

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТВОРИМОСТИ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В КИПЯЩЕМ ПАРЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

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

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»,
249033, г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, 1*



Приведены результаты экспериментальных исследований растворимости борной кислоты в паре в диапазоне концентраций 16 – 240 г/кг H_2O при атмосферном давлении. Представлен обзор литературных данных о растворимости борной кислоты в паре в зависимости от начальной концентрации в растворе. Установлено, что имеющиеся результаты не охватывают весь диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), характерных для возможной аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР. Описаны экспериментальная установка и методика проведения исследований. Результаты обработки данных, полученных в ходе опытов, подтверждают имеющиеся в литературе данные о том, что изменение концентрации борной кислоты в водяном паре описывается линейным законом. Диапазон применения известной зависимости, позволяющей рассчитывать растворимость H_3BO_3 в паре, расширен до концентрации борной кислоты в растворе 240 г/кг, близкой к пределу растворимости H_3BO_3 в воде при атмосферном давлении.

Данные, полученные в результате проведения экспериментов, могут быть использованы для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР во время работы комплекса пассивных систем безопасности, таких как система пассивного залива активной зоны, система пассивного отвода тепла от парогенератора и система гидроемкостей третьей ступени.

Ключевые слова: борная кислота, растворимость, пар, накопление, ВВЭР, аварийный режим.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перед атомной энергетикой стоит ряд проблем, без решения которых невозможно успешное ее развитие. Одной из важнейших из них является обеспечение недопущения тяжелых аварий. В отечественном проекте «АЭС-2006» с реакторной установкой ВВЭР-1200 эта задача решается путем применения усовершенствованных систем безопасности, которые обеспечивают существенное преимущество по сравнению с атомными электростанциями предыдущих поколений [1]. В проекте реализованы новые пассивные системы безопасности – системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей первой и второй ступеней (ГЕ-1 и ГЕ-2), система пассивного отвода тепла, пассивная система фильтрации [2]. Они в течение 24-х часов обеспечивают непрерывный отвод остаточного тепла от активной зоны в том случае, когда активные системы безо-

© А.В. Питык, А.В. Морозов, А.С. Шлепки, А.Р. Сахипгареев, 2019

пасности по каким-либо причинам не могут включиться в работу [3].

В ходе функционирования пассивных систем безопасности из гидроемкостей каждой ступени в активную зону поступает раствор борной кислоты с концентрацией 16 г/кг [4]. Из-за длительности процесса с учетом малой концентрации кислоты в паровой фазе возможно увеличение количества борной кислоты в теплоносителе активной зоны (рис. 1) [5, 6]. При аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода ВВЭР давление в системе *реакторная установка - защитная оболочка* к началу работы ГЕ-3 составляет 0,2 МПа, температура среды в реакторе $\sim 120^\circ\text{C}$ [7]. Максимальная концентрация борной кислоты для данных параметров составляет ~ 385 г $\text{H}_3\text{BO}_3/\text{кг H}_2\text{O}$. Согласно расчетам, проведенным в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» [8], по достижении 24-х часов аварийного процесса концентрация борной кислоты в активной зоне составляет ~ 311 г/кг и не достигает предела растворимости.

