

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОХЛАЖДЕНИЮ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ВВЭР

Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



Представлены результаты экспериментального исследования теплофизических свойств водных растворов борной кислоты с добавкой гидроксида калия, используемого для соответствия требованиям водно-химического режима первого контура ВВЭР. Параметры были измерены при давлении $P=0,1$ МПа в диапазоне температур 25–90°C при следующих концентрациях H_3BO_3 в растворах: плотность 2,5–150 г/кг H_2O , вязкость 2,5–100 г/кг H_2O , поверхностное натяжение 2,5–150 г/кг H_2O . Описаны основное экспериментальное оборудование и методика проведения исследований. На основании экспериментальных данных получены зависимости теплофизических свойств растворов от концентрации борной кислоты. Выявлены особенности изменения поверхностного натяжения H_3BO_3 при изменении концентрации и росте температуры раствора борной кислоты с корректирующей добавкой гидроксида калия.

Результаты проведенных исследований позволяют расширить диапазон известных свойств водных растворов борной кислоты и имеют важное прикладное значение для АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для уточнения результатов расчетов аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР при работе комплекса пассивных систем безопасности, включающего в себя системы пассивного залива активной зоны, пассивного отвода тепла от парогенератора и гидроемкости третьей ступени.

Ключевые слова: ВВЭР, борная кислота, аварийные режимы, теплофизические свойства, пассивные системы безопасности.

Для цитирования: Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С. Экспериментальное исследование свойств концентрированных растворов борной кислоты применительно к охлаждению реакторных установок ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.02>

ВВЕДЕНИЕ

На АЭС с современными реакторными установками ВВЭР в случае возникновения аварийной ситуации, связанной с потерей теплоносителя в результате разрыва главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) и одновременным отказом источников аварийного электропитания, останов реактора и дальнейшее обеспечение его охлаждения возлагается на пассивные системы безопасности. К ним относятся пассивная часть системы аварийного охлаждения зоны (система ГЕ-1), системы пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй и третьей ступеней (системы ГЕ-2 и ГЕ-3), система пассивного отвода тепла от парогенераторов.

В случае аварии с большой течью системы ГЕ-1, ГЕ-2 и ГЕ-3 должны обеспечивать подачу теплоносителя в активную зону в течение 72-х часов. Охлаждающей жидкостью является раствор борной кислоты с концентрацией 16–20 г/кг [1]. Общего объема теплоносителя в гидроемкостях первой, второй и третьей ступеней достаточно для расхолаживания активной зоны на протяжении трех суток после начала аварии.

Из-за кипения теплоносителя в результате разгерметизации ГЦТ, длительности аварийного процесса и низкого содержания бора в паре может наступить момент, когда борная кислота начнет кристаллизоваться в активной зоне. Это может привести к блокировке проходных сечений для поступающего теплоносителя.

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» был проведен расчетный анализ [2], в результате которого было установлено существенное превышение предела растворимости концентрацией борной кислоты в теплоносителе на вторые сутки аварийного процесса. Основной целью расчета было определение величины капельного уноса, при которой концентрация H_3BO_3 в активной зоне не будет превышать предельную. Для расчетной оценки был сделан ряд консервативных допущений [2], необходимость которых обусловлена сложностью процессов, происходящих в контуре в аварийном режиме, и недостаточностью данных по свойствам борной кислоты.

В литературе имеется информация об экспериментальных исследованиях теплофизических свойств водных растворов H_3BO_3 [3–13]. Однако ее анализ показал, что существующие данные не полностью охватывают диапазон параметров (температура и концентрация кислоты), характерный для аварийной ситуации на российских АЭС с ВВЭР. В большинстве публикаций представлены результаты исследований свойств водных растворов с достаточно низкой концентрацией борной кислоты. Поэтому для снижения консервативности выполненной расчетной оценки возникла необходимость проведения экспериментальных исследований для определения теплофизических свойств борной кислоты, ее растворимости в паре и величины капельного уноса в диапазоне параметров, характерном для аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР.

