

УДК 544.58

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/20

В.А. ГРАЧЕВ, А.Б. САЗОНОВ, О.С. БЫСТРОВА, Ю.Н. ЗАДОНСКАЯ, Н.В. ЗАДОНСКИЙ

ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИТИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ВВЭР: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проведено математическое моделирование образования и распределения трития в первом контуре ВВЭР-1000 при использовании топлива с оболочками твэлов, имеющими различную проницаемость по тритию за счет диффузии в металле (циркониевый сплав Э110 и хромоникелевый сплав 42ХНМ). Результаты расчетов показывают, что активность трития, переходящего из топлива в теплоноситель первого контура за цикл работы на мощности, в хромоникелевом сплаве составит не менее 700 ТБк.

Ключевые слова: тритий, первый контур, ВВЭР, оболочки твэлов, проницаемость.

Введение

В настоящее время на АЭС с ВВЭР в качестве материала топливных оболочек используются сплавы циркония. По отношению к тепловым нейтронам цирконий является ядерно-прозрачным, и основное преимущество циркониевых сплавов – это малая величина потерь нейтронов вследствие захвата. Тем не менее цирконий как конструкционный материал имеет и существенный недостаток: при повышении температуры оболочек твэлов вследствие потери теплоносителя при аварии становится возможной экзотермическая парациркониевая реакция, способная привести к накоплению взрывоопасной газовой смеси H_2 с воздухом. Во избежание этого предлагается использовать для изготовления оболочек твэлов хромоникелевый сплав 42ХНМ. Однако вопросы, связанные с проницаемостью оболочек из 42ХНМ для трития (3H), до сих пор нигде не рассматривались. В настоящей работе представлена модель накопления трития в первом контуре ВВЭР, его распределения по связанным системам, а также в жидких сбросах и газовых выбросах. Результаты моделирования даны для оболочек, выполненных из сплавов Э110 и 42ХНМ.

Методика расчета накопления трития

При работе реакторной установки (РУ) с ВВЭР тритий накапливается в технологических средах систем поддержания водно-химического режима первого контура ВВЭР. Разработанная модель позволяет проводить расчеты активности 3H в теплоносителе первого контура, в бассейнах выдержки (БВ) и перегрузки (БП) топлива, в баках систем хранения теплоносителя (КВВ), дистиллята и борного концентрата (КВС) и в системе переработки трапных вод (КРФ). Основными источниками накопления 3H в теплоносителе при нормальной эксплуатации являются: 1) тройное деление и выход трития из топлива за счет диффузии через оболочки твэлов; 2) активация ядер ^{10}B ; 3) активация дейтерия. В работах [1, 2] приведены параметры, характеризующие скорости образования трития за счет данных процессов.

Содержание борной кислоты (H_3BO_3) в теплоносителе первого контура C_B как функции времени t задается скоростью водообмена в течение топливного цикла, например

$$dC_B/dt = -C_{max}/T_{ц}, \quad (1)$$

где C_{max} – концентрация H_3BO_3 в начале цикла; $T_{ц}$ – длительность цикла. В соответствии с этим концентрация трития в теплоносителе C_0 зависит от времени следующим образом:

$$\frac{dC_0}{dt} = \frac{1}{M} \left(R_f + R_D + R_B \frac{2C_B}{C_{max}} \right) - \lambda \cdot C_0 + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^2 Q_{i0} (C_i - C_0), \quad (2)$$

где M – масса теплоносителя; R_f , R_D , R_B – скорости появления 3H в теплоносителе на участке активной зоны за счет выхода из топлива, активации дейтерия и ^{10}B соответственно; λ – постоянная распада 3H ; Q_{i0} – потоки, поступающие в контур из баков дистиллята ($i = 1$) и борного концентрата ($i = 2$) системы КВС; C_i – концентрации 3H в этих баках. В указанных емкостях, а также в баках систем КВВ ($i = 3$) и КРФ ($i = 4$) концентрации 3H определяются из уравнений

$$m_i dC_i/dt = -\lambda \cdot m_i C_i + \sum_j Q_{ji} (C_j - C_i), \quad (3)$$

где индекс j нумерует все емкости (включая контур теплоносителя, когда $j = 0$), потоки из которых приходят в емкость с индексом i ; m_i – масса воды в емкости.