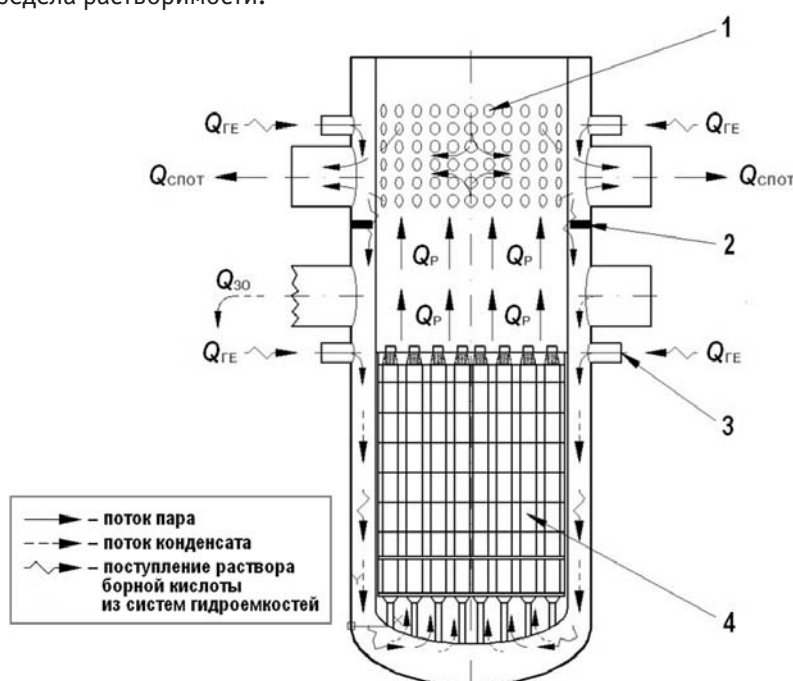


Рис. 1. Схема массопереноса борной кислоты в реакторной установке ВВЭР при авариях с разрывом главного циркуляционного трубопровода: 1 – перфорация шахты реактора; 2 – разделительный борт; 3 – патрубок системы аварийного охлаждения зоны; 4 – активная зона

Однако, принимая во внимание парообразование за счет кипения теплоносителя в реакторе, следует ожидать увеличения концентрации борной кислоты в нижней части активной зоны. При этом возможно достижение максимальной растворимости борной кислоты в объеме реактора, что может привести к ухудшению теплоотвода. Возможность ее кристаллизации в активной зоне ядерных реакторов в аварийной ситуации подтверждается расчетными и экспериментальными исследованиями [9 – 11].

Необходимо учитывать, что, согласно требованиям EUR к атомным станциям нового поколения, при авариях система отвода тепла от активной зоны должна быть рассчитана на 72 часа автономной работы. В рамках реализации проекта ВВЭР-ТОИ эта задача решается за счет введения дополнительной системы гидроемкостей третьей ступени (ГЕ-3), которая состоит из 12-ти гидроемкостей общим объемом 720 м^3 , заполненных борной кислотой.

Таким образом, из-за поступления дополнительного объема борной кислоты в активную зону возможно превышение ее предела растворимости (~ 400 г/кг) после 24-го часа

аварии. Вынос борной кислоты из реактора с паром или вследствие капельного уноса может существенно снизить риск ее кристаллизации. Следовательно, исследование процессов уноса борной кислоты из активной зоны имеет важное прикладное значение для расчетов аварийных режимов на АЭС с водо-водяными реакторами нового поколения, оснащенными пассивными системами безопасности.

В литературе имеется ряд работ по исследованию растворимости борной кислоты в насыщенном водяном паре [12 – 16]. Так в [12] на специальной установке методом выпаривания незначительной части раствора заданной концентрации исследовалась растворимость борной кислоты в паре. Капельный унос влаги паром был сведен к минимуму. Для предотвращения конденсации пара на стенках на установке имелась паровая подушка. Калориметрическим методом с применением кармина и объемным методом посредством манита определялось содержание борной кислоты в пробах конденсата пара. Исследования проводились в диапазоне давлений от 0,1 до 20 МПа. Концентрация борной кислоты в воде изменялась от 0,2 до 22 г/кг. В результате исследований была обнаружена линейная зависимость концентрации борной кислоты в насыщенном паре от ее концентрации в воде. Также было установлено, что коэффициент распределения борной кислоты $K_{распр}$ между паровой и жидкой фазами растворителя не зависит от концентрации в исследованной области параметров. В результате обработки экспериментальных результатов получена зависимость видимого коэффициента распределения борной кислоты $K^{вид}_{распр}$ от отношения плотностей фаз растворителя:

$$K^{вид}_{распр} = C_{п}/C_{в} = (\rho_{п}/\rho_{в})^{0,9}, \quad (1)$$

где $C_{п}$ и $C_{в}$ – концентрации H_3BO_3 в паре и водном растворе соответственно; $\rho_{п}$ и $\rho_{в}$ – плотности пара и воды, кг/м³.

