

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕНОСА ВОДОРОДА В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ С ГАЗОВОЙ СИСТЕМОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ И ЕГО ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В.И. Полуничев

ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Д.И. Новиков

ORCID: 0000-0001-6419-4295 e-mail: grey1ngreen27@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

М.А. Дюжий

ORCID: 0000-0002-1094-7623 e-mail: dyuzhii.maxim@bk.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Представлен вариант логической взаимосвязи процессов образования, переноса и накопления водорода в теплоносителе и оборудовании первого контура судовых реакторных установок с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с контактирующими конструкционными материалами. Даны интегральные выражения для определения равновесной концентрации растворенного в теплоносителе первого контура газа, условий его выделения, а также опытные данные по эксплуатации реакторных установок атомных судов с аммиачным водно-химическим режимом. Рассмотрены вероятные причины, механизмы и результаты наводораживания конструкционных материалов реакторных установок, в частности, оболочек тепловыделяющих сборок из циркониевого сплава и трубных систем парогенераторов из титанового сплава. Полученные выводы целесообразно учитывать при создании и обосновании надежности перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности с длительным ресурсом.

Ключевые слова: газоперенос, наводораживание, нодульная коррозия, газовая система компенсации давления, водно-химический режим, судовые реакторные установки, газовыделение, «газовое» кипение.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полуничев, В.И. Исследование процессов образования и переноса водорода в первом контуре водо-водяных реакторов с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с конструкционными материалами / В.И. Полуничев, Д.И. Новиков, М.А. Дюжий // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 66-76. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_66

THE RESEARCH OF HYDROGEN GENERATION AND TRANSITION IN THE PRIMARY CIRCUIT OF PRESSURIZED WATER REACTORS WITH GAS PRESSURIZER SYSTEM AND ITS CHEMICAL INTERACTION WITH STRUCTURAL MATERIALS

V.I. Polunichev

ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

D.I. Novikov

ORCID: 0000-0001-6419-4295 e-mail: grey1ngreen27@gmail.com

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Dyuzhiy

ORCID: 0000-0002-1094-7623 e-mail: dyuzhii.maxim@bk.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The authors describe a variant of logical relationship between hydrogen generation, transition and accumulation in the primary circuit of marine reactor plants with gas pressurizer systems and its chemical interaction with structural materials coming into contact. Integral expressions to determine the steady-state concentration of the gas dissolved in the coolant of the primary circuit and the conditions for its evolution is given, as well as experimental data on nuclear vessel reactor facilities operation along with nitrogen water-chemistry conditions. Probable reasons, mechanisms and results of hydrogenation of structural materials in reactor facilities, particularly of fuel rod cladding made of zirconium alloy and steam generator tubing made of titanium alloy, are considered. It is recommended to take the conclusions reached into account while building up and substantiating the reliability of advanced low-power long-living reactor facilities for vessels and nuclear plants.

Key words: gas transfer, flooding, hydrogenation, nodule corrosion, gas pressure compensation system, water-chemical regime, ship reactor installation, gas release, gas boiling.

FOR CITATION: V.I. Polunichev, D.I. Novikov, M.A. Dyuzhiy. The research of hydrogen generation and transition in the primary circuit of pressurized water reactors with gas pressurizer system and its chemical interaction with structural materials. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 66-76.

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_66

Введение

В процессе эксплуатации реакторов на атомных судах выявились определенные процессы, препятствующие существенному увеличению ресурса активных зон при использовании циркониевого сплава Э-110 в качестве оболочечного материала твэлов, и трубных систем парогенераторов, выполненных из титанового сплава. Основной причиной ограничения ресурса явились нодульная (очаговая) коррозия, наводороживание (гидрирование) циркония и наводороживание титанового сплава трубной системы [1]. В научно-технической литературе опубликовано достаточно много информации по проблеме нодульной коррозии циркониевых оболочек элементов активных зон, хотя вопрос до настоящего времени остается открытым. Существенно меньше исследовано гидрирование циркония и титана и, кроме того, результаты данных исследований достаточно противоречивы.

Особенностями отечественных судовых реакторных установок по сравнению с установками атомных станций типа ВВЭР являются: газовая (азотная) система компенсации давления, аммиачный водно-химический режим (АВХР), высокая энергонапряженность активных зон, наличие кипения, в том числе, «газового», на оболочках твэлов в определенных ре-

жимах, повышенный температурный перепад теплоносителя в активной зоне, использование титанового сплава в качестве материала трубной системы парогенераторов.