Текущая концентрация H_3BO_3 в системе КВВ (C_K) описывается уравнением, аналогичным (3):

$$dC_K/dt = Q_{03}(C_B - C_K)/m_3. \quad (4)$$

Изменения массы воды в баках дистиллята (m_1) и борного концентрата (m_2) системы КВС, а также массы воды в баке КВВ (m_3) описываются разностью сумм входящих и выходящих потоков:

$$dm_i/dt = \sum_j (Q_{ji} - Q_{ij}). \quad (5)$$

Входящие в емкости потоки включают потоки извне: это химически обессоленная вода (ХОВ), поступающая в баки дистиллята КВС, и трапные воды без трития, направляющиеся в систему КРФ. Вода, получаемая в результате очистки трапных вод, поступает в баки собственных нужд КРФ для повторного использования в технологическом цикле АЭС.

Выходящие потоки из системы КРФ включают поток дебаланса вовне, формирующий жидкий сброс. Последняя величина рассчитывается из материального баланса.

Ненулевые потоки из КВВ в КВС обеспечиваются работой выпарной установки. Неорганизованные протечки теплоносителя, а также воды от пробоотбора из контура поступают на переработку в систему КРФ.

Работа РУ с ВВЭР в течение цикла, включая период планово-предупредительного ремонта (ППР), моделируется следующим образом. При пуске РУ происходит разогрев теплоносителя со сбросом избытка его объема в бак системы FAL.

Выход на номинальную мощность сопровождается снижением концентрации H_3BO_3 в теплоносителе от стояночной до C_{\max} за счет водообмена из бака дистиллята КВС со сбросом теплоносителя в бак КВВ. Работа на мощности подразумевает водообмен для снижения концентрации H_3BO_3 от стартовой концентрации примерно до 0.03 г/кг. Далее до конца цикла снижение осуществляется за счет работы фильтров байпасной очистки, и поток водообмена Q_{03} равен нулю. В остальное время

$$Q_{03} = MC_{\max}/(T_c C_0). \quad (6)$$

В период работы на мощности имеет место подпитка БВ и БП ХОВ для компенсации потерь за счет испарения. Останов реактора осуществляется путем ввода в контур борного концентрата из системы КВС для достижения стояночной концентрации H_3BO_3 со сбросом теплоносителя в баки системы КВВ. Во время расхолаживания контура осуществляется его подпитка из бака системы FAL для компенсации термической усадки теплоносителя.

В период ППР при перегрузке топлива производится объединение теплоносителя и воды БП и БВ, а также подпитка ХОВ БП и БВ для компенсации потерь за счет испарения в этот период. В этот же период происходит полная переработка теплоносителя из баков КВВ и заполнение баков КВС дистиллятом и борным концентратом до начальных уровней.

Удельная активность ^3H в воздухе контейнмента в период ППР описывается уравнением

$$A_C = A_0 \exp(-\beta t) + \alpha \cdot A_B [1 - \exp(-\beta t)]/\beta, \quad (7)$$

в котором величины A_0 и A_B имеют смысл удельной активности в воздухе и в воде БВ и БП к началу ППР; α – параметр, характеризующий скорость поступления трития в воздух,

$$\alpha = Q_{\text{исп}}/(V_C S), \quad (8)$$

а β – скорость вывода трития из воздуха контейнмента (включая естественный распад),

$$\beta = Q_{\text{вент}}/V_C + \lambda. \quad (9)$$

Здесь V_C – воздушный объем контейнмента; $Q_{\text{исп}}$ – скорость испарения воды с зеркала БВ и БП; S – коэффициент изотопного разделения H^1/H^3 в системе «жидкая вода – водяной пар»; $Q_{\text{вент}}$ – расход вентиляции. Величины α и β принимают различные значения при работе на мощности и в период ППР благодаря изменениям температуры воды бассейнов и кратности вентиляции.