В рамках решения этой задачи в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были выполнены следующие экспериментальные исследования:

- изучение процесса массопереноса борной кислоты при ее растворимости в паре при параметрах, характерных для аварийного режима ВВЭР [14];
- исследование процесса кристаллизации H_3BO_3 на семистержневой модели теплоделяющей сборки при аварийном расхолаживании (визуальные наблюдения) [15];

- определение теплофизических свойств (плотности и кинематической вязкости) водных растворов борной кислоты в диапазоне давлений 0,1–0,3 МПа и концентрации 2,5–400 г/кг H_2O [16];
- измерение водородного показателя H_3BO_3 в диапазоне концентраций 2,5–100 г/кг H_2O [17];
- измерение поверхностного натяжения водных растворов H_3BO_3 в диапазоне концентраций 2,5–150 г/кг H_2O [18];
- исследование процессов капельного уноса борной кислоты при аварийном охлаждении реактора ВВЭР [19].

Следующим этапом работы стало исследование влияния щелочи – гидроксида калия (KOH), добавляемого в теплоноситель ВВЭР в качестве корректирующей добавки для поддержания необходимой величины водородного показателя среды первого контура, на теплофизические свойства борной кислоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальные исследования теплофизических свойств (плотность, вязкость и поверхностное натяжение) водных растворов борной кислоты с щелочной добавкой были проведены в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

Измерения плотности растворов борной кислоты с добавлением KOH выполнялись при давлении $P=0,1$ МПа в диапазоне температуры 25–90°C с использованием стеклянных пикнометров. Предел допускаемой относительной погрешности измерения плотности пикнометрическим методом составляет 0,7%. При выполнении опытов придерживались методики, подробно описанной в работе [16], с тем лишь отличием, что в пикнометры заливался предварительно подготовленный раствор H_3BO_3 с гидроксидом калия, имеющим концентрацию 8 г/кг H_2O .

Для измерения кинематической вязкости исследуемых растворов согласно методике, описанной в [16], применялись капиллярные вискозиметры для прозрачных жидкостей ВПЖ-1. Предел допускаемой относительной погрешности измерения вязкости составляет 0,3%.

Исследования поверхностного натяжения растворов борной кислоты в диапазоне концентраций 2,5–150 г/кг H_2O и температуры 26–86°C с корректирующей щелочной добавкой гидроксида калия проводилось методом кольца ДюНуи с использованием цифрового тензиометра SurfaceElectroOptics DST 30 (рис. 1). Предел допускаемой относительной погрешности измерения поверхностного натяжения составляет 1%. Методика проведения экспериментов подробно описана в [18].

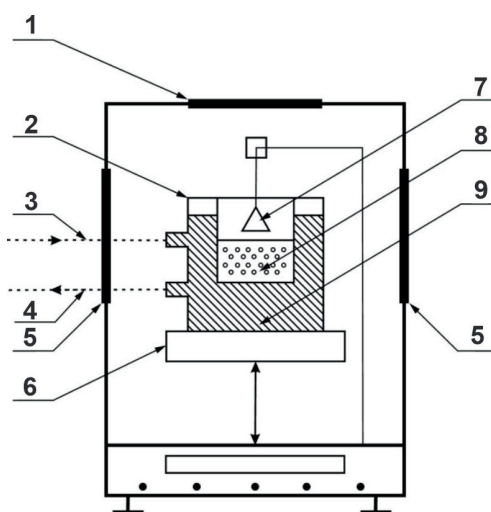


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для измерения поверхностного натяжения: 1 – крышка прибора; 2 – измерительный стакан; 3, 4 – циркуляционный контур греющей жидкости; 5 – боковые дверцы; 6 – подвижный столик; 7 – кольцо ДюНуи; 8 – исследуемый раствор; 9 – греющая жидкость

Во всех экспериментах в качестве растворителя применялась деионизированная вода с удельной электропроводностью 5 мкСм/см, полученная путем прогонки дистиллированной воды через деионизатор Simplicity UV.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследований было проведено измерение свойств растворов борной кислоты с добавкой гидроксида калия, используемого для соответствия среды показателям водно-химического режима ВВЭР.

