

УДК 621.039.58

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ ОХЛАЖДЕННЫХ ПРОБ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС С ВВЭР

Шарафутдинов Р.Б., к.т.н., Харитонов Н.Л., к.т.н. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Выполнена расчетная оценка влияния концентраций борной кислоты, щелочных металлов (калия) и аммиака на величину удельной электропроводимости водных растворов, моделирующих состав теплоносителя первого контура АЭС с ВВЭР. Показано, что оценка взаимной согласованности данных по измерению удельной электропроводимости и водородного показателя  $pH_{25}$  может оказаться полезной для определения наличия загрязняющего соединения в теплоносителе.

► **Ключевые слова:** атомная электрическая станция, ВВЭР, теплоноситель.

## ESTIMATED TOTAL CONDUCTIVITY IN SAMPLES OF PRIMARY COOLANT FOR CONDITIONS OF WWER

Sharafutdinov R.B., Ph.D., Kharitonova N.L., Ph.D. (SEC NRS)

The influence of boric acid, alkali metal (potassium) and ammonia concentrations on the total conductivity of aqueous solutions simulating the composition of the WWER primary coolant is considered. It is shown that the evaluation of the mutual consistency of total conductivity and  $pH_{25}$  measurement data may be useful for determining of polluting compounds presence in the primary coolant.

► **Key words:** Nuclear Power Plant, WWER, primary coolant.

В первом контуре АЭС с ВВЭР при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности применяется слабощелочной восстановительный аммиачно-калиевый водно-химический режим с борной кислотой, регламентируемый стандартами эксплуатирующей организации [1,2,3]. Эти стандарты устанавливают способ коррекционной обработки теплоносителя, нормы качества теплоносителя, подпиточной воды, воды бассейнов выдержки и перегрузки топлива, растворов систем безопасности энергоблока. Все параметры качества теплоносителя и технологических сред систем безопасности, в зависимости от их влияния на безопасность работы реактора, подразделяются на два типа: нормируемые показатели и диагностические показатели. К нормируемым показателям отнесены величины загрязнений теплоносителя и рабочих сред систем, важных для безопасности, при которых обеспечивается проектный ресурс эксплуатации оборудования и трубопроводов. При работе энергоблока на энергетических уровнях мощности такими показателями являются суммарная концентрация щелочных металлов, в зависимости от текущей концентрации борной кислоты, концентрация растворенного водорода, концентрация растворенного кислорода, концентрация хлоридов, то есть показатели качества теплоносителя первого контура и технологических сред систем безопасности, непосредственно влияющие на безопасность реакторной установки и снижающие проектный ресурс эксплуатации. Диагностические показатели информируют о правильности ведения водно-химического режима и предназначены для обеспечения получения дополнительной информации о причинах изменения нормируемых показателей или ухудшения водно-химического режима. Отклонения диагностических показателей от контролируемых уровней указывают на нарушения в работе технологических систем обеспечения водно-химического режима, которые при длительном воздействии могут привести к повреждениям топливных кассет активной зоны реактора. К диагностическим показателям при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности отнесены: величина водородного показателя  $pH_{25}$ , концентрации аммиака, железа, меди, фторидов и нитратов.

В настоящее время рассматривается возможность включения в список диагностических показателей водно-химического режима первого контура действующих и вновь проектируемых АЭС с ВВЭР такого интегрального показателя, характеризующего ионный состав теплоносителя первого кон-

тура, как удельная электропроводимость. В данной работе выполнена расчетная оценка влияния концентраций борной кислоты, щелочных металлов (калия) и аммиака на величину удельной электропроводимости водных растворов, моделирующих состав теплоносителя первого контура АЭС с ВВЭР. Расчеты выполнены для условий охлажденной пробы, то есть для температуры 25 °С.