Необходимые для тестового моделирования технические характеристики РУ В-320 с реактором ВВЭР-1000 и условия работы ее систем были взяты из проектной документации. При моделировании использовались следующие сценарии компенсации потерь теплоносителя:

- потери за счет неорганизованной протечки и отбора проб полностью компенсируются ХОВ, не содержащей тритий (сценарий 1);
- потери компенсируются дистиллятом собственных нужд из системы КРФ (сценарий 2);
- вся тритийсодержащая протечка собирается отдельно и возвращается в первый контур; сброс дебалансной воды с тритием отсутствует (сценарий 3).

Расчеты по представленным формулам, а также моделирование проницаемости топливных оболочек (см. ниже) проводили с использованием программного пакета MathCad [3].

Результаты расчетов накопления трития и сравнение с данными АЭС

На рис. 1–4 представлены результаты моделирования, проведенные для 50-и циклов работы РУ с ВВЭР-1000. На рис. 1 для сравнения приведены данные по содержанию трития в теплоносителе первого контура реактора PWR. Можно видеть, что и диапазон значений, и характер изменения удельной активности трития в теплоносителе реактора сравнимой мощности с борным регулированием довольно хорошо согласуются с результатами расчета.

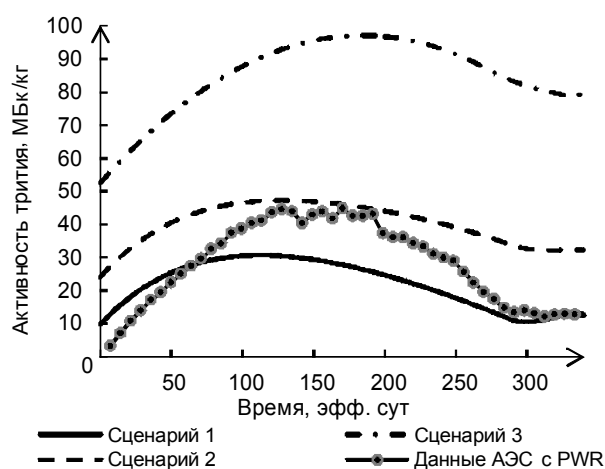


Рис. 1. Активность ^3H в теплоносителе на 50-м цикле

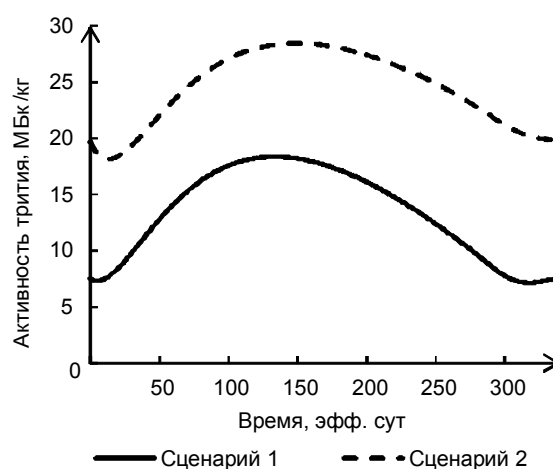


Рис. 2. Активность ^3H в баках КРФ на 50-м цикле

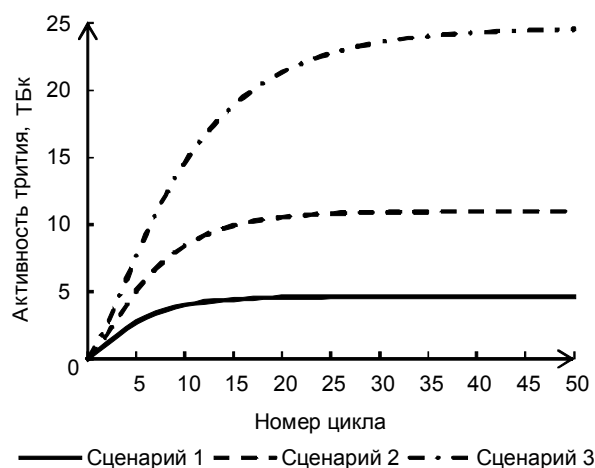


Рис. 3. Газовый выброс трития

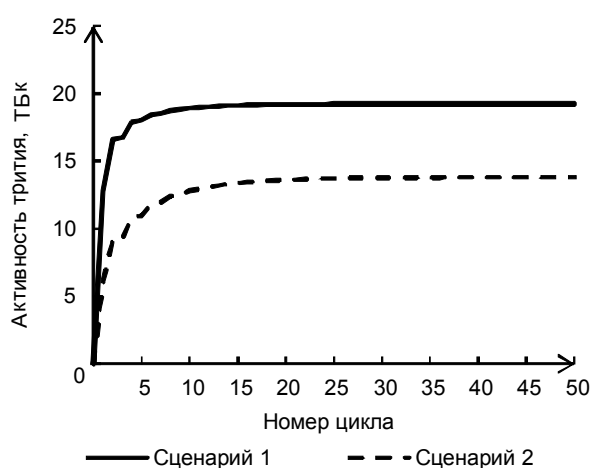


Рис. 4. Жидкий сброс трития