Эксперименты с добавлением КОН выполнялись в две серии. Первая серия проводилась с использованием растворов борной кислоты различной концентрации, смешанной с постоянной массой раствора гидроксида калия с концентрацией 8 г/кг H_2O , принятой в предположении, что на момент начала аварии в теплоносителе первого контура поддерживается нейтральная среда со значением водородного показателя pH, близким к семи. Необходимая масса щелочи была предварительно определена эмпирически при нейтрализации 100 г раствора борной кислоты ($C=8$ г/кг H_2O) 1,33 г щелочи при температуре 25°C.

Во второй серии экспериментов раствор КОН добавлялся к борной кислоте в количестве, необходимом для нейтрализации кислотных свойств растворов различных концентраций H_3BO_3 , тем самым обеспечивалось поддержание pH = 7.

На рисунках 2, 3 представлены результаты измерения плотности и кинематической вязкости исследуемых растворов при увеличении концентрации борной кислоты в них.

Из рисунков 2а, 3а видно, что добавление фиксированной массы КОН к растворам борной кислоты различных концентраций приводит лишь к незначительному изменению плотности и вязкости исследуемых жидкостей (меньше 1%) по сравнению с результатами из [16], полученными при исследовании растворов чистой борной кислоты. Однако, если концентрация кислоты в растворе ниже 8 г/кг H_2O , то возникает некоторое (до 10%) отличие кинематической вязкости борной кислоты от раствора с добавкой гидроксида калия.

Поддержание постоянного pH раствора показало (рис. 2б), что его плотность увеличивается при повышении концентрации кислоты и, соответственно, щелочи. При этом, как видно из рис. 3б, кинематическая вязкость таких растворов изменяется незначительно.

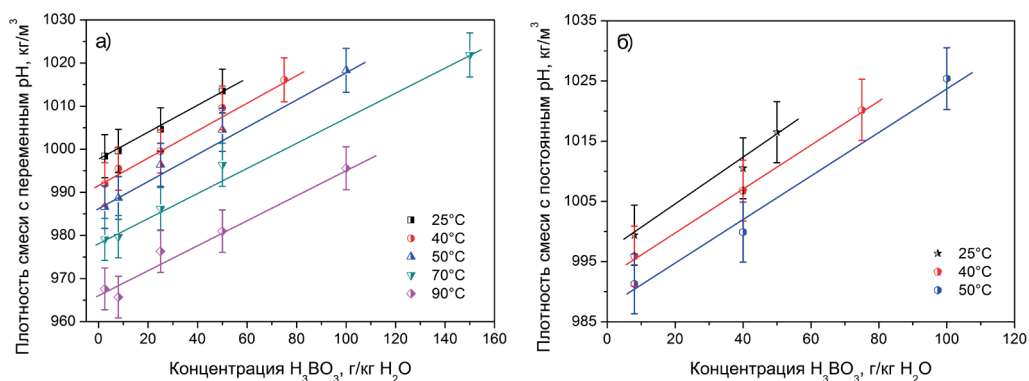


Рис. 2. Зависимость изменения плотности исследуемых растворов от концентрации борной кислоты: а) H_3BO_3 с фиксированной добавкой КОН; б) H_3BO_3 с добавкой КОН, необходимой для поддержания постоянного pH

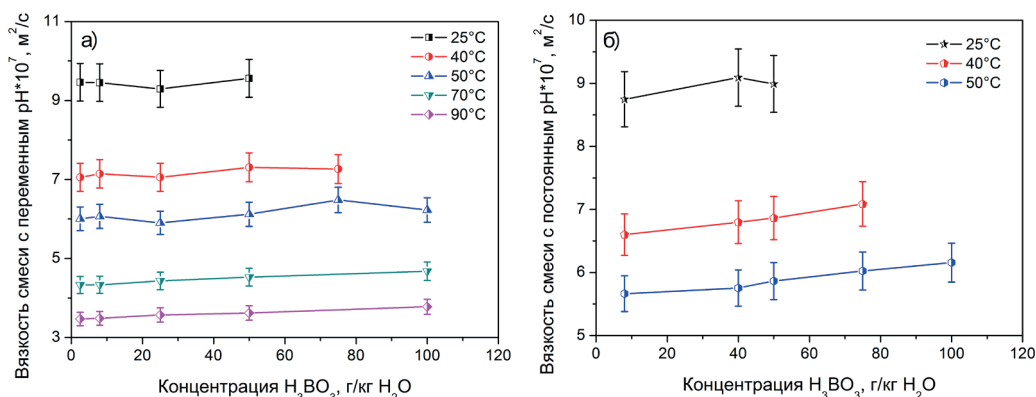


Рис. 3. Зависимость изменения кинематической вязкости исследуемых растворов от концентрации борной кислоты: а) H_3BO_3 с фиксированной добавкой КОН; б) H_3BO_3 с добавкой КОН, необходимой для поддержания постоянного pH