Газовая система компенсации давления и газоперенос

В мировой атомной энергетике используются реакторные установки (РУ) с двумя типами систем компенсации давления теплоносителя первого контура – паровой и газовой. Исторически первая отечественная судовая реакторная установка ОК-150 атомного ледокола «Ленин» была создана с паровой системой компенсации давления, которая достаточно успешно работала до снятия РУ с эксплуатации. Другая установка – ОК-900, заменившая первую на этом же ледоколе, включала уже газовую (азотную) систему компенсации. Мотивацией замены послужили, вероятно, простота конструкции газовой системы и режима управления, а также пассивный принцип работы без потребления внешней энергии, что было важно для корабельной энергетике. Сыграло роль и отсутствие достаточных знаний о ее влиянии на тепло-гидравлические характеристики и водно-газовый и химический режим первого контура ВВР. Тем не менее, эта система тиражируется на всех современных отечественных судовых реакторных установках и АСММ, и, соответственно, требует объективной оценки результатов ее эксплуатации, влияния на надежность работы оборудования первого контура и всестороннего обоснования при использовании в перспективных проектах. В отечественных и зарубежных энергетических установках типа ВВЭР применяется только паровая система компенсации.

Традиционно газовая система компенсации давления включает компенсаторы давления (КД) и газовые баллоны (рис. 1). В некоторых вариантах весь газ сосредоточен в компенсаторах давления.

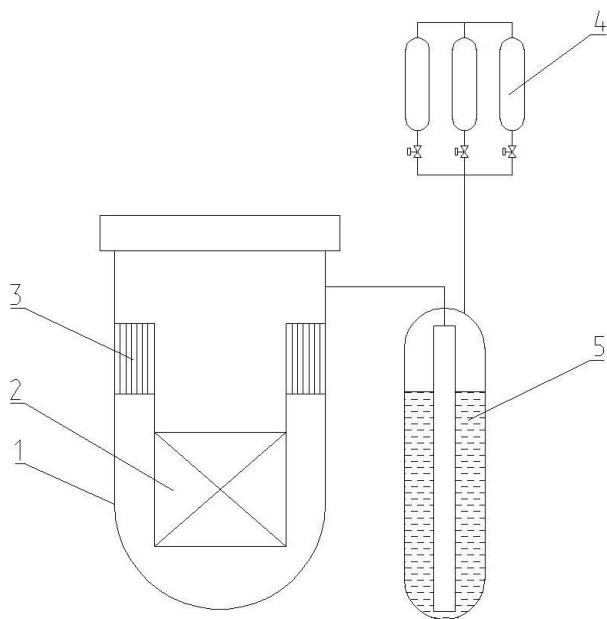


Рис. 1. Газовая система компенсации давления:
 1 – реактор; 2 – активная зона; 3 – парогенератор;
 4 – баллоны газа высокого давления; 5 – компенсатор давления

Fig. 1. Gas pressurizer system:
 1 – reactor; 2 – active zone; 3 – steam generator;
 4 – high-pressure gas chamber; 5 – pressurizer

В качестве рабочего газа в системе используется азот. В процессе работы установки в азот поступает водород, генерируемый в реакторе. Газ растворяется в воде компенсатора и за счет массообмена переносится в теплоноситель основного контура циркуляции, достигая достаточно высокой равновесной концентрации (1200-1800 нсм³/кг).

Выражение, определяющее предельную концентрацию газа в воде КД [2]:

$$C_{\text{КД}}^{\text{H}} = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_{\text{S}}(T_{\text{КД}})) \quad (1)$$

где $K(T_{\text{КД}})$ – коэффициент растворимости Генри при температуре в КД; $P_{1\text{К}}$ – давление в КД (принимается равным давлению в первом контуре); $P_{\text{S}}(T_{\text{КД}})$ – давление насыщения при температуре воды в КД.

Изменение концентрации азота в воде КД с течением времени описывается формулой:

$$V_{\text{КД}} \cdot \frac{dC_{\text{КД}}}{d\tau} = \alpha \cdot S \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{H}} - C_{\text{КД}}) \quad (2)$$

где $V_{\text{КД}}$ – объем воды в КД; $C_{\text{КД}}$ – концентрация газа в воде КД; S – площадь поверхности раздела фаз; α – коэффициент массообмена между водной и газовой фазой; $C_{\text{КД}}^{\text{H}}$ – предельная концентрация растворенного в воде газа, определяемая из выражения (1).