Для реакторов PWR с электрической мощностью ~ 1000 МВт ежегодные газовые выбросы ^3H варьируются от 1 до 30 ТБк, а жидкие сбросы – от 10 до 70 ТБк [4]. Для ВВЭР в пересчете на единицу мощности данные в целом аналогичны [5].

Таким образом, результаты моделирования с рекомендованными значениями выхода ^3H из топлива в теплоноситель (0.1% за счет диффузии и 0.22% за счет проектной негерметичности твэлов) адекватно описывают ситуацию с ^3H на РУ с ВВЭР, где используется топливо с оболочками из циркониевого сплава Э110.

Моделирование проницаемости топливных оболочек для трития

Для оценки проницаемости используем представления о хемосорбции водорода и его растворении в металлах, изложенные в [6]. В рамках этих представлений на поверхности любого металла в общем случае имеют место все элементарные процессы, перечисленные в таблице, с участием молекул H_2 , свободных атомов H газовой фазы, хемосорбированных атомов (H_C) и атомов, растворенных в объеме металла (H_S). В таблице I_0 – число соударений молекул с поверхностью в единицу времени; n – концентрация химически адсорбированного водорода; u – концентрация растворенного водорода; \max – максимально возможное значение; ν – частота колебаний атома H (принимается одинаковой на поверхности и в объеме); L^2 – площадь, занимаемая одним атомом H на поверхности; E_C и Q_C – потенциальный барьер и энергия хемосорбции, E_S и Q_S – то же для растворения соответственно; $E' = \max(E_C, E_S)$, $E'' = E' - Q_S$; E_D – энергия диссоциации молекулы H_2 в газовой фазе (4.275 эВ).

Скорости элементарных процессов с участием изотопов водорода на поверхности металла