Изменение плотности смеси (ρ_{mix} , кг/м³) с постоянной добавкой КОН в зависимости от концентрации кислоты в ней (см. рис. 2а) можно описать следующей эмпирической формулой:

$$\rho_{mix} = (1130904 \cdot 10^{-3} - 44612 \cdot 10^{-5} \cdot T_{mix}) - (8997 - 7591 \cdot 10^{-2} \cdot T_{mix} + 199049 \cdot 10^{-6} \cdot T_{mix}^2 - 165256 \cdot 10^{-9} \cdot T_{mix}^3) \cdot C_{H_3BO_3}, \quad (1)$$

где T_{mix} – температура исследуемого раствора, К; $C_{H_3BO_3}$ – концентрация кислоты, кг/кг H_2O . Данная зависимость удовлетворительно описывает экспериментальные данные в диапазоне изменения температуры 25–90°C и концентрации кислоты 2,5–150 г/кг H_2O . Максимальное рассогласование расчетных и экспериментальных данных не превышает 1%. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,992$.

Экспериментальные данные по изменению кинематической вязкости (ν_{mix} , м²/с) раствора борной кислоты с фиксированной добавкой КОН, представленные на рис. 3а, описываются эмпирической зависимостью

$$\nu_{mix} = 233093 \cdot (T_{mix})^{-4,605} \cdot (C_{H_3BO_3})^X, \quad (2)$$

степень которой имеет вид

$$X = -553155 \cdot 10^{-11} \cdot T_{mix}^2 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot T_{mix} - 70023 \cdot 10^{-5},$$

где T_{mix} – температура исследуемого раствора, К; $C_{H_3BO_3}$ – концентрация кислоты, кг/кг H_2O . Максимальное рассогласование расчетных и экспериментальных данных не превышает 6%. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,856$. Зависимость применима в диапазоне изменения температуры 25–90°C и концентрации кислоты 2,5–100 г/кг H_2O .

На рисунке 4 представлены результаты измерения поверхностного натяжения исследуемых растворов при увеличении концентрации борной кислоты в них.

Из рисунка 4 видно, что повышение концентрации H_3BO_3 в растворах приводит к увеличению коэффициента поверхностного натяжения. В то же время добавление фиксированного количества КОН к растворам с низкими концентрациями кислоты уменьшает поверхностное натяжение смеси, что вызвано щелочными свойствами образующегося раствора. Данный эффект наглядно виден на рис. 4а и выражается в резком снижении значения поверхностного натяжения в диапазоне концентрации борной кислоты 2,5–50 г/кг H_2O при температуре раствора 86°C. По мере увеличения концентрации кислоты наблюдается рост

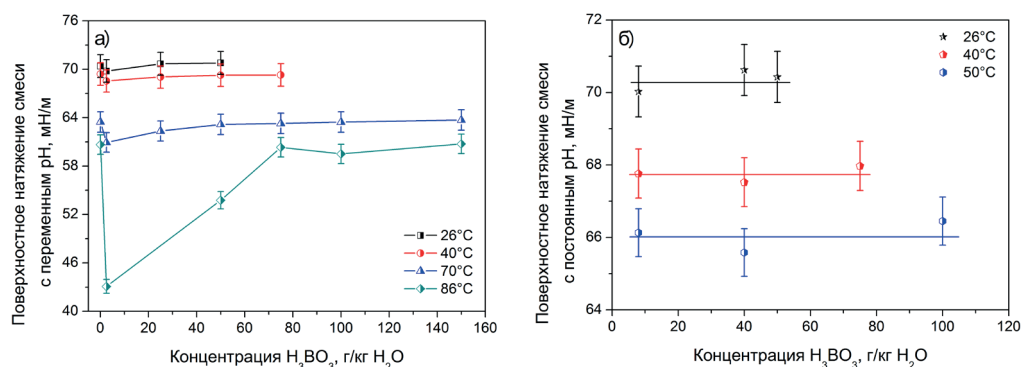


Рис. 4. Зависимость изменения поверхностного натяжения исследуемых растворов от концентрации борной кислоты: а) H_3BO_3 с фиксированной добавкой КОН; б) H_3BO_3 с добавкой КОН, необходимой для поддержания постоянного рН