В [13] рассматривались опыты по изучению распределения боратов и борной кислоты между паром и водой. Исследовался диапазон давлений 0,2 – 20 МПа. В широких пределах изменялись концентрация этих веществ в воде и показатель pH (8 – 12) кипящей воды. В [13] представлены значения коэффициентов распределения боратов и борной кислоты в зависимости от отношения плотностей фаз воды. Отмечено, что при увеличении pH происходит уменьшение $K_{распр}$. Установлена зависимость видимого коэффициента распределения $K^{вид}_{распр}$ борной кислоты от степени диссоциации, определяемой величиной pH:

$$K^{вид}_{распр} = \beta \cdot K^{нд}_{распр} + (1 - \beta) \cdot K^д_{распр}, \quad (2)$$

где $K^{нд}_{распр}$ – коэффициент распределения недиссоциированных молекул борной кислоты; $K^д_{распр}$ – коэффициент распределения диссоциированных ионов; β – степень гидролиза данной соли. Однако данная зависимость справедлива только при давлениях выше 3 МПа.

В [14, 15] представлены результаты экспериментов, проводимых при температуре 155°C в диапазоне давлений от 0,02 до 0,55 МПа. Авторами установлено, что при 155°C при низких давлениях воды наблюдается понижение концентрации борной кислоты в смывах, но при давлении воды больше 0,2 МПа происходит ее резкое повышение.

В [16] представлены некоторые физико-химические свойства сухой борной кислоты и приведены значения молярной объемной концентрации борной кислоты в дистиллятах, полученных при перегонке ее с водяным паром в диапазоне температур от 90 до 140°C.

Кроме непосредственного исследования растворимости борной кислоты ранее были выполнены исследования, в которых величина растворимости была задана для проведения расчетного или экспериментального анализа процессов, происходящих при аварии в реакторе [17, 18].

Таким образом, на основании проведенного анализа работ по исследованию растворимости борной кислоты в паре можно сделать вывод о том, что исследования данного

процесса проводились при концентрациях H_3BO_3 , нехарактерных для аварийного режима работы пассивных систем безопасности перспективных АЭС с ВВЭР. Из этого следует необходимость выполнения экспериментального исследования растворимости борной кислоты в паре применительно к условиям аварийных ситуаций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования процессов массопереноса борной кислоты в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» создана экспериментальная установка с рабочим участком (РУ) «Унос борной кислоты». На рисунке 2 показана принципиальная технологическая схема установки.

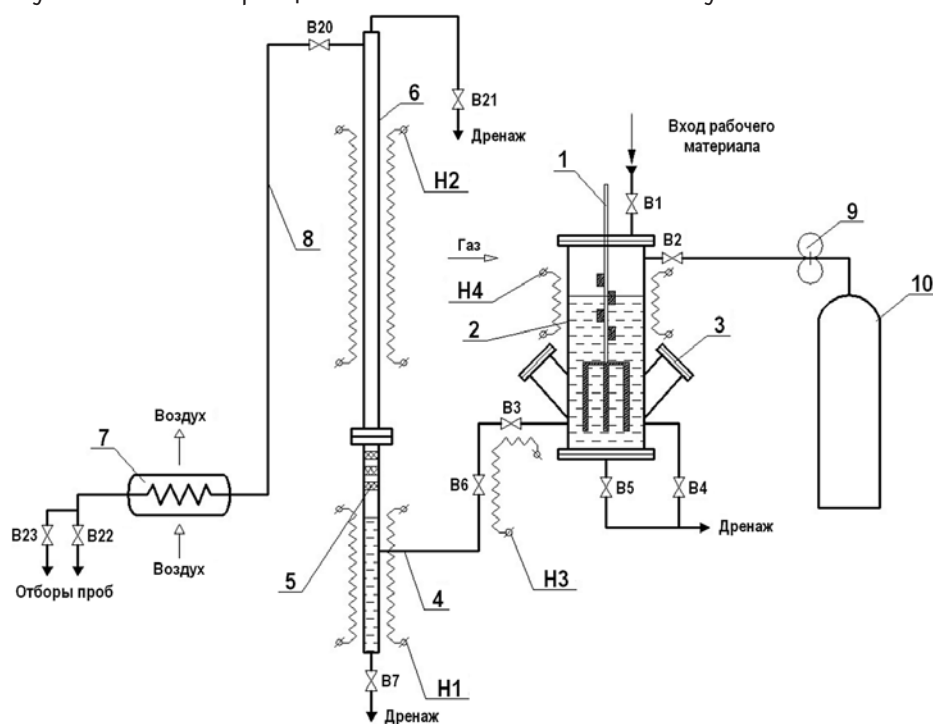


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема экспериментальной установки: 1 – перемешивающее устройство; 2 – бак подготовки раствора; 3 – система визуального контроля качества раствора; 4 – линия подвода раствора; 5 – сепаратор пара; 6 – рабочий участок; 7 – конденсатор; 8 – линия отбора пара; 9 – редуктор; 10 – газовый баллон; Н1 – Н4 – группы нагревателей