При условиях $\tau = 0$ $C_{1\text{К}} = 0$ уравнение (2) имеет решение в следующем виде:

$$C_{\text{КД}} = C_{\text{КД}}^{\text{H}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha S}{V_{\text{КД}}} \tau}\right) \quad (3)$$

Скорость переноса газа из компенсатора в первый контур и обратно описывается формулой (3):

$$G_{1\text{К}} \cdot \frac{dC_{1\text{К}}}{d\tau} = \beta \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{H}} - C_{1\text{К}}) \quad (4)$$

где $G_{1\text{К}}$ – масса воды в первом контуре; $C_{1\text{К}}$ – концентрация газа в воде первого контура; β – коэффициент массообмена между первым контуром и КД; $C_{\text{КД}}^{\text{H}}$ – предельная концентрация растворенного в воде газа, определяемая из выражения (1).

При условиях $\tau = 0$ $C_{1\text{К}} = 0$ уравнение (4) имеет решение в следующем виде:

$$C_{1\text{К}} = C_{\text{КД}}^{\text{H}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\beta}{G_{1\text{К}}} \tau}\right) \quad (5)$$

Аммиачный водно-химический режим

Для рассмотрения процессов образования, переноса и взаимодействия газов между собой и с конструкционными материалами в первом контуре судовых реакторов с газовой системой компенсации необходимо привести краткую характеристику используемого аммиачного водно-химического режима. Выбор этого режима основан на многолетнем опыте его применения на установках данного типа. Аммиачный водно-химический режим считается саморегулируемым, устойчивым и простым в поддержании [3]. Саморегулируемость режима обеспечивается за счет динамического равновесия между растворенными в теплоносителе первого контура аммиаком, азотом и водородом, устанавливающегося во время работы реакторной установки на мощности, по формуле:



Основным источником азота в теплоносителе является система компенсации давления. Источниками водорода являются радиолитическое разложение аммиака, коррозионные процессы циркониевых оболочек твэлов и других элементов активных зон при контакте с теплоносителем и радиолиз воды.

Стехиометрия коррозионного процесса циркония имеет вид:



Процесс образования водорода при радиолитическом разложении воды происходит по реакции:



Аммиак вводится в теплоноситель специально. Поступивший молекулярный водород принимает участие в двух процессах: подавлении радиолитического разложения, приводящего к снижению в теплоносителе содержания окислителей (O_2 и H_2O_2), и радиационно-химической фиксации растворенного азота с образованием аммиака по реакции (5). За меру скорости коррозионного процесса обычно принимается скорость повышения концентрации аммиака [4]. По результатам измерений концентраций аммиака и водорода в теплоносителе первого контура в судовых РУ эмпирически установлено, что для нормированного диапазона концентраций аммиака (10-100 мг/кг) на 1 мг/кг аммиака приходится около 2 нсм³/кг водорода. Этим соотношением удобно пользоваться при оценке содержания водорода в теплоносителе по результатам измеренной концентрации аммиака, поскольку общее содержание газа, и водорода в частности, в теплоносителе судовых РУ не контролируется.

Таблица 1.

Состав теплоносителя первого контура РУ атомных судов

Table 1.

Coolant chemistry in the primary circuit of nuclear vessel reactor facilities

Объект	Условия отбора	Содержание компонентов ВХР				
		НН ₃ , мг/кг	Общее содержание газов, нсм ³ /кг	Н ₂ , нсм ³ /кг	Н ₂ ^{**} , нсм ³ /кг	Н ₂ ^{R***} , нсм ³ /кг
«Севморпуть»	$Q=1,903 \text{ ТВт}\cdot\text{ч}$ $N=22\% \text{ Нном}$ $P=12,16 \text{ МПа}$	246	1180	195	985	1100
«Севморпуть»*	N – остановлена $P=8,34 \text{ МПа}$	204	890	135	755	735
«Арктика» (РУ-2)	$Q=1,173 \text{ ТВт}\cdot\text{ч}$ $N=21\% \text{ Нном}$ $P=12,94 \text{ МПа}$	23	290	61	229	1160
«Арктика» (РУ-2) ^{***}	$Q=1,308 \text{ ТВт}\cdot\text{ч}$ N – остановлена $P=7,94 \text{ МПа}$	62	780	87	693	725
«Советский Союз»*	$Q=1,66 \text{ ТВт}\cdot\text{ч}$ N – остановлена $P=8,62 \text{ МПа}$ $t_{1к}=43 \text{ }^\circ\text{C}$	175	1200 – 1300	150	1100	755

