main coolant circuit rupture for reactors with passive safety systems are considered. The results of the calculation of changes in the boric acid solution concentration in the core for the WWER emergency mode are presented. The positive influence of the boric acid droplet entrainment on the processes of its crystallization and accumulation in the core is shown. The received results allow concluding that the accumulation and crystallization of boric acid in the core is possible. These processes may lead to deterioration of heat removal from fuel rods. The review of the available literature data about thermal physical properties of the boric acid solution (density, viscosity and thermal conductivity) is presented. The fact that available data are of a general nature and does not cover the entire range of parameters (temperature, pressure and concentration of acid) specific for the possible accidents at NPP with WWER is established. The necessity of an experimental studies of the processes of boric acid drop entrainment under conditions specific to the WWER emergency modes, as well as studies of thermal physical properties in a wide range of concentrations of boric acid are shown.

Key words: WWER, emergency mode, boric acid, accumulation, droplet, thermal physical properties of boric acid solution, density, viscosity, thermal conductivity

REFERENCES

1. Kalyakin S.G., Remizov O.V., Morozov A.V. Jur'ev Yu.S., Klimanova Yu.V. Justification of HA- 2 passive reflooding systems design functions of advanced project NPP with VVER. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2003, no. 2, pp. 94-101 (in Russian).
2. Remizov O.V., Morozov A.V., Tsyganok A.A. Experimental study of non-equilibrium thermal hydraulic processes in passive reflooding systems of reactor VVER core. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2009, no. 4, pp. 115-123 (in Russian).
3. Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental justification for design functions of additional passive reflooding systems of the reactor VVER core. *Teploenergetika*. 2012, no. 5, pp. 22-27 (in Russian).
4. Kalyakin S.G., Sorokin A.P., Pivovarov V.A., Pomet'ko R.S., Selivanov Y.U. Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental research of thermal physical processes for the safety

substantiation of new generation VVER. *Atomnaya energiya*. 2014, v. 116, iss. 4, pp. 241-246 (in Russian).

5. Azizov N. D., Ahundov T. S. Thermal properties of boric acid aqueous solutions at 298-573 K. *Teplofizika vysokih temperatur*. 1996, v. 34, no. 5, pp. 798 – 802 (in Russian).

6. WCAP-17021-NP, Rev. 1. Summary of Tests to Determine the Physical Properties of Buffered and Un-buffered Boric Acid Solutions, March 2009. Available at <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11220A169.pdf> (accessed 13.01.2017).

7. Avanesyan A.S., Ahundov T.S. *Experimental study of the dynamic viscosity coefficient of boric acid aqueous solutions*. Preprint AN ArmSSR. Erevan, 1980, 20 p. (in Russian).

8. Gusejnov G.G., Gusejnov E.G. Investigation of the thermal conductivity of electrolytes and porous materials saturated by a fluid aqueous solutions. *Fizika, Baki, Elm*, 2007, v. 13, no. 1-2, pp. 13-25 (in Russian).

9. Yassin Hassan A., Serdar Osturk, Saya Lee. Rheological characterization of buffered boric acid aqueous solutions in light water reactors. *Progress in Nuclear Engineering*, 2015, v. 85, pp. 239-253.

10. Tuunanen J., Tuomisto J., Raussi P. Experimental and analytical studies of boric acid concentrations in a VVER-440 reactor during the long-term cooling period of loss-of coolant accidents. *Nuclear Engineering and Design*, 1992, v. 148, pp. 217-231.

11. Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental study of the steam generator VVER models in condensing mode. *Teploenergetika*. 2012, no. 5, pp. 16-21 (in Russian).

12. Berkovich V.M., Peresadko V.G., Taranov G.S., Remizov O.V., Morozov A.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Experimental study on Novovoronezh NPP-2 steam generator model condensation power in the event of the beyond design basis accident. *Proc. of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants*. San Diego. CA. USA. June 13-17, 2010, pp. 186-192.

13. Luk'yanov A.A., Zaitsev A.A., Morozov A.V., Popova T.V., Remizov O.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Design and experimental study of the non-condensable gases influence on the VVER steam generator model operation in condensing mode during beyond design basis accident. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2010, no. 4, pp. 172-182 (in Russian).

14. Morozov A.V., Shlyopkin A.S. Analysis of the effect of operating factors on the operation of model of VVER steam generator in a mode of steam condensation. *VANT. Ser. Nuclear and reactor constants*. 2016, no. 3, pp. 91-99 (in Russian).

15. Kopytov I.I., Kalyakin S.G., Berkovich V.M., Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental investigation of non-condensable gases effect on Novovoronezh NPP-2 steam generator condensation power under the condition of passive safety systems operation. *Proceedings of the XVIIth International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17, Brussels, 2009*, pp. 735-743.

16. Schmal I.I, Ivanov M.A. Boric acid mass transfer processes in accidental conditions. *Collection of research papers of the IXth International Scientific and technical conference «Safety Assurance of NPP WWER»*. Podolsk. JSC EDB «Hydropress» Publ., 2015, pp. 25-29 (in Russian).

17. Sterman L.S., Tevlin S.A., Sharkov A.T. *Heat and Nuclear Power Plants*. Tutorial for Universities. Moscow. Energoizdat Publ., 1982, 345 p. (in Russian).

Authors

Morozov Andrej Vladimirovich, Leading Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: sas@ippe.ru

Pityk Anna Valer'evna, PhD Student

E-mail: anna.pityk@gmail.com

Ragulin Sergej Vladimirovich, Research Engineer of JSC «SSC RF – IPPE»

E-mail: sas@ippe.ru

Sahipgareev Azamat Radikovich, PhD Student

E-mail: sas@ippe.ru

Soshkina Aleksandra Sergeevna, Jr. Scientist Researcher

E-mail: sas@ippe.ru

Shlyopkin Aleksandr Sergeevich, PhD Student

E-mail: alekstqel@mail.ru