В состав установки входят бак подготовки раствора (БПР) объемом ~14 л; рабочий участок, выполненный из нержавеющей стали с внутренним диаметром 27 мм и высотой 2800 мм; конденсатор; устройство сепарации пара. Нижняя (испарительная) часть рабочего участка обогревается с помощью регулируемого нихромового нагревателя. Основное оборудование стенда связано между собой изолированными и обогреваемыми технологическими линиями и оснащено запорно-отсечной арматурой. Высота от уровня кипящей жидкости до верхнего отбора пара в РУ соответствует расстоянию от зеркала испарения в корпусе реактора до нижней образующей холодной ветки главного циркуляционного трубопровода. К вспомогательному оборудованию относятся системы поддержания давления, подачи раствора, поддержания температуры, управления мощностью конденсатора. Эксперименты проводились при мощности рабочего участка ~350 Вт.

Контрольно-измерительные приборы, установленные на стенде, позволяют при проведении опытов регистрировать следующие параметры установки: давление и температуру среды в БПР и РУ, расход пара и высоту столба раствора борной кислоты в рабочем участке. Регистрация давления выполняется с помощью преобразо-

вателя МЕТРАН-150-ДИ (погрешность измерений $\pm 0,1\%$ от диапазона давлений). Стабильность уровня раствора борной кислоты в испарительной зоне РУ является одним из важных условий получения надежных экспериментальных данных, поэтому необходимо применение средств визуального контроля. Фиксация уровня раствора борной кислоты в РУ осуществляется с помощью стеклянного уровнемера. Для измерения температуры используются кабельные термопары ХА диаметром 1 мм (погрешность измерений 1°C). Частота опроса измерительных каналов системы сбора составляет 1 Гц.

Основной измеряемой величиной в экспериментах является концентрация борной кислоты в пробах конденсата, полученных при конденсации пара, сгенерированного в рабочем участке.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Задача исследования состояла в экспериментальном изучении процессов растворимости борной кислоты в паре. В начале эксперимента БПР заполнялся раствором борной кислоты с заданной концентрацией. После продолжительного перемешивания механическим устройством до полного растворения вещества, что контролировалось визуально через иллюминаторы на баке, с помощью редуктора в объем бака подготовки раствора подавался азот, т.е. создавалась газовая подушка с давлением, превышающим давление насыщения, при заданной температуре с целью недопущения кипения борной кислоты. Далее происходил последовательный нагрев БПР, рабочего участка и линии подачи раствора до необходимых температур. Заданные значения температур поддерживались с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ в течение всего эксперимента с помощью релейного регулятора.

После завершения прогрева последовательно открываются вентили на линии подачи раствора, и испарительный участок заполняется раствором борной кислоты с концентрацией, соответствующей концентрации в БПР, до уровня на 0,05 м выше рабочего для компенсации потери раствора на начальном этапе опыта. Происходит увеличение мощности основного нагревателя до заданного уровня, регистрируемого по показаниям вольтметра и амперметра, что приводит к началу кипения раствора и снижению уровня в РУ.

С помощью постепенного открытия управляющего игольчатого вентиля (вентиль В6, рис. 2) на линии подвода раствора борной кислоты устанавливается расход из БПР, соответствующий расходу пара из рабочего участка, что приводит к стабилизации уровня раствора в испарительном участке. Одновременно с этим для недопущения наличия в РУ паровоздушной смеси открывается продувочный вентиль, и паровоздушная смесь выбрасывается из основного оборудования в атмосферу.

Затем регулируется мощность конденсатора. Увеличение мощности обеспечивается вентиляторами, уменьшение мощности происходит при закреплении на конденсаторе изоляционных элементов. Критерием выхода на необходимое значение конденсационной мощности является постоянство значения давления в рабочем участке, температуры стенки испарительного участка и температуры среды на выходе из конденсатора. После выхода на рабочие параметры открывается вентиль постоянного отбора конденсата и вентиль отбора пара.