* Пробоотбор проводился на расхоженных РУ при давлении в контуре 8-9 МПа и температуре теплоносителя 43-72 °С.
 ** Концентрация азота вычислена как разность между общим газосодержанием и концентрацией Н₂.
 *** Рассчитано как: $K_{N_2}(P_\Sigma - P_s - P_{H_2})$, где K_{N_2} – константа Генри для азота, P_Σ , P_s , P_{H_2} – давление в контуре, парциальное давление паров воды и водорода соответственно.

Для иллюстрации соотношений реально измеренных концентраций элементов АВХР в табл. 1 приведены некоторые систематизированные данные по содержанию азота, водорода и аммиака, полученные на атомных судах «Севморпуть», «Арктика» и «Советский Союз» при аномально высоком содержании аммиака в теплоносителе первого контура [5].

Из табл. 1 следует, что концентрация аммиака в теплоносителе первого контура может значительно превышать нормативные значения. Это происходит в случае поступления в первый контур повышенного количества водорода, образующегося при интенсивной общей и нодульной коррозии оболочек твэлов, чехловых труб и других элементов активных зон из циркониевого сплава Э-110. При этом равновесие в реакции (6) смещается в сторону синтеза аммиака. Повышение концентрации аммиака в теплоносителе первого контура имеет место, как правило, к концу кампании активных зон с циркониевыми оболочками и предопределяет их выход из строя по причине разгерметизации твэлов. Эта тенденция проиллюстрирована на рис. 2, где приведены графики изменения концентраций аммиака в теплоносителе первого контура в реакторных установках с одним из вариантов циркониевых активных зон в зависимости от энерговыработки [1].

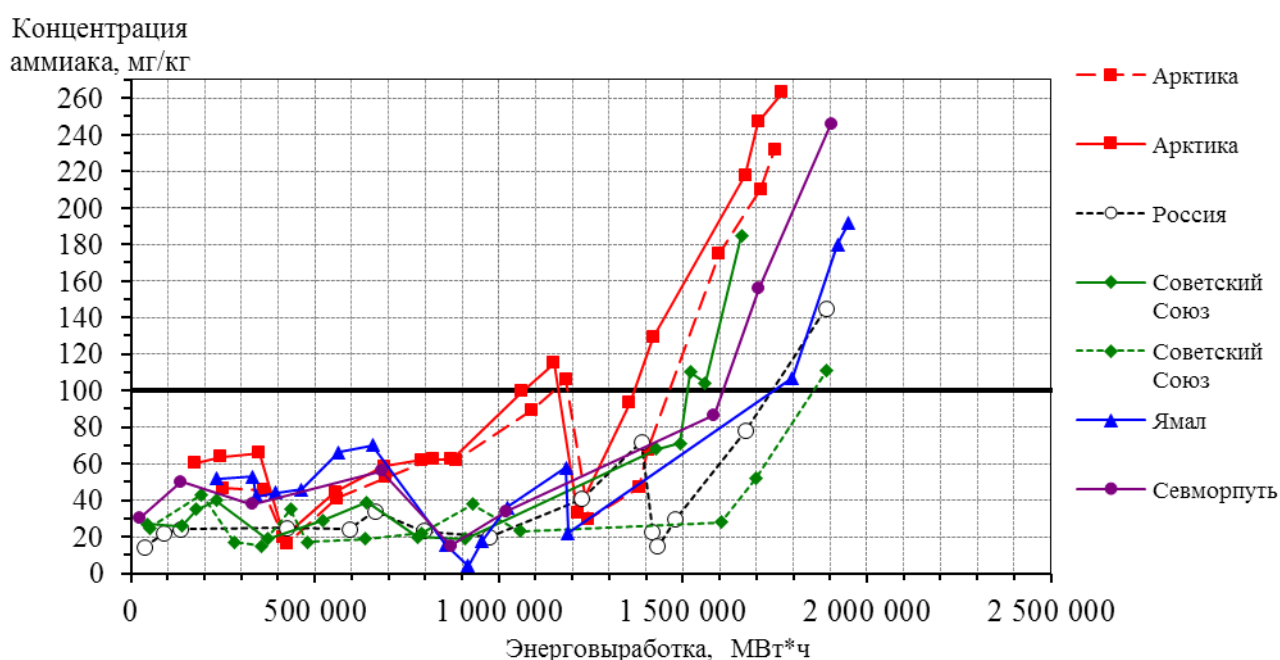


Рис. 2. Изменение концентрации аммиака в теплоносителе 1 контура при эксплуатации циркониевых активных зон