№ п/п	Процесс	Поток частиц через поверхность раздела	Константа скорости	Энергия активации
1	$H_2 \rightarrow 2H_C$	$J_1 = k_1 I_0 [1 - (n/n_{\max})]^2$	$k_1 = \exp(-E_1/kT)$	$E_1 = 2E_C$
2	$2H_C \rightarrow H_2$	$J_2 = k_2 n^2$	$k_2 = \nu L^2 \exp(-E_2/kT)$	$E_2 = 2(E_C - Q_C)$
3	$H_C \rightarrow H_S$	$J_3 = k_3 n [1 - (u/u_{\max})]$	$k_3 = \nu \exp(-E_3/kT)$	$E_3 = E_S - Q_C$
4	$H_S \rightarrow H_C$	$J_4 = k_4 u [1 - (n/n_{\max})]$	$k_4 = \nu L \exp(-E_4/kT)$	$E_4 = E_S - Q_S$
5	$H_2 \rightarrow H_C + H_S$	$J_5 = k_5 I_0 [1 - (n/n_{\max})] \times [1 - (u/u_{\max})]$	$k_5 = \exp(-E_5/kT)$	$E_5 = E_C + E'$
6	$H_C + H_S \rightarrow H_2$	$J_6 = k_6 n u$	$k_6 = \nu L^3 \exp(-E_6/kT)$	$E_6 = E_C - Q_C + E''$
7	$H_2 \rightarrow 2H_S$	$J_7 = k_7 I_0 [1 - (u/u_{\max})]^2$	$k_7 = \exp(-E_7/kT)$	$E_7 = 2E'$
8	$2H_S \rightarrow H_2$	$J_8 = k_8 u^2$	$k_8 = \nu L^4 \exp(-E_8/kT)$	$E_8 = 2E''$
9	$H_C \rightarrow H$	$J_9 = k_9 n$	$k_9 = \nu \exp(-E_9/kT)$	$E_9 = E_D - Q_C$
10	$H_S \rightarrow H$	$J_{10} = k_{10} u$	$k_{10} = \nu L \exp(-E_{10}/kT)$	$E_{10} = E_D - Q_S$

Если диффузионная составляющая не лимитирует переход 3H из внутреннего объема твэла в теплоноситель (что действительно имеет место при высоких температурах), то изменение концентрации 3H в объеме материала оболочки в любой точке и в любой момент времени равно

$$\frac{V du}{dt} = \sum_{i=1,2} S_i (J_{3i} - J_{4i} + J_{5i} - J_{6i} + 2J_{7i} - 2J_{8i} - J_{10i}) - V u \lambda, \quad (10)$$

где S_i – площадь поверхности оболочки твэла ($i = 1$ и 2 соответствует внутренней и наружной поверхностям); V – объем материала оболочки. Изменение концентрации 3H на поверхностях твэла

$$dn_i/dt = 2J_{1i} - 2J_{2i} - J_{3i} + J_{4i} + J_{5i} - J_{6i} - J_{9i} - S_i n_i \lambda, \quad (11)$$

а изменение числа атомов 3H внутри твэла и снаружи равны соответственно

$$dN_1/dt = S_1 (-2J_{11} + 2J_{21} - 2J_{51} + 2J_{61} - 2J_{71} + 2J_{81} + J_{91} + J_{101}) + R - N_1 \lambda; \quad (12)$$

$$dN_2/dt = S_2 (2J_{22} + 2J_{62} + 2J_{82} + J_{92} + J_{102}) - N_2 \lambda. \quad (13)$$

Последнее выражение определяет скорость выхода 3H в теплоноситель. Выразим I_0 через число молекул N_1 , свободный объем V_G внутри твэла и локальную температуру, принимаемую равной температуре внутренней стенки T_1 :

$$I_0 = (N_1/V_G) \sqrt{kT_1/2\pi m}, \quad (14)$$

где k – постоянная Больцмана; m – масса молекулы.

Система (10) – (13) с начальными условиями (u_0, n_{i0}, N_{i0}) решается численно. Параметрами являются величины $E_C, Q_C, E_S, Q_S, v, L, u_{\max}, n_{\max}, S_i, T_i, V$ и V_G . Все они, за исключением четырех последних, определяемых геометрией и температурой внутри и на поверхности твэла, характеризуют взаимодействие ^3H с оболочкой. При этом, поскольку хемосорбция Н на металлах (кроме Cu, Ag, Au [7]) носит неактивированный характер, $E_C = 0$.