Через пять минут после начала эксперимента, а далее каждые 30 минут, отбираются пробы конденсата объемом 50 мл в мерные емкости. Длительность накопления конденсата позволяет найти фактическую испарительную мощность установки на момент отбора. По завершении эксперимента определяется концентрация борной кислоты в пробах методом титрования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эксперименты проводились при атмосферном давлении и расходе пара из рабочего участка, изменявшегося в диапазоне от 0,154 до 0,162 г/с. Начальная концентрация

H_3BO_3 в баке подготовки раствора варьировалась в диапазоне от 10 до 30 г/кг для изучения процесса растворимости кислоты в паре при различных темпах ее накопления в испарительном участке. В таблице 1 представлены некоторые параметры опытов по изучению процессов массопереноса растворенной в паре борной кислоты.

Таблица 1

Основные параметры экспериментов

№ опыта	Давление, МПа	Начальная концентрация борной кислоты в РУ, г/кг H_2O	Средняя температура на выходе из конденсатора, °С	Средний расход конденсата, г/с
1	0,1	30	31	0,157
2	0,1	10	31	0,162
3	0,1	30	28	0,154
4	0,1	16	29	0,156

Было выполнено четыре эксперимента, длительность которых ограничивалась пятью-шестью отборами проб. На рисунке 3 изображено накопление борной кислоты в испарительной части рабочего участка, откуда видно, что изменение концентрации кислоты имеет линейный характер. Угол наклона прямой зависит от начальной концентрации борной кислоты $C(H_3BO_3)_0$, поступающей в испарительную часть рабочего участка, и мощности установки.

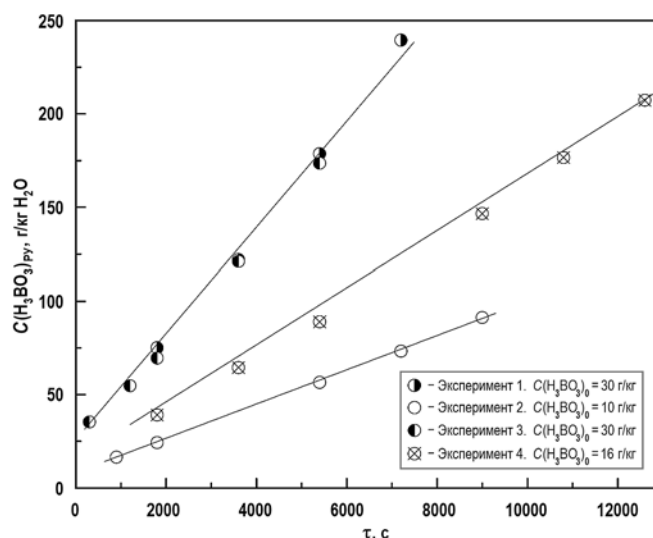


Рис. 3. Накопление борной кислоты в испарительной части рабочего участка экспериментальной установки

На рисунке 4 представлена зависимость концентрации борной кислоты в насыщенном водяном паре от ее содержания в воде при атмосферном давлении.

Как видно из рис. 4, полученные экспериментальные значения растворимости борной кислоты в паре с погрешностью в 20% могут быть описаны линейной зависимостью

$$C(H_3BO_3)_{пар} = 0,0014 \cdot C(H_3BO_3)_{ру}, \tag{3}$$

где $C(H_3BO_3)_{пар}$ – концентрация растворенной в паре борной кислоты, г/кг H_2O ; $C(H_3BO_3)_{ру}$ – концентрация раствора борной кислоты в рабочем участке, г/кг H_2O . Указанная зависимость справедлива при давлении пара 0,1 МПа и в диапазоне концентраций 16 – 240 г/кг H_2O .

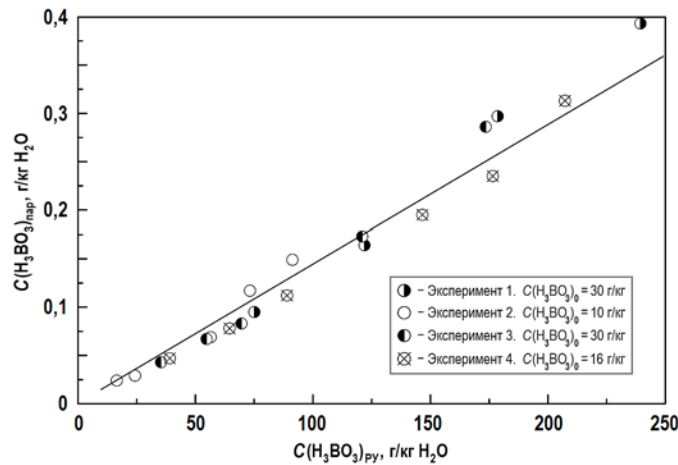


Рис. 4. Зависимость растворимости борной кислоты в насыщенном водяном паре от содержания ее в воде при атмосферном давлении