Для расчета электропроводимости многокомпонентных водных растворов использовалось правило аддитивности, согласно которому эквивалентная электрическая проводимость раствора определяется суммой электропроводимостей ионов, присутствующих в растворе. Удельная электропроводимость многокомпонентного раствора при температуре 25 °С, выраженная в микроСименсах на сантиметр (мкСм/см), рассчитывается в зависимости от концентрации и эквивалентной электрической проводимости следующим образом:

$$\chi_{\text{сум}} = \sum \lambda_i \cdot C_i \cdot 1000, \quad (1)$$

где:

$\chi_{\text{сум}}$  – удельная электропроводимость многокомпонентного раствора при температуре 25 °С, выраженная в мкСм/см;

$\lambda_i$  – эквивалентная электропроводимость (электролитическая подвижность)  $i$ -ого иона, выраженная в  $\text{См} \cdot \text{см}^2 / \text{г} \cdot \text{экв}$  ( $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 / \text{г} \cdot \text{экв}$ );

$C_i$  – равновесная концентрация  $i$ -ого иона, г-экв/л.

Чтобы рассчитать величину удельной электропроводимости многокомпонентного раствора необходимо знать эквивалентную электропроводимость (электролитическую подвижность) ионов и равновесные концентрации ионов, присутствующих в этом многокомпонентном растворе. Состав водных растворов, моделирующих теплоноситель первого контура, определяется, в первую очередь, присутствием соединений борной кислоты, щелочных металлов (калия, натрия, лития) и аммиака.

Значения эквивалентной электропроводимости (подвижности) анионов и катионов в водном растворе при температуре 25 °С, принятые для расчета, приведены в таблице 1. Как следует из данных этой таблицы, значения электролитической подвижности ионов водорода ( $\text{H}^+$ ) и гидроксидов ( $\text{OH}^-$ ) в среднем в 3...8 раз превосходят близкие между собой значения подвижности других ионов. Поэтому именно эти ионы оказывают решающее значение на величину удельной электропроводимости раствора. Определение

равновесных концентраций ионов в растворах, содержащих борную кислоту, ионы калия, то есть моделирующих состав теплоносителя первого контура, велось расчетным методом, изложенным в [5].

Диссоциация борной кислоты происходит с образованием полиборатных комплексов  $V(OH)_3^o$ ,  $V(OH)_4^-$ ,  $V_3(OH)_{10}^-$ ,  $V_2(OH)_7^-$ ,  $V_4(OH)_{14}^{2-}$ , образующихся в соответствии с уравнениями химических реакций [5, 6]:



Основными уравнениями для расчета являлись:

– уравнение баланса (суммарной концентрации бора в растворе):

$$[V] = [V(OH)_3^o] + [V(OH)_4^-] + 2 [V_2(OH)_7^-] + 3 [V_3(OH)_{10}^-] + 4 [V_4(OH)_{14}^{2-}];$$

– уравнение электронейтральности раствора:

$$[OH^-] + [V(OH)_4^-] + [V_2(OH)_7^-] + [V_3(OH)_{10}^-] + 2 [V_4(OH)_{14}^{2-}] = [H^+] + [K^+],$$

где [...] – концентрация соответствующего иона в растворе.

Неидеальность свойств раствора, то есть учет межмолекулярных и межмолекулярных взаимодействий, учитывалась путем введения коэффициентов активности, зависящих от ионной силы раствора:

$$I = 0,5 \sum C_i Z_i^2,$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -ого иона;  $Z_i$  – заряд  $i$ -ого иона.

Для определения равновесия между борной кислотой и боратными ионами в водном растворе использовались данные работы [6], в которой экспериментально была определена зависимость концентрационной доли констант диссоциации борной кислоты от ионной силы раствора:

$$[V(OH)_4^-] = Q_{11} [V(OH)_3^o] \cdot [OH^-];$$

$$[V_2(OH)_7^-] = Q_{21} [V(OH)_3^o]^2 \cdot [OH^-];$$

$$[V_3(OH)_{10}^-] = Q_{31} [V(OH)_3^o]^3 \cdot [OH^-];$$

$$[V_4(OH)_{14}^{2-}] = Q_{42} [V(OH)_3^o]^4 \cdot [OH^-].$$

Подробное описание принятого метода расчета и исходных термодинамических данных приведено в [5].