Величина кванта колебательной энергии для атома Н на поверхности металлов на разных гранях составляет в среднем 120 мэВ [7]. То же справедливо и для атомов в объеме (кроме Pd с аномально низкой $h\nu \approx 60$ мэВ). Так как для ^3H частота примерно в $\sqrt{3}$ раз ниже, $\nu \approx 1.7 \cdot 10^{13}$ Гц.

Параметры L и n_{\max} в рамках модели хемосорбции Лэнгмюра являются зависимыми, характеризуя одно и то же свойство поверхности металла: адсорбционную емкость

$$n_{\max} = 1/L^2. \quad (15)$$

Атомы Н способны связываться с поверхностными атомами металла в максимальном соотношении 1:1, поэтому мерой адсорбционной емкости служит атомный радиус металла. Так как поверхность представлена гранями с различными индексами, используем эмпирическое соотношение между атомным радиусом R_a и «посадочной площадкой» атома Н на Ni [8]:

$$L^2 = 1.27\pi R_a^2. \quad (16)$$

Величину максимальной растворимости u_{\max} для разбавленного раствора можно определить как концентрацию атомов Н, соответствующую предельному заполнению междоузлий, заселяющихся в первую очередь. При этом, так как в разбавленном растворе $u/u_{\max} \ll 1$, изменением объема, которым сопровождается растворение водорода, можно пренебречь и считать u_{\max} величиной, зависящей только от параметра решетки. В этом случае

$$u_{\max} = za^3/64R_a^3, \quad (17)$$

где z – число занимаемых атомом Н междоузлий, приходящееся на одну элементарную ячейку; $a = \sqrt{2}$ и $\sqrt{3}$ для плотноупакованных и ОЦК-решеток соответственно.

Параметры Q_C и Q_S для большинства металлов известны, тогда как о величинах E_S надежной информации нет. В первом приближении

$$E_S = Q_S + U, \quad (18)$$

где U – энергия активации диффузии. Значения R_a, U, Q_C и Q_S для основных металлов, входящих в состав Э110 и 42ХНМ, были взяты из работ [7, 9–12]. Влиянием Nb и других металлов в сплаве Э110 на свойства циркония по отношению к водороду пренебрегали. 42ХНМ по своей структуре представляет собой частично упорядоченный твердый раствор Ni в Cr. Упорядоченная фаза соответствует соединению Ni_2Cr с ОЦК-решеткой [13]. В связи с этим структурные параметры 42ХНМ были приняты равными таковым для чистого Cr, а энергетические – усреднены (влиянием Mo и других металлов также пренебрегали).

Расчеты проводились для твэлов сборок ТВС-2М. Истинную площадь поверхности считали равной геометрической. Долю свободного объема под оболочкой принимали равной 30%, температуры на внутренней и внешней поверхностях – 375 и 355 °С соответственно. Общую скорость образования трития в топливе делили на число твэлов в активной зоне ВВЭР-1000.

Результаты моделирования проницаемости топливных оболочек по тритию

На рис. 5 показаны результаты расчетов по распределению ^3H между объемом металла оболочки твэла, его поверхностями, пространством внутри твэла и пространством теплоносителя в зависимости от времени работы реактора. Видно, что большая часть ^3H при использовании Э110 остается растворенной в объеме оболочки, тогда как в случае 42ХНМ уходит в теплоноситель. Причина этого – экзотермическое растворение водорода в Zr, для которого $Q_S = -0.732$ эВ [12].

Как показывает расчет, выход ^3H в теплоноситель из-под оболочек из сплава Э110 за счет диффузии к моменту окончания топливного цикла составляет 0.17%, что разумно согласуется с рекомендованной в [1] величиной 0.1%. Для 42ХНМ эта величина составляет 99.9%. Таким образом, хромоникелевые сплавы сами по себе оказываются прозрачными для ^3H , и вклад негерметичных твэлов при переходе трития в теплоноситель сводится к нулю.