Fig. 2. Change in ammonia concentration in coolant in the 1 circuit during the operation of active zones containing zirconium

Из табл. 1 и рис. 2 следует, что в аномальных ситуациях концентрация аммиака может достигать 250 и более мг/кг, а концентрация водорода соответственно – 500 нсм³/кг и выше. При работе установки водород растворяется в теплоносителе, перемешиваясь с раствором азота, образовавшаяся смесь циркулирует в оборудовании первого контура, поступает в компенсаторы давления и за счет массообмена концентрация газов поддерживается в объеме всего первого контура практически равновесной, но не постоянной, так как концентрация водорода, по опыту, всегда растет.

Концентрация насыщения каждого газа при давлении и температуре компенсатора определяется по формуле [2]:

$$C_k = 10^{-2} \cdot K(t) \cdot P \cdot X \quad (9)$$

где P – общее давление газов в компенсаторе, $K(t)$ – коэффициент Генри данного газа при температуре в компенсаторе, X – объемное содержание данного газа в смеси газов компенсатора, %.

Объемное содержание водорода определяется по измеренной концентрации аммиака, а азота – как разность между общим газосодержанием и содержанием водорода. При равновесной концентрации растворенного азота и водорода в первом контуре и компенсаторе объемное содержание водорода в газе КД может составлять до 20 % от общего объема газов (табл. 1).

Из приведенного анализа следует, что при АВХР в теплоносителе первого контура всегда присутствует аммиак, и, следовательно, водород, который может взаимодействовать с конструкционными материалами оборудования первого контура. По поводу саморегулируемости аммиачного водно-химического режима высказываются некоторые сомнения. Согласно [6], при поступлении в теплоноситель водорода физико-химическая система перестает быть замкнутой и в системе растет содержание аммиака. Вследствие этого у АВХР исчезает свойство «саморегулируемости» – одно из условий обеспечения пассивной безопасности установки. Это подтверждается и практикой поддержания режима. Например, для предотвращения превышения нормативных значений концентрации аммиака предусмотрено поэтапное снижение давления в первом контуре до атмосферного и газоудаление из оборудования, дозагрузка ионообменного фильтра специальным сорбентом и др.

Выделение и перенос газов в первом контуре

Азот и водород при определенных условиях могут выделяться из теплоносителя, и образовавшаяся парогазовая смесь может локализоваться в верхних полостях реактора, приводов СУЗ, парогенераторов, насосов и компенсаторов давления [7]. Рассмотрим процесс выделения газов из теплоносителя в активной зоне на примере азота (рис. 3).