Значения эквивалентной электропроводимости полиборатных соединений приняты по оценкам [7]:

$$40 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{экв}^{-1} \text{ – для } V(OH)_4^-;$$

$$27 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{экв}^{-1} \text{ – для } V_3(OH)_{10}^-.$$

Результаты расчетов величины удельной электропроводимости водного раствора, содержащего борную кислоту и КОН, при температуре 25 °С, в зависимости от концентрации борной кислоты для концентраций калия от 0,1 до 0,5 ммол/кг, приведены на рис. 1. Из приведенных расчетных данных следует, что для растворов борной кислоты, не содержащих гидроокиси калия (кривая 1 на рис. 1), удельная электропроводимость раствора увеличивается с ростом концентрации борной кислоты. Присутствие в системе щелочи КОН приводит к повышению удельной электропроводимости раствора: кривые 2, 3, 4 и 5 на рис. 1 лежат выше кривой 1, а также к изменению характера зависимости электропроводимости от концентрации борной кислоты. Увеличение концентрации гидроокиси калия в растворе при неизменной концентрации борной кислоты приводит к росту удельной электропроводимости. В диапазоне концентрации борной кислоты от ~0,150 г/кг до ~16 г/кг рост концентрации  $V(OH)_3$  при неизменной концентрации КОН практически не оказывает влияния на величину удельной электропроводимости раствора.

В области низких концентраций борной кислоты уменьшение ее концентрации приводит к резкому росту удельной электропроводимости. Такой характер зависимости объясняется следующим. Удельная электропроводимость водного раствора КОН в отсутствие борной кислоты определяется электролитическими подвижностями ионов гидроксидов  $OH^-$  и калия  $K^+$ .

Эквивалентная электропроводимость иона гидроксидов ( $198,3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{экв}^{-1}$ ) приблизительно в три раза превосходит эквивалентную электропроводимость иона калия ( $73,5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{экв}^{-1}$ ) и в пять раз превосходит эквивалентную электропроводимость  $V(OH)_4^-$  ( $40 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{экв}^{-1}$ ).

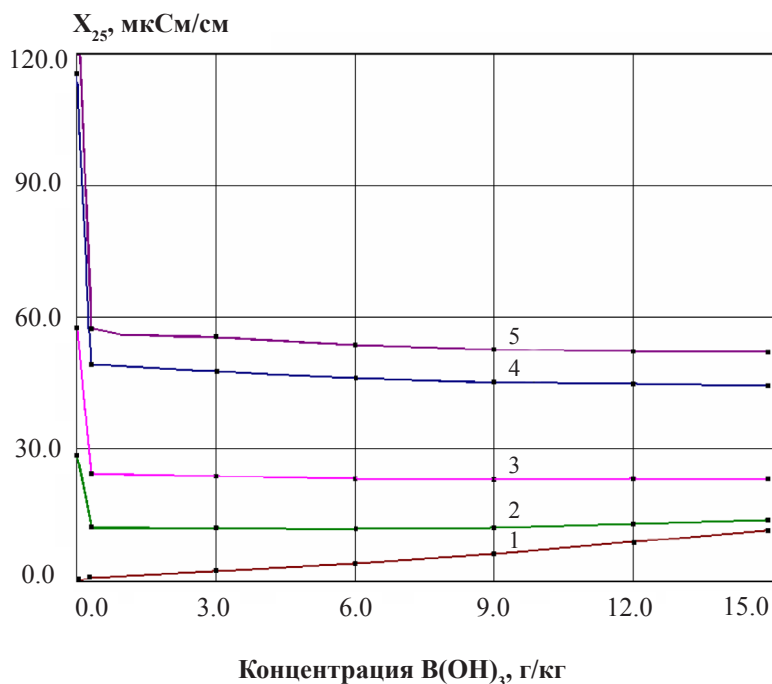


Рис. 1. Расчетные значения удельной электропроводности водных растворов, содержащих борную кислоту и KOH, для температуры 25 °С:

1 – чистая борная кислота; 2 – концентрация калия 0,1 ммол/кг; 3 – концентрация калия 0,2 ммол/кг; 4 – концентрация калия 0,4 ммол/кг; 5 – концентрация калия 0,5 ммол/кг

При использовании метода [5] в данной работе было рассчитано влияние концентрации борной кислоты на значения водородного показателя рН<sub>25</sub> растворов в присутствии гидроокиси калия. Результаты расчетов значений рН<sub>25</sub> в области концентраций борной кислоты до 16 г/кг при различных концентрациях калия приве-

дены на рис. 2. Расчетные данные по водородному показателю рН<sub>25</sub> достаточно хорошо объясняют характер зависимости удельной электропроводности от концентрации борной кислоты. Область резкого снижения величин водородного показателя рН<sub>25</sub> совпадает с зоной снижения удельной электропроводности растворов борной кислоты.

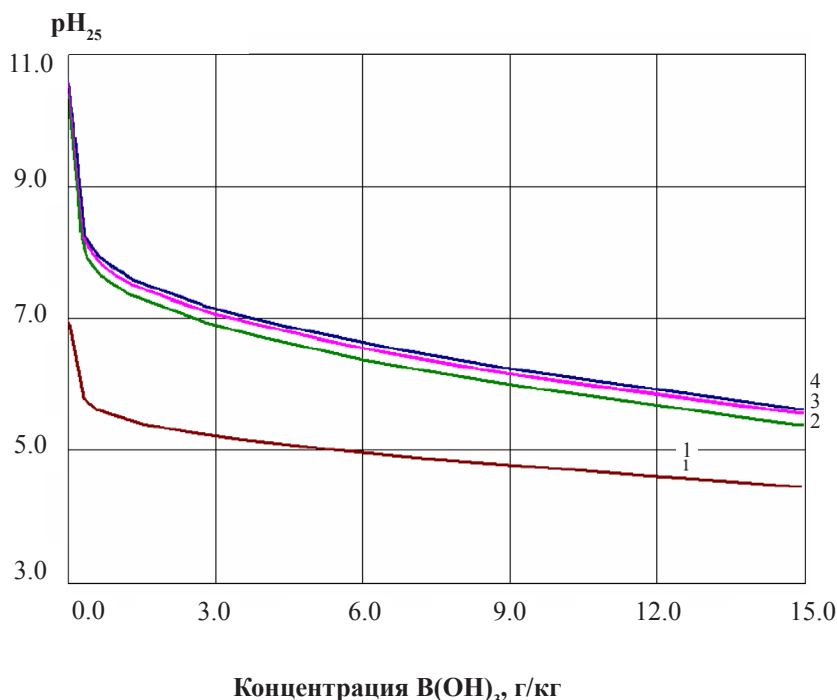


Рис. 2. Расчетные значения водородного показателя рН<sub>25</sub>

водного раствора при 25 °С, содержащего борную кислоту и гидроокись калия: 1 – чистая борная кислота; 2 – концентрация калия 0,3 ммол/кг; 3 – концентрация калия 0,4 ммол/кг; 4 – концентрация калия 0,5 ммол/кг



В теплоносителе первого контура энергоблоков АЭС с ВВЭР, наряду с калием, присутствует натрий, который является примесью гидроксида калия, и литий, который образуется в активной зоне из бора по реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ . Опыт эксплуатации АЭС с ВВЭР показывает, что концентрация лития растет в ходе топливной кампании, достигает своего максимума (до 0,6...0,8 или даже до 1.0 мг/кг) где-то в середине кампании, а затем снижается до ~0,05 мг/кг к концу кампании [8]. Концентрация натрия падает при снижении концентрации калия

в теплоносителе в среднем с ~350 до ~30 мкг/кг. Значения эквивалентной электропроводимости (подвижности) ионов калия, натрия и лития отличаются между собой и составляют, соответственно, 73,5, 50,1 и 38,6  $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^2\cdot\text{экв}^{-1}$  (таблица 1). Ионы калия имеют максимальную среди этих трех катионов подвижность, поэтому результаты расчета для условий, когда электропроводимость обусловлена присутствием только ионов калия, могут несколько превышать значения удельной электропроводимости в присутствии лития и натрия.