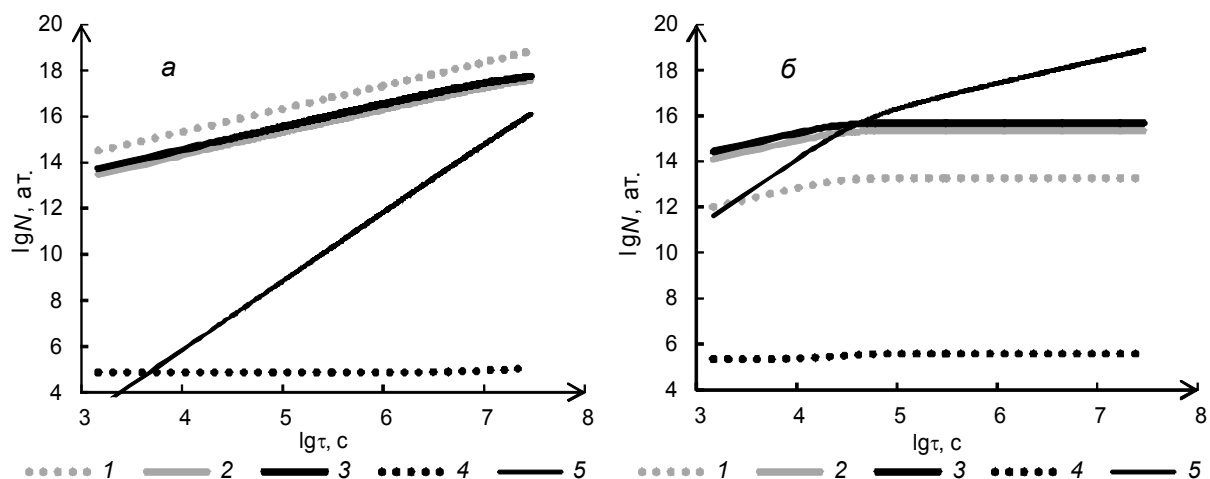


Рис. 5. Распределение трития, образующегося в твэле с оболочкой из циркониевого сплава Э110 (а) и сплава 42ХНМ (б): 1 – в объеме оболочки; 2 – на внутренней поверхности оболочки; 3 – на внешней поверхности оболочки; 4 – в твэле; 5 – выход трития в теплоноситель

На рис. 7 представлены расчетные данные по количеству ^3H , образовавшегося в теплоносителе и поступившего в него из ядерного топлива в ВВЭР-1000 для разных материалов оболочек твэлов. Можно видеть, что при использовании хромоникелевого сплава это значение как минимум на порядок больше, в связи с чем величина сброса и выброса ^3H в окружающую среду также будет в несколько раз выше.

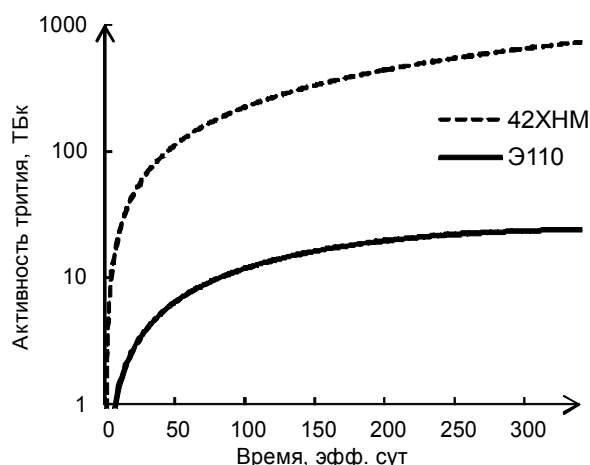


Рис. 7. Образование трития в первом контуре ВВЭР-1000 в течение цикла работы

Выводы

Результаты моделирования накопления и распределения ^3H в технологических средах РУ с ВВЭР хорошо согласуются с данными АЭС, использующих твэлы с оболочками из циркониевых сплавов.