поверхностного натяжения, градиент которого не столь заметный как в экспериментах без добавления КОН, результаты которых представлены в работе [18]. У смесей с постоянным рН (рис. 4б) с увеличением концентраций H_3BO_3 и КОН поверхностное натяжение изменяется в пределах погрешности прибора. Во всех случаях наблюдается явная температурная зависимость величины поверхностного натяжения, которая хорошо коррелирует с литературными данными.

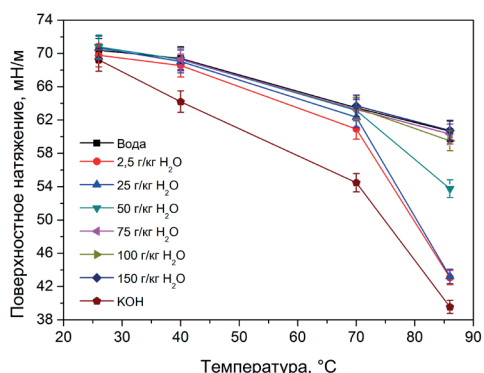


Рис. 5. Зависимость поверхностного натяжения водных растворов борной кислоты от температуры: смесь H_3BO_3 и КОН, рН = var и КОН с С = 8 г/кг H_2O

мере роста концентрации кислоты в растворе влияние КОН снижается и, в конечном счете, практически исчезает. Этим объясняется резкое снижение поверхностного натяжения (см. рис. 4а), которое наблюдается при повышении температуры раствора и низкой концентрации борной кислоты в нем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» было проведено экспериментальное исследование теплофизических свойств водных растворов борной кислоты с корректирующей добавкой гидроксида калия, используемого для поддержания водно-химического режима ВВЭР.

Плотность растворов H_3BO_3 была измерена в диапазоне концентраций 2,5–150 г/кг H_2O , вязкость 2,5–100 г/кг H_2O , поверхностное натяжение

2,5–150 г/кг H₂O. На основании обработки экспериментальных данных получены зависимости для определения плотности и кинематической вязкости водных растворов борной кислоты с постоянной корректирующей добавкой гидроксида калия (8 г/кг H₂O).

Результаты исследований позволяют расширить диапазон известных параметров водных растворов борной кислоты. Полученные экспериментальные данные имеют важное прикладное значение для АЭС с ВВЭР нового поколения и могут быть использованы для уточнения результатов расчетов аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР при работе комплекса пассивных систем безопасности.