Таблица 1

**Эквивалентная электропроводимость (подвижность) некоторых анионов и катионов в водном растворе при температуре 25 °С по данным [4]**

Анионы	Предельное значение эквивалентной проводимости, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^2\cdot\text{экв}^{-1}$	Катионы	Предельное значение эквивалентной проводимости, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^2\cdot\text{экв}^{-1}$
$\text{OH}^-$	198,3	$\text{H}^+$	349,8
$\text{F}^-$	55,4	$\text{Li}^+$	38,6
$\text{Cl}^-$	76,3	$\text{Na}^+$	50,1
$\text{Br}^-$	78,1	$\text{NH}_4^+$	73,5
$\text{I}^-$	76,8	$\text{K}^+$	73,5
$\text{NO}_3^-$	71,4	$\text{Mg}^{2+}$	53,0
$\text{SO}_4^{2-}$	80	$\text{Ca}^{2+}$	59,5

Полученные в данной работе расчетные данные хорошо согласуются с результатами расчетов, выполненных специалистами американского института Electric Power Research Institute (EPRI) для системы борная кислота – гидроксид лития с помощью аттестованного к применению регулирующим органом США программного средства ChemWORKS™ [7]. Результаты расчетов [7], показывающие влияние концентраций борной кислоты и лития на значение удельной электропроводимости при температуре 25 °С, приведены на рис. 3. Полученный в данном расчете характер зависимости удельной электропроводимости от концентраций борной кислоты и щелочи полностью совпадает с результатами расчетов американских специалистов. Численные значения электропроводимости растворов  $\text{B}(\text{OH})_3$  – КОН превышают значения электропроводимости растворов  $\text{B}(\text{OH})_3$  – LiOH, что объясняется различными значениями подвижностей ионов калия и лития, составляющих, соответственно 73,5 и 38,6  $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^2\cdot\text{экв}^{-1}$  (таблица 1). Поэтому электропроводимость водных растворов борной кислоты в присутствии ионов калия будет выше, чем в присутствии ионов лития.

Еще одним соединением, которое присутствует в теплоносителе первого контура энергоблоков АЭС с ВВЭР и может оказывать значительное влияние на величину удельной электропроводимости, является аммиак. Аммиак дозируют в теплоноситель первого контура с целью образования и накопления водорода, обеспечивающего подавление окислительных продуктов радиолитического разложения аммиака протекает в теплоносителе контура под воздействием потока ионизирующего излучения активной зоны. При работе энергоблока на энергетических уровнях мощности верхняя граница концентрации аммиака определяется индивидуально в процессе эксплуатации энергоблока. Нижняя граница концентрации аммиака определяется величиной 3 мг/дм<sup>3</sup> [1 – 3]. Это обеспечивает минимальную нормируемую концентрацию водорода в теплоносителе. При работе реакторной установки на мощности поддерживается концентрация аммиака на уровне до 15 – 19 мг/дм<sup>3</sup>. В процессе пуска энергоблока необходимо создать концентрацию водорода, соответствующую нормируемой при работе на мощности. Рост концентрации водорода происходит вследствие радиолитического

аммиака и пропорционален концентрации аммиака и мощности энергоблока. Для достижения нормируемой концентрации водорода требуется некоторое время, поэтому для более быстрого выхода на нормируемую концентрацию водорода целесообразно перед выходом на энергетические уровни мощности создать в теплоносителе более высокую начальную концентрацию аммиака. С учетом запаса на возможные отклонения нормируемая начальная концентрация аммиака перед пуском должна быть

не менее  $35 \text{ мг/дм}^3$  [1]. Для поддержания концентрации водорода в нормируемых пределах вместо аммиака стандарты [2, 3] допускают дозирование гидразин-гидрата (основываясь на опыте эксплуатации с 1980 г. четырех энергоблоков Кольской АЭС). При поддержании концентрации гидразин-гидрата на уровне  $35 \pm 5 \text{ мкг/кг}$  концентрация аммиака в теплоносителе первого контура достигает  $40 - 60 \text{ мкг/кг}$  [9].