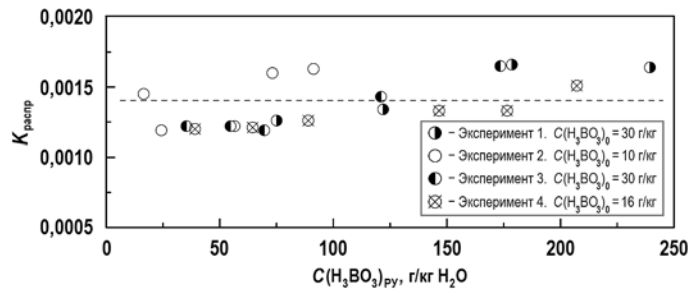


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента распределения борной кислоты между фазами и концентрацией в рабочем участке

Отклонение значений растворимости борной кислоты в паре в двух экспериментах, выполненных при одной и той же концентрации в кипящем растворе, равной 30 г/кг, не превышает 7%, что говорит об удовлетворительной воспроизводимости результатов.

Рисунок 5 показывает, что коэффициент распределения борной кислоты $K_{\text{распр}}$ во всем диапазоне исследованных концентраций H_3BO_3 остается постоянным практически до предела растворимости. Среднее значение коэффициента по результатам обработки всех экспериментальных данных равно 0,0014, что с точностью 10% совпадает со значениями, приведенными в [12] для растворов с более низкими концентрациями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования процессов массопереноса борной кислоты в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» создана экспериментальная установка с рабочим участком «Унос борной кислоты». Эксперименты проводились при атмосферном давлении и среднем расходе пара 0,157 г/с. Начальная концентрация борной кислоты варьировалась в диапазоне от 10 до 30 г/кг.

Результаты экспериментов подтверждают имеющиеся в литературе данные о том, что темп роста концентрации борной кислоты в водяном паре описывается линейным законом. Диапазон применения известной зависимости, позволяющей рассчитывать растворимость H_3BO_3 в паре, расширен до концентрации борной кислоты в растворе 240 г/кг, близкой к пределу растворимости H_3BO_3 в воде при атмосферном давлении.

Полученные данные могут быть использованы для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР во время работы комплекса пассивных систем безопасности, включающих в себя систему пассивного залива активной зоны, систему пас-

сивного отвода тепла от парогенератора и систему гидроемкостей третьей ступени.

Исследование выполнено за счет гранта 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 GE-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. *Лукьянов А.А., Зайцев А.А., Морозов А.В., Попова Т.В., Ремизов О.В., Цыганок А.А., Калякин Д.С.* 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.
4. *Беркович В.М., Копытов И.И., Таранов Г.С. Мальцев М.Б.* Особенности проекта АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-1000 повышенной безопасности. // Теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 9-15.
5. *Шмаль И.И.* Проблемы моделирования кристаллизации // Молодой ученый. – 2013. – № 8 (55). – С. 44-47.
6. *Коэн П.* Технология воды энергетических реакторов / Пер. с англ. А. И. Касперовича. – М.: Атомиздат, 1973. – 327 с.
7. *Закутаев М.О., Быков М.А., Зайцев С.И., Елкин И. В., Пылев С.С., Мелихов О.И., Мелихов В.И., Никонов С.М., Дорофеев Д.И.* Влияние пассивных систем безопасности на температурное состояние поверхности имитаторов твэл / Труды IX Научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: АО «ОКБ «Гидропресс», 2015. – С. 111.
8. *Морозов А.В., Питык А.В., Рагулин С.В., Сахингареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С.* Оценка влияния капельного уноса борной кислоты на ее накопление в реакторе ВВЭР в случае аварии. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 72-82.
9. *Балашов С.М., Виденев Е.Н., Нигматулин Б.И.* Влияние борной кислоты на теплогидравлические характеристики частично осушенной активной зоны. // Теплоэнергетика. – 1992. – № 9. – С. 43-47.
10. *Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Каретников Г.В., Володина Н.П., Афров А.М.* Модель транспорта и накопления борной кислоты в реакторе типа ВВЭР в аварии с течью теплоносителя. / Труды Международной конференции «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР». – Обнинск, 1998. – Т. 1. – С. 47-57.
11. *R. Vaghetto, S. Lee, Y.A. Hassan, E. J. L. Kee.* Experimental observations of boric acid precipitation scenarios. / Proc. of the International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics 2015. NURETH-16. – USA, 2015. – Vol. 6. – PP. 5263-5274.
12. *Стырикович М.А., Цхвирашвили Д.Г., Небиеридзе Д.П.* Исследование растворимости борной кислоты в насыщенном водяном паре. // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 134. – № 3. – С. 615-617.
13. *Цхвирашвили Д.Г., Галусташвили В.В.* Поведение боратов и борной кислоты в кипящих реакторах. // Атомная энергия. – 1964. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 65-67.
14. *Николаева И.Ю., Бычков А.Ю.* Экспериментальное исследование растворимости метаборита и сассолина в водяном паре при 155°C // Вестник Отделения наук о Земле РАН. – 2002. – Вып. 20. – № 1. – С. 1-2.