Литература

1. Morozov A.V., Remizov O.V. An experimental substantiation of the design functions imposed on the additional system for passively flooding the core of a VVER reactor. // *Thermal Engineering*. – 2012. – Vol. 59. – PP. 365–370. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601512050096>
2. Морозов А.В., Сорокин А.П., Рагулин С.В., Путьк А.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шленкин А.С. Влияние процессов массопереноса борной кислоты на ее накопление в активной зоне при аварийных режимах АЭС с ВВЭР. // *Теплоэнергетика*. – 2017. – № 7. – С. 33–38.
3. Abdulagatov I.M., Azizov N.D. Densities and Apparent Molar Volumes of Aqueous H₃BO₃ Solutions at Temperatures from 296 to 573 K and at Pressures up to 48 MPa. // *Journal of Solution Chemistry*. – 2004. – Vol. – 33. – Iss. 10. – PP. 1305–1331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10953-004-7142-2>
4. Alavia W., Lovera J.A., Cortez B.A., Graber T.A. Solubility, Density, Refractive Index, Viscosity, and Electrical Conductivity of Boric Acid + Lithium Sulfate + Water System at (293.15, 298.15, 303.15, 308.15 and 313.15) K. // *Journal of Chemical and Engineering Data*. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 6. – PP. 1668–1674. DOI: <https://doi.org/10.1021/jc400086a>
5. Byers W.A., Brown W.L., Kellerman B.E., Shearer K.S., Fink D.J. Summary of Tests to Determine the Physical Properties of Buffered and Un-buffered Boric Acid Solutions. WCAP-17021-NP. Revision 1. – Westinghouse Electric Company, 2010. – 46 p. Электронный ресурс: <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11220A169.pdf> (дата доступа 12.01.2024).
6. Santarao K., Prasad C.L.V.R.S.V., Swami Naidu G. Experimental investigation to study the viscosity and dispersion of conductive and non-conductive nanopowders' blended dielectrics. // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2017. – Vol. 11. – Iss. 1. – PP. 154–160. DOI: 10.12913/22998624/68463
7. Hassan Y.A., Osturk S., Lee S. Rheological characterization of buffered boric acid aqueous solutions in light water reactors. // *Progress in Nuclear Energy*. – 2015. – Vol. 85. – PP. 239–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.06.025>
8. Arias F.J. Boron dilution effect on boiling heat transfer with special reference to nuclear reactors technology. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2009. – Vol. 36. – Iss. 9. – PP. 1382–1385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.06.018>
9. Nakath R., Schuster Ch., Hurtado A. Bubble size distribution in flow boiling of aqueous boric acid under high pressure. // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – Vol. 262. – PP. 562–570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.06.006>
10. Стырикович М.А., Цхвирашвили Д.Г., Небиеридзе Д.П. Исследование растворимости борной кислоты в насыщенном водяном паре // *Доклады АН СССР*. – 1960. – Т. 134. – № 3. – С. 615–617.
11. Цхвирашвили Д.Г., Галусташвили В.В. Поведение боратов и борной кислоты в кипящих реакторах. // *Атомная энергия*. – 1964. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 65–67.
12. Böhlke S., Schuster C., Hurtado A. About the volatility of boron in aqueous solutions of borates with vapour in relevance to BWR-Reactors / *Proc. of International Conference on the Physics of Reactors, Interlaken, Sep. 14–19, 2008*. – Vol. 4. – PP. 3089–3096.

13. *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. – 1994. – Vol. 148. – Iss. 2–3. – PP. 217–231. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90111-2](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90111-2)
14. *Питык А.В., Морозов А.В., Шлепкин А.С., Сахипгареев А.Р.* Экспериментальное исследование растворимости борной кислоты в кипящем паре при атмосферном давлении // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.26583/ipe.2019.1.03>
15. *Морозов А.В., Шлепкин А.С., Сахипгареев А.Р.* Экспериментальное моделирование процесса кристаллизации борной кислоты при аварийном охлаждении активной зоны АЭС с ВВЭР. / Сборник тезисов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXV Сибирский теплофизический семинар». – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2019. – С. 223.
16. *Морозов А.В., Питык А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С.* Теплофизические свойства водных растворов борной кислоты в широком диапазоне концентраций // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 3. – С. 102–114.
17. *Сахипгареев А.Р., Морозов А.В.* Исследование теплофизических и физико-химических свойств растворов борной кислоты применительно к аварийному охлаждению активной зоны ВВЭР / Тезисы докладов IV Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2019. – С. 202.
18. *Sakhipgareev A.R., Shlepkin A.S., Morozov A.V.* Experimental study of the surface tension of highly concentrated boric acid solutions applicable to VVER emergency cooling. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. Vol. 1675. – 012097. DOI: [10.1088/1742-6596/1675/1/012097](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012097)
19. *Морозов А.В., Питык А.В., Рагулин С.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С.* Оценка влияния капельного уноса борной кислоты на ее накопление в реакторе ВВЭР в случае аварии. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.26583/ipe.2017.4.07>

Поступила в редакцию 12.04.2024

Авторы

Лебезов Андрей Александрович, генеральный директор,

E-mail: AALebezov@rosatom.ru

Морозов Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник – теплофизик, д.т.н.,