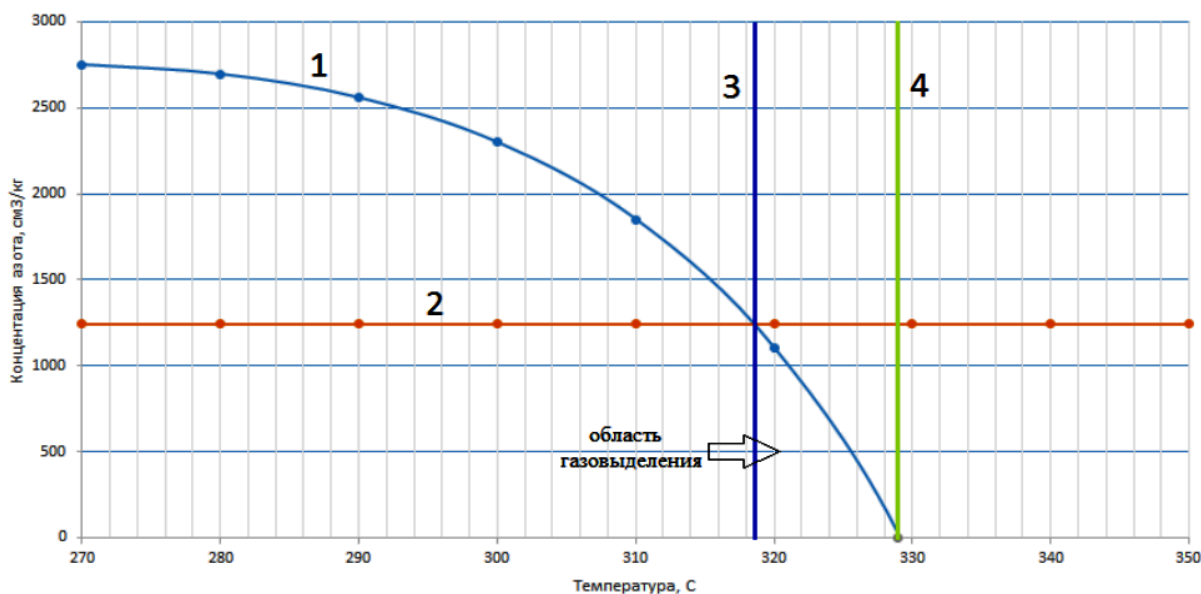


Рис. 3. График определения интервала температур возможного выделения азота из теплоносителя в активной зоне

Fig. 3. The chart of temperature ranges for probable nitrogen evolution from coolant in the active zone

График построен для давления теплоносителя 12,7 МПа и температуры в компенсаторе 60 °С. При анализе возможного выделения азота из теплоносителя в активной зоне необходимо учитывать температуру не только в основном потоке, но и в пристенном слое оболочек ТВЭЛов и других элементов активной зоны, где температура теплоносителя выше, а также изменение давления, особенно в переходных режимах.

Аналитически температура начала выделения азота из газонасыщенного теплоносителя пристенного слоя твэлов определяется из равенства концентраций азота, растворенного в КД и пристенном слое [8].

$$C_{\text{КД}} = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_5(T_{\text{КД}})) \quad (10)$$

$$C_{1\text{К}} = K(T_{\text{п.с.}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_5(T_{\text{п.с.}})) \quad (11)$$

где $C_{\text{КД}}$ – равновесная концентрация растворенного газа в воде КД; $K(T_{\text{КД}})$ – коэффициент Генри при температуре в КД; $P_{1\text{К}}$ – давление в первом контуре; $P_5(T_{\text{КД}})$ – давление насыщенных паров воды при температуре в КД; $K(T_{\text{п.с.}})$ – коэффициент Генри при температуре теплоносителя в пристенном слое; $P_5(T_{\text{п.с.}})$ – давление насыщенных паров воды при температуре теплоносителя в пристенном слое.

Из графика на рис. 3 следует, что выделение газа из пристенного слоя оболочки твэл («газовое» кипение) начинается при температуре значительно ниже температуры насыщения при давлении в первом контуре. Реально в судовых установках выделение газа из пристенного слоя тепловыделяющего элемента при номинальной мощности начинается практически от входа в активную зону. При определении начала выделения конкретного газа из раствора нескольких газов необходимо пользоваться выражением (9).

Традиционно принято считать, что высокая концентрация водорода при аммиачном ВХР обеспечивает глубокое подавление радиолитического распада кислорода в теплоносителе при работе реактора на мощности не более 10 мкг/кг. Однако в работе [5] обосновывается возможность более высокого содержания кислорода в теплоносителе за счет повторного поступления парогазовых пузырьков, выделившихся на оболочках твэлов и содержащих повышенную концентрацию радиолитического кислорода и водорода, на вход в активную зону. С этим трудно не согласиться, но только этим трудно объяснить преимущественного коррозионного повреждения циркониевых оболочек в нижней части твэлов, механизм переноса газа из пузырька, находящегося в основном потоке теплоносителя, к поверхности оболочки твэла, проникновения его через защитную окисную пленку и их химического взаимодействия. Процесс генерации водорода и кислорода на оболочках и механизм проникновения их через защитную окисную пленку циркония к основному металлу видится определяющими в процессах гидрирования и коррозии циркониевых оболочек элементов активных зон. Соответственно, представляет интерес дополнительная версия прохождения этих процессов [1].