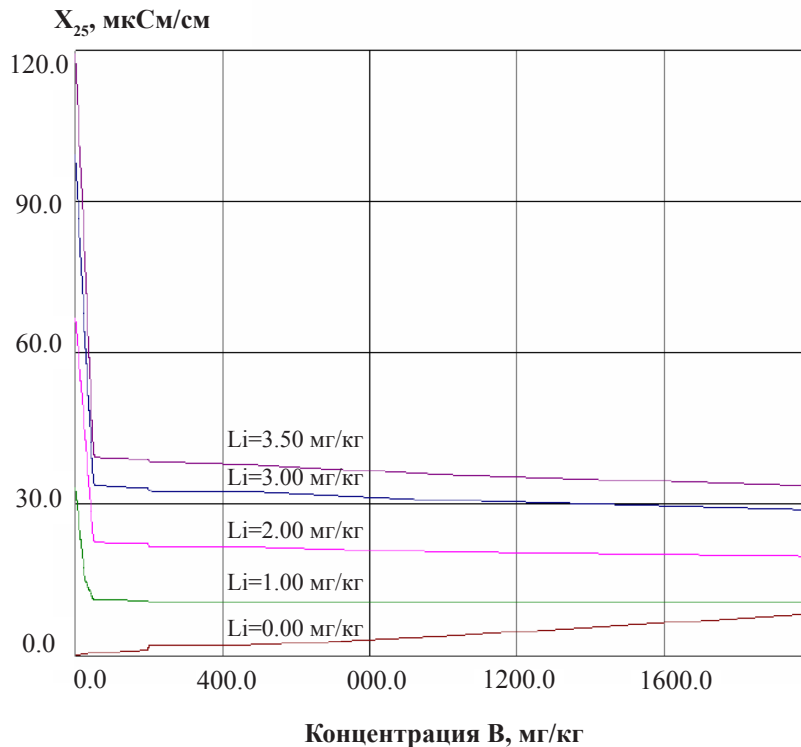


Рис. 3. Расчет удельной электропроводимости водных растворов борная кислота – гидроокись лития при  $25^\circ\text{C}$  по данным [7], выполненный с помощью программы EPRI ChemWORKS™

Расчетные значения зависимости удельной электропроводимости от концентрации аммиака при электролитической подвижности иона  $\text{NH}_4^+$ , равной  $73,5 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^2\cdot\text{экв}^{-1}$  (таблица 1), показаны на рис. 4. Полученные результаты показывают, что присутствие аммиака в теплоносителе оказывает сильное влияние на величину удельной электропроводимости. Например, присутствие аммиака в концентрации около  $20 \text{ мг/кг}$ , что отвечает концентрации аммиака в теплоносителе при работе реакторной установки на мощности, увеличивает удельную электропроводимость на  $40 \text{ мкСм/см}$ . Нормируемая начальная концентрация аммиака перед пуском энергоблока, равная  $35 \text{ мг/дм}^3$ , обуславливает рост электропроводимости до  $60 \text{ мкСм/см}$ . При этом аммиак, являясь слабым основанием, не оказывает решающего влияния на кислотно-щелочные свойства теплоносителя при высоких темпе-

ратурах, которые определяются соотношениями концентраций борной кислоты и суммы щелочных металлов.

Показатель удельной электропроводимости является интегральным показателем, характеризующим суммарную концентрацию катионов и анионов в теплоносителе. Для условий теплоносителя первого контура энергоблоков ВВЭР удельная электропроводимость определяется, в первую очередь, ионами гидроксила, аммиака, щелочных металлов (калия, натрия, лития) и в значительно меньшей степени соединениями борной кислоты.