E-mail: avmorozov@ippe.ru

Сахипгареев Азамат Радикович, младший научный сотрудник – теплогидравлик,

E-mail: asakhipgareev@ippe.ru

Сошкина Александра Сергеевна, младший научный сотрудник,

E-mail: sas@ippe.ru

Шлепкин Александр Сергеевич, младший научный сотрудник – теплофизик,

E-mail: ashlepkin@ippe.ru

UDC 621.039.58:532.77

Experimental Research of the Properties of Concentrated Solutions of Boric Acid in Application to Cooling of VVER Reactors

Lebezov A.A., Morozov A.V., Sakhigareev A.R., Soshkina A.S., Shlepkina A.S.

IPPE JSC,

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

Abstract

The article presents the results of an experimental study of the thermophysical properties of aqueous solutions of boric acid with the addition of potassium hydroxide added to the VVER coolant as a corrective additive to maintain the required pH value of the primary circuit medium.

The parameters were measured at pressure $P=0.1$ MPa in the temperature range 25–90°C in the following ranges of H_3BO_3 concentrations in solutions: density – 2.5–230 g/kg H_2O , viscosity – 2.5–100 g/kg H_2O , surface tension – 2.5–150 g/kg H_2O . Such a high concentration of boric acid is achieved in the VVER core in the event of large break loss of coolant accident and simultaneous failure of emergency power supplies. At the same time, cooling of the core is ensured through the operation of passive safety systems, which must ensure the supply of a boric acid solution with a concentration of 16–20 g/kg into the core.

The main experimental equipment and research methodology are described. The dependences of thermophysical properties of solutions on the concentration of boric acid in them based on the processing of experimental data were obtained. Peculiarities of changes in the surface tension of H_3BO_3 with changes in the concentration and increase in temperature of a solution of boric acid with a corrective addition of potassium hydroxide have been revealed.

The results of the conducted research make it possible to expand the range of known properties of aqueous solutions of boric acid and are of great practical importance for nuclear power plants with new generation VVER reactors. The experimental data obtained can be used to clarify the results of calculations of emergency processes in a VVER reactor plant during the operation of a complex of passive safety systems, including a passive core flooding system, a passive heat removal system from the steam generator, and a system of third-stage hydraulic accumulators.

Keywords: VVER, boric acid, emergency modes, thermophysical properties, passive safety systems.

For citation: Lebezov A.A., Morozov A.V., Sakhigareev A.R., Soshkina A.S., Shlepkina A.S. Experimental Research of the Properties of Concentrated Solutions of Boric Acid in Application to Cooling of VVER Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 2, pp. 19–29; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.02> (in Russian).

References

1. Morozov A.V., Remizov O.V. An experimental substantiation of the design functions imposed on the additional system for passively flooding the core of a VVER reactor. *Thermal Engineering*. 2012, vol. 59, pp. 365–370. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601512050096>
2. Morozov A.V., Sorokin A.P., Ragulin S.V., Pityk A.V., Sahigareev A.R., Soshkina A.S., Shlepkina A.S. Influence of boric acid mass transfer processes on its accumulation in the core during emergency conditions of NPPs with VVER. *Teploenergetika*. 2017, no. 7, pp. 33–38 (in Russian).