На начальной стадии «газового» кипения пузырьки газа, выделившегося из воды пристенного слоя в нижней части твэлов, содержат пар, азот и водород и локализуются на греющей поверхности. При этом степень недогрева воды в общем потоке до температуры насыщения, парциальное давление газа (азота и водорода) в пузырьках и время нахождения их на поверхности твэла максимальное. Естественно предположить, что условия теплоотдачи от оболочки к теплоносителю в точках контакта пузырьков наихудшие, что провоцирует локальное повышение температуры под пузырьком и максимальный термоцикл при отрыве и поступлении на его место теплоносителя существенно недогретого до температуры насыщения из общего потока. Высокочастотная точечная термодинамика вызывает разрушение поверхностного защитного окисного слоя циркониевого сплава оболочки твэла с образованием трещин [8,10]. Правомочность такого предположения согласуется с данными экспериментальных исследований термической усталости образца из нержавеющей стали, разогретого до температуры 310 °С, на который подавались капли воды с температурой 20 °С частотой 1 Гц [11]. Начало образования трещин зафиксировано в диапазоне $(1-3) \cdot 10^6$ циклов падения капель. Амплитуда термоцикла в стали составляла около 150 °С. При длительности испытаний в 3-4 раза большей начальной глубина трещин достигала 100-2000 мкм. В работе [12]

также утверждается, что развитие трещины и процесс гидридного растрескивания ускоряются при термоциклировании и повышении напряжений.

Водород характеризуется высокой диффузионной подвижностью в решетке циркония, которая с увеличением температуры растет. При образовании трещины в оксидной пленке водород начинает быстро проникать в металл, его концентрация в приповерхностном слое увеличивается и, если парциальное давление велико, может превысить предельную растворимость в цирконии при данной температуре с образованием гидридов. Кроме того, радиолитический парогазовый режим в трещине оксидного слоя приводит к возникновению особого водно-химического режима внутри ее объема, способствует повышенной концентрации радиолитического водорода и кислорода. Процесс зарождения и роста трещин, приводящих к хрупкому разрушению изделия, происходящему в основном по механизму замедленного гидридного растрескивания, считается наиболее опасным. На рис. 4 представлен поперечный шлиф циркониевого сплава Э110 после наводороживания при температуре 350 °С и давлении в камере 2 атм, полученный при исследовании влияния концентрации водорода на толщину гидридного растрескивания [13].



Рис. 4. Поперечный шлиф циркониевого сплава Э110 после наводороживания

Fig. 4. Э110 zirconium alloy cross-section after hydrogenation

В работе [2] также отмечается, что радиолитический водород более интенсивно происходит в кипящих реакторах и является мощным источником образования радиолитического водорода и кислорода. Известно, что скорость коррозии пропорциональна паросодержанию [14]. Например, скорость коррозии циркониевых оболочечных сплавов в условиях реакторов кипящего типа (РБМК) в 5-10 раз выше, чем в реакторах под давлением (ВВЭР), в которых отсутствует кипение. Очевидно, что содержание парогазовой смеси в теплоносителе судовых ВВР существенно меньше, чем пара в кипящих реакторах, но с учетом дополнительного выделения газа («газового» кипения недогретой до температуры насыщения воды) может быть значимым для интенсификации радиолитического парогазового режима в пузырьках и повышения термоциклической нагрузки.

Из результатов исследований коррозионного состояния оболочек твэлов, отработавших в судовых активных зонах, реакторных петлях и электрообогреваемых экспериментальных стендах из различных материалов и при разных параметрах, следует [1]:

- максимальное коррозионное повреждение и гидрирование имеют место в области начала пристенного «газового» кипения максимально недогретой до температуры насыщения воды;

- характер распределения указанных повреждений для разных материалов и теплотехнических условий хорошо коррелирует с дислокацией пристенного «газового» кипения недогретой воды, что подтверждает их взаимосвязь;
- распределение окислов и гидридов качественно совпадает со степенью недогрева общего потока воды до температуры насыщения при пристенном кипении и концентрацией газов в парогазовых пузырьках на оболочках твэлов.

Аналогичного влияния других факторов на интенсивность коррозии и гидрирования и характер их распределения не выявлено. Как было отмечено ранее, все присутствующие газы в судовых реакторных установках находятся в теплоносителе в двух состояниях – растворенными в воде и в виде парогазовой смеси, в зависимости от температуры и давления в оборудовании первого контура, режимов эксплуатации, оказывая существенное влияние на его работоспособность. Другой проблемой, связанной с наличием водорода в теплоносителе, является аномально высокое локальное наводороживание титановых труб парогенераторов судовых РУ, приводящее к охрупчиванию металла и образованию межконтурных течей [6]. Измеренное содержание водорода в образцах металла на порядок превышает максимальное прогнозируемое проектное наводороживание материалов трубной системы.