В нормах водно-химического режима первого контура некоторых энергокомпаний мира предусмотрен контроль величины удельной электропроводимости. Например, в американских нормах качества теплоносителя реакторов типа PWR [7] предусмотрен контроль в теплоносителе величины

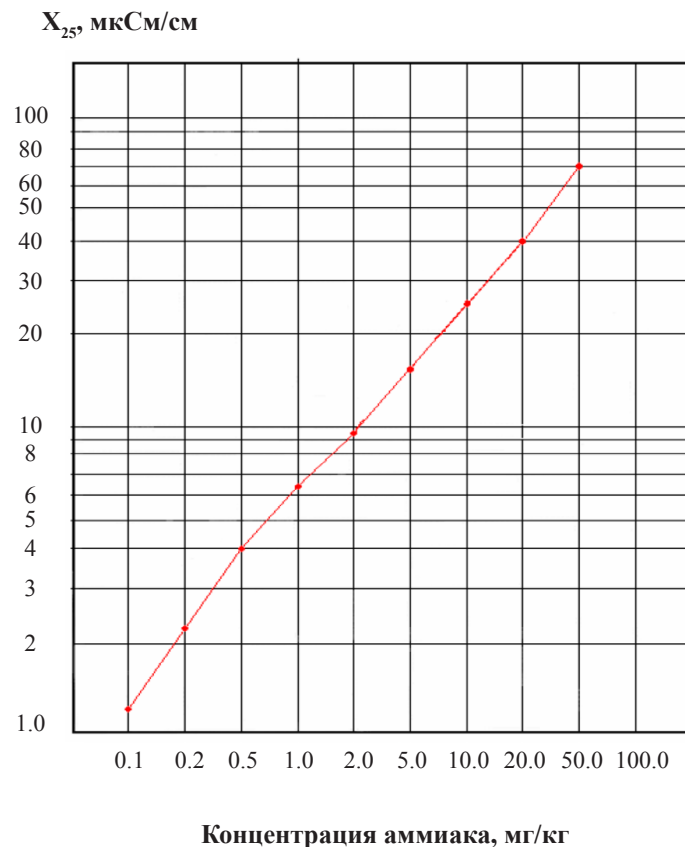


Рис. 4. Влияние концентрации аммиака на значение удельной электропроводимости водных растворов, содержащих аммиак, при 25 °С

водородного показателя  $pH_{25}$  и удельной электропроводимости. По мнению специалистов EPRI именно согласованность измеренных данных значений водородного показателя  $pH_{25}$  и удельной электропроводимости в охлажденных пробах теплоносителя (при 25 °С), в зависимости от концентраций борной кислоты и щелочных металлов, может использоваться в качестве индикатора присутствия загрязняющих примесей в теплоносителе. Влияние на удельную электропроводимость ионов-примесей теплоносителя (хлоридов, фторидов, сульфатов и т.д.) является незначительным, если концентрации этих примесей находятся в допустимом диапазоне. Например, для раствора, содержащего 0,21 ммол/кг калия и 2,0 г/кг  $V(OH)_3$ , рост электропроводимости за счет присутствия дополнительных 0,15 мг/кг  $Cl^-$  и 0,15 мг/кг  $F^-$  будет составлять не более 0,3 мкСм/см. Такое расхождение лежит в области допустимой ошибки измерения.

Для условий водно-химического режима западных реакторов типа PWR, в которых для подавления радиолитического не используется аммиак, при отсутствии значительного загрязнения теплоносителя первого контура примесными ионами существует относительно строгая зависимость между водородным показателем  $pH_{25}$ , удельной электропроводимостью и концентрациями борной кислоты и лития при

температуре 25 °С. Соотношение значений удельной электропроводимости – водородный показатель  $pH_{25}$  относительно концентраций лития и бора может быть использовано для проверки внутренней согласованности полученных данных химического контроля. Специалистами EPRI [7] предлагается следующий подход к оценке данных по измерению электропроводимости: если измеренное значение водородного показателя  $pH_{25}$  отличается от расчетного более чем на 0,1 единицы или если электропроводимость отличается от оценочного расчетного значения более чем на 10%, можно сделать один из двух следующих выводов.

1) Имеет место ошибка измерения одного или обоих параметров. В этом случае анализ графиков трендов каждого из измеряемых параметров позволяет определить параметр, для которого имеет место ошибка измерения.