3. Abdulagatov I.M., Azizov N.D. Densities and Apparent Molar Volumes of Aqueous H₃BO₃ Solutions at Temperatures from 296 to 573 K and at Pressures up to 48 MPa. *Journal of Solution Chemistry*. 2004, v. 33, iss. 10, pp. 1305–1331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10953-004-7142-2>
4. Alavia W., Lovera J.A., Cortez B.A., Graber T.A. Solubility, Density, Refractive Index, Viscosity, and Electrical Conductivity of Boric Acid + Lithium Sulfate + Water System at (293.15, 298.15, 303.15, 308.15 and 313.15) K. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2013, v.58, iss. 6, pp. 1668–1674. DOI: <https://doi.org/10.1021/je400086a>
5. Byers W.A., Brown W.L., Kellerman B.E., Shearer K.S., Fink D.J. Summary of Tests to Determine the Physical Properties of Buffered and Un-buffered Boric Acid Solutions. WCAP-17021-NP. Revision 1. Westinghouse Electric Company, 2010, 46 p. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11220A169.pdf> (accessed Jan. 12, 2024).
6. Santarao K., Prasad C.L.V.R.S.V., Swami Naidu G. Experimental investigation to study the viscosity and dispersion of conductive and non-conductive nanopowders' blended dielectrics. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2017, v. 11, iss. 1, pp. 154–160. DOI: 10.12913/22998624/68463
7. Hassan Y.A., Osturk S., Lee S. Rheological characterization of buffered boric acid aqueous solutions in light water reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2015, v. 85, pp. 239–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.06.025>
8. Arias F.J. Boron dilution effect on boiling heat transfer with special reference to nuclear reactors technology. *Annals of Nuclear Energy*. 2009, v. 36, iss. 9, pp. 1382–1385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.06.018>
9. Nakath R., Schuster Ch., Hurtado A. Bubble size distribution in flow boiling of aqueous boric acid under high pressure. *Nuclear Engineering and Design*. 2013, v. 262, pp. 562-570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.06.006>
10. Styrikovich M.A., Tshvirashvili D.G., Nebieridze D.P. Study of the solubility of boric acid in saturated water vapor. *Dokl. AN USSR*. 1960, v. 134, no. 3, pp. 615–617 (in Russian).
11. Tshvirashvili D.G., Galustashvili V.V. Behavior of borates and boric acid in boiling water reactors. *Atomnaya energiya*. 1964, v. 16, iss. 1, pp. 65–67 (in Russian).
12. Böhlkea S., Schustera C., Hurtado A. About the volatility of boron in aqueous solutions of borates with vapour in relevance to BWR-Reactors. *Proc. of International Conference on the Physics of Reactors, Interlaken, Sep. 14-19, 2008*, vol. 4, pp. 3089–3096.
13. 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*. 1994, v. 148, iss. 2-3, pp. 217–231. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90111-2](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90111-2)
14. Pityk A.V., Morozov A.V., Shlepkin A.S., Sahipgareev A.R. Experimental study of the solubility of boric acid in boiling steam at atmospheric pressure. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 1, pp. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.03> (in Russian).
15. Morozov A.V., Shlepkin A.S., Sahipgareev A.R. Experimental modeling of the crystallization process of boric acid during emergency cooling of the core of a nuclear power plant with VVER. *Proc. of the All-Russian Conference with Elements of a Scientific School for Young Scientists «XXXV Siberian Thermophysical Seminar»*. Novosibirsk. IT SB RAS Publ., 2019, p. 223 (in Russian).
16. Morozov A.V., Pityk A.V., Sahipgareev A.R., Shlepkin A.S. Thermophysical properties of aqueous solutions of boric acid in a wide range of concentrations. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear Reactor Constants*. 2018, no. 3, pp. 102–114 (in Russian).
17. Sahipgareev A.R., Morozov A.V. Study of the thermophysical and physicochemical properties of boric acid solutions in relation to emergency cooling of the VVER core. *Proc. of the IV All-Russian Scientific Conference with Elements of a School of Young Scientists «Thermophysics and physical hydrodynamics»*. Novosibirsk. IT SB RAS Publ., 2019, p. 202 (in Russian).

18. Sakhipgareev A.S., Shlepkin A.S., Morozov A.V. Experimental study of the surface tension of highly concentrated boric acid solutions applicable to VVER emergency cooling. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, Vol. 1675, 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012097

19. Morozov A.V., Pityk A.V., Ragulin S.V., Sahipgareev A.R., Soshkina A.S., Shlepkin A.S. Estimation of influence of boric acid drop entrainment to its accumulation in the WWER reactor in the case of accident. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 4, pp. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.4.07> (in Russian).

Authors

Andrej A. Lebezov, Director General,

E-mail: AALebezov@rosatom.ru

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

E-mail: avmorozov@ippe.ru

Azamat R. Sakhipgareev, Junior Researcher,

E-mail: asakhipgareev@ippe.ru

Aleksandra S. Soshkina, Junior Researcher,

E-mail: sas@ippe.ru

Alexander S. Shlepkin, Junior Researcher,

E-mail: ashlepkin@ippe.ru