В качестве наиболее вероятной причины может быть обозначена локализация выделившегося из теплоносителя в активной зоне газа (в том числе, водорода) в верхней застойной зоне питательных труб парогенератора. Концентрация водорода в газовой фазе при температуре, характерной для области наводороживания, в десятки раз выше по сравнению с концентрацией в жидкости.

Заключение

В настоящее время вопросы, связанные с коррозией и наводороживанием циркониевых материалов элементов активных зон и титановых трубных систем парогенераторов в судовых реакторных установках, остаются открытыми, и для их решения необходим дальнейший обстоятельный анализ. Представленные результаты, не будучи исчерпывающими, вполне содержательны, чтобы быть принятыми во внимание при проектировании перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности следующего поколения.

Библиографический список

1. **Полуничев, В.И.** Возможные пути повышения ресурса активных зон с циркониевыми элементами ТВС для перспективных судов и АСММ / В.И. Полуничев, А.Ф. Филимонов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4. С. 104-112.
2. **Герасимов, В.В.** Водный режим атомных станций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат, 1976. – 398 с.
3. **Касперович, А.И.** Водно-химические процессы в реакторных установках атомных ледоколов и плавучих энергоблоков / А.И. Касперович, Б.И. Колесов, Н.Г. Сандлер // Атомная энергия. 1996. Т. 81. Вып. 4. С. 261-265.
4. **Шовиков, Г.П.** Исследование методов управления (снижения) концентрации аммиака в процессе эксплуатации ледокольных активных зон. Тех. отчет. Инв. №31-36-37-07 / Г.П. Шовиков, Б.И. Колесов, А.В. Лузаков. – М.: РНЦ «Курчатовский институт». 2007. – 56 с.
5. **Карнаухов, В.Е.** Разработка математических моделей для учета влияния неконденсирующихся газов на работоспособность оборудования ЯЭУ. Дисс. ... к-та тех. наук. М.: ФГУ НИЦ «Курчатовский институт», 2019.
6. **Воробьев, Ю.Б.** Особенности массопереноса при эксплуатации парогенераторов атомных ледоколов / Ю.Б. Воробьев, Ю.В. Долгополов, А.Л. Малышева и др. // Вестник МЭИ. 2022. № 2. С. 11-20.

7. **Филимонов, А.Ф.** Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторной установки с газовой системой компенсации / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3. С. 101-110.
8. **Зверев, Д.Л.** Реакторная установка нового поколения РИТМ-200 для перспективного атомного ледокола / Д.Л. Зверев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев и др. // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 6. С. 323-328.
9. Подкипание теплоносителя первого контура судовых ЯЭУ как фактор интенсификации коррозии циркониевых оболочек твэлов. Доклад НИЦ «Курчатовский институт»./ Межотраслевая научно-техническая конференция «Исследовательскому комплексу ИВВ-2М – 45 лет», г. Заречный, 26-27 мая 2011 г. – Заречный: ОАО «ИРМ», 2011. – 71 с.
10. **Arkhipov, O.P.** Verification of computer code for calculation of coolant radiolysis in the VVER reactor code with regard for boiling in its upper part / O.P. Arkhipov, S.A. Kabakchi // The 2010 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems. October 3-7, 2010, Quebec, Canada.
11. **Бесчеров, Д.Е.** Верификация методики расчета усталостной прочности оборудования реакторных установок при нестационарных термоциклических нагрузках / Д.Е. Бесчеров, М.А. Большухин, А.В. Козин и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. №1 (124). С.81-91.
12. **Кудияров, В.Н.** Закономерности формирования гидридного обода в оболочечных трубах из циркониевого сплава Э110 при газофазном наводороживании / В.Н. Кудияров. – Томск: ТПУ, 2017. – 118 с.
13. **Крицкий, В.Г.** Методический подход к прогнозированию коррозии циркониевых сплавов в водном теплоносителе ядерных реакторов // Атомная энергия. 2011. Т. 110. Вып. 4. С. 219-227.
14. **Березина, И.Г.** Особенности коррозионного поведения сплава Zr-1%Nb в теплоносителе АЭС с РБМК-1000 // Теплоэнергетика. 1998. № 7. С. 62-67.

*Дата поступления
в редакцию: 31.08.2022*

*Дата принятия
к публикации: 01.11.2022*