2) Если допустить, что результаты измерения являются правильными, в теплоносителе находится примесное соединение. Таким соединением может быть нейтральная соль (например хлорид натрия), присутствие которой приведет к росту удельной электропроводимости, но не окажет влияния на величину водородного показателя  $pH_{25}$ . Присутствие примеси в форме сильного основания приведет к одновременному росту электропроводимости и

величины водородного показателя  $pH_{25}$ . Попадание в теплоноситель примеси в форме сильной кислоты приведет к росту удельной электропроводимости, но одновременно будет иметь место снижение величины  $pH_{25}$ . Если измеренное значение удельной электропроводимости будет меньше расчетного значения, следует ожидать наличие ошибки измерения.

Как отмечено выше, проверка взаимной согласованности данных измерения удельной электропроводимости и водородного показателя  $pH_{25}$  может оказаться полезной для определения наличия загрязняющего соединения в теплоносителе. Анализ типа расхождения позволяет выявить природу этого загрязняющего соединения.

### Выводы

1. Многокомпонентный состав теплоносителя при ведении слабощелочного восстановительного аммиачно-калиевого водно-химического режима с борной кислотой усложняет интерпретацию результатов измерения показателей  $pH_{25}$  и удельной электропроводимости охлажденных проб теплоносителя. Приведенные расчетные данные показывают сложность решения задачи однозначной интерпретации результатов измерения удельной электропроводимости охлажденных проб теплоносителя первого контура. Такая интерпретация будет облегчена при контроле обоих интегральных пока-

зателей, то есть величины водородного показателя  $pH_{25}$  и удельной электропроводимости.

2. Использование данных по измерению удельной электропроводимости для контроля за поступлением примесей в теплоноситель первого контура является проблематичным вследствие присутствия в этом теплоносителе реагентов, вклад в суммарную удельную электропроводимость которых значительно превышает возможный вклад от присутствия контролируемых примесей (когда концентрации этих примесей соответствуют предельно допустимым значениям). К таким реагентам, в первую очередь, относится аммиак.

3. Сильное влияние на величину удельной электропроводимости охлажденной пробы оказывает присутствие аммиака, который дозируется в теплоноситель первого контура с целью образования и накопления водорода, обеспечивающего подавление окислительных продуктов радиолиза теплоносителя. При этом аммиак, являясь слабым основанием, не оказывает решающего влияния на кислотно-щелочные свойства теплоносителя при высоких температурах, которые определяются соотношениями концентраций борной кислоты и суммы щелочных металлов.

4. При постоянном содержании калия изменение концентрации борной кислоты в диапазоне свыше  $\sim 0,15$  мг/кг практически не оказывает влияния на величину удельной электропроводимости.

### Список литературы

1. Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения, СТП ЭО 0004-00, 2001.
2. Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-440 без коррозионной наплавки корпуса. Нормы качества рабочей среды и средства их обеспечения. СТО 1.1.1.02.005.0621-2007.
3. Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-440 с коррозионно-стойкой наплавкой корпуса. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения. СТ ЭО 0622-2005.
4. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях. М.: Энергия, 1969.
5. Мартынова О.И., Харитонов Н.Л. Поведение растворов метаборатов лития в условиях глубокого упаривания. Теплоэнергетика, 1990, №7.
6. Mesmer R.E., Baes C.F., Sweeton F.H. Acidities measurements at elevated temperatures // Inorg.Chem 1972, vol.11.
7. PWR Primary Water Chemistry Guidelines Volume 1, Revision 4, TR-105714-V1R4 / EPRI, Palo Alto, 1999.
8. Water Chemistry of WWER Nuclear Power Plants // Proc. of IAEA Technical Meeting on Water Chemistry of NPP, Oct. 1-3, 2007, Moscow.
9. Martynova O I, Pashevich V I. Chemistry in the Primary Circuit of PWRs with Particular Consideration of Alkalinization with Potassium Hydroxide (Operating Experiences of the VVER 440 Type) // VGB Kraftwerkstechnik, 1986, vol. 66.