15. Николаева И.Ю. Экспериментальное исследование форм переноса бора в условиях низко- и среднетемпературного гидротермального процесса. / Автореф. дис. канд. геолого-минерал. наук. – Москва, 2009. – 182 с.

16. Немодрук А.А., Каралова З.К. Аналитическая химия бора. – М.: Наука, 1964. – 284 с.

17. J. Tuunanen, J. Tuomisto, P. Raussi. 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.

18. Шмаль И.И., Иванов М.А. Процессы массопереноса борной кислоты в аварийных режимах // Сб.: 9-я научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: АО ОКБ «Гидропресс», 2015. – С. 25-29.

Поступила в редакцию 05.06.2018 г.

Авторы

Питык Анна Валерьевна, аспирант

E-mail: anna.pityk@gmail.com

Морозов Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук

E-mail: sas@ippe.ru

Шлепки Александр Сергеевич, аспирант

E-mail: alekstqel@mail.ru

Сахипгареев Азамат Радикович, аспирант

E-mail: sahipgareev.azamat@yandex.ru

UDC 621.039.58:532.77

AN EXPERIMENTAL STUDY INTO THE SOLUBILITY OF BORIC ACID IN STEAM DURING BOILING IN CONDITIONS OF ATMOSPHERIC PRESSURE

Pityk A.V., Morozov A.V., Shlepkin A.S., Sakhigareyev A.R.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

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

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental studies into the solubility of boric acid in steam in conditions of atmospheric pressure in a concentration range of 16 to 240 g/kg of H₂O. The problem of accumulation and crystallization of boric acid in accidents with disruption of the main circulation pipeline and the operation of passive safety systems (hydraulic accumulators of the first, second and third stages, as well as the passive heat removal system) is formulated.

An overview of the available literature data on the solubility of boric acid in steam depending on its initial concentration in solution is provided. It has been found that the available results do not cover the whole range of parameters (temperature, pressure, concentration of acid) typical of a potential emergency at an NPP with the VVER reactor. The experimental facility and the investigation procedures are described. The results of processing data obtained in the course of the experiments confirm the existing literature evidence that the change in the concentration of boric acid is described by a linear law. The application scope of the known dependence that makes

it possible to calculate the solubility of H_3BO_3 in steam is extended to the boric acid concentration in solution of 240 g/kg which is close to the solubility of H_3BO_3 in water in conditions of atmospheric pressure.

The data obtained as the result of the experiments can be used for the computational simulation of emergency processes in the VVER reactor plant during operation of integrated passive safety systems such as the passive core flooding system, the passive steam generator heat removal system, and the system of stage III accumulators (HA-3 system).

Key words: boric acid, solubility, steam, accumulation, VVER, emergency mode.

REFERENCES

1. Kalyakin S.G., Remizov O.V., Morozov A.V., Yur'ev Yu.S., Klimanova Yu.V. Substantiation of Design Functions of the Passive Flood System for Improved NPP Project with VVER Reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. 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 a Passive VVER Core Reflooding System. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2009, no. 4, pp. 115-123 (in Russian).
3. Luk'yanov A.A., Zajtsev A.A., Morozov A.V., Popova T.V., Remizov O.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Numerical and experimental investigation of the effect of non-condensable gases on the VVER steam generator model operation in condensing mode during beyond design basis accident. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2010, no. 4, pp. 172-182 (in Russian).
4. Berkovich V.M., Kopytov I.I., Taranov G.S., Mal'cev M.B. Features of the design for a new generation nuclear power station equipped with a VVER-1000 reactor having enhanced safety]. *Teploenergetika*. 2005, no. 1, pp. 9-15 (in Russian).
5. Shmal' I.I. Crystallization Modeling Problems. *Molodoj uchyonyj*. 2013, no. 8 (55), pp. 44-47 (in Russian).
6. Kojen P. *Water Coolant Technology of Power Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1973, 327 p. (in Russian).
7. Zakutaev M.O., Bykov M.A., Zajtsev S.I., Elkin I.V., Pylev S.S., Melihov O.I., Melihov V.I., Nikonov S.M., Dorofeev D.I. The effect of the passive safety systems on the thermal state of the surface of the fuel rod imitators. Collection of research papers of the IX-th International Scientific and technical conference «Safety Assurance of NPP WWER». Podolsk. JSC EDB «Hydropress» Publ., 2015, p. 111 (in Russian).
8. Morozov A.V., Pityk A.V., Ragulin S.V., Sakhipgareev A.R., Soshkina A.S., Shlepkin A.S. Estimation of influence of boric acid drop entrainment to its accumulation in the VVER reactor in the case of accident. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 4, pp. 72-82 (in Russian).
9. Balashov S.M., Videneev E.N., Nigmatulin B.I. The effect of the boric acid on the thermal hydraulic characteristics of the partially drained reactor core. *Teploenergetika*. 1992, no. 9, pp. 43-47 (in Russian).
10. Logvinov S.A., Bezrukov Yu.A., Karetnikov G.V., Volodina N.P., Afrov A.M. The model of transport and accumulation of the boric acid in the VVER reactor in an accident with coolant leak. Proceedings of the International Conference «Thermal Physics Aspects of VVER Safety». Obninsk. FEI Publ., 1998, v. 1, pp. 47-57 (in Russian).
11. Vaghetto R., Lee S., Hassan Y.A., Kee E. J. L. Experimental observations of boric acid precipitation scenarios. Proceedings of the International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics 2015. NURETH-16. USA, 2015, v. 6, pp. 5263-5274.
12. Styrikovich M.A., Tshvirashvili D.G., Nebieridze D.P. Investigations of the solubility of boric acid in saturated water vapor. *Doklady AN SSSR*. 1960, v. 134, no. 3, pp. 615-617 (in Russian).

13. Tshvirashvili D.G., Galustashvili V.V. Comportment of borates and boric acid in boiling solutions. *Atomnaya Energiya*. 1964, v. 16, no. 1, pp. 65-67 (in Russian).
14. Nikolaeva I.Yu., Bychkov A.Yu. Eksperimental investigations of solubility of the metaborate and sassolite in water vapor at 155°C. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*. 2002, v. 20, no. 1, pp. 1-2 (in Russian).
15. Nikolaeva I.Yu. *Experimental study of the forms of the boron transfer under the conditions of low and medium temperature hydrothermal process*. Cand. geolog. and miner. sci. diss. Moscow, 2009, 182 p. (in Russian).
16. Nemodruk A.A., Karalova Z.K. *Analytical chemistry of the boron*. Moscow. Nauka Publ., 1964, 284 p. (in Russian).
17. 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.
18. Schmal' I.I., Ivanov M.A. Boric acid mass transfer processes in accidental conditions. Proc. of the IXth International Scientific and technical conference «Safety Assurance of NPP VVER». Podolsk. JSC EDB «Hydropress» Publ., 2015, pp. 25-29 (in Russian).

Authors

Pityk Anna Valeryevna, PhD student

E-mail: anna.pityk@gmail.com

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

E-mail: sas@ippe.ru

Shlepkin Alexander Sergeevich, PhD student

E-mail: alekstqel@mail.ru

Sakhipgareev Azamat Radikovich, PhD student

E-mail: asakhipgareev@ippe.ru