Расчеты показывают, что высокая растворимость изотопов водорода в цирконии создает емкостный барьер на пути проникновения ^3H из топлива в теплоноситель первого контура. Сплавы, в которых такой барьер отсутствует, прозрачны для трития. Поэтому использование прозрачных для ^3H топливных оболочек потребует разработки в составе РУ узла извлечения ^3H .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Егоров Ю. А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
- Голубев Л. И., Илясов В. М., Лурье А. И. и др. // Атомная энергия. – 1979. – Т. 46 (2). – С. 79–92.
- Кириянов Д. В. Mathcad 15/MathcadPrime 1.0. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
- Daugherty N. and Conatser R. Radioactive Effluents from Nuclear Power Plants. Annual Report 2008. Office of Nuclear Reactor Regulation U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Наумов В. А., Климин С. Г. // Вестник МГТУ. – 1998. – Т. 1. – № 3. – С. 145–150.

6. Pisarev A. A. and Ogorodnikova O. V. // J. Nucl. Mater. – 1997. – V. 248. – P. 52–59.
7. Агеев В.Н., Бекман И.Н., Бурмистрова О.П. и др. Взаимодействие водорода с металлами. – М.: Наука, 1987.
8. Трепнел Б. Хемосорбция. – М.: ИЛ, 1958.
9. Колачев Б.А. Водородная хрупкость цветных металлов. – М.: Металлургия, 1966.
10. Гранкин Э.А., Шалимов Ю.Н., Островская Е.Н. // Альтернативная энергетика и экология. – 2004. – № 7.
11. Водород в металлах. 1. Основные свойства / под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. – М.: Мир, 1981.
12. Черняева Т.П., Остапов А.В. // ВАНТ. – 2013. – № 5 (87). – С. 16–32.
13. Barnard L., Young G. A., Swoboda B., et al. // Acta Mater. – 2014. – V. 81. – P. 258–271.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

Грачев Василий Алексеевич, инженер НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: vasya-grachyov@yandex.ru;
Сазонов Алексей Борисович, к.х.н., ведущ. науч. сотр. НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: absazonov@mail.ru;
Быстрова Ольга Сергеевна, к.х.н, ст. науч. сотр. НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Bystrova_OS@nrcki.ru;
Задонская Юлия Николаевна, инженер НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Zadonskiy_NV@nrcki.ru;
Задонский Николай Васильевич, начальник группы НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Zadonskiy_NV@nrcki.ru.

V.A. GRACHEV, A.B. SAZONOV, O.S. BYSTROVA, Y.N. ZADONSKAYA, N.V. ZADONSKY

FORMATION AND DISTRIBUTION OF TRITIUM IN THE PRIMARY CIRCUIT OF VVER: NUMERICAL SIMULATION

Formation and distribution of tritium in VVER-1000 primary circuit has been simulated for the cases when fuel rod cladding was made of structured materials with different tritium permeability due to its diffusion in metal, namely zirconium alloy E110 and chromium-nickel alloy containing 42% of Cr. The simulation results show that in the last case activity of tritium transferred from nuclear fuel into primary circuit coolant during one cycle of the reactor power operating exceeds 700 TBq. Thus, one can expect that the use of chromium-nickel alloys for fabrication of fuel cladding will increase both gas exhaust and liquid discharge of tritium from the VVER nuclear power plants in a few times.

Keywords: *tritium, primary circuit, VVER, fuel rod cladding, permeability.*

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Grachev Vasily Alexeevich, Engineer NRC «Kurchatov Institute», e-mail: vasya-grachyov@yandex.ru;
Sazonov Alexey Borisovich, Ph.D. Chemistry, Leading Research Scientist NRC «Kurchatov Institute», e-mail: absazonov@mail.ru;
Bystrova Olga Sergeevna, Ph.D. Chemistry, Senior Research Scientist NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Bystrova_OS@nrcki.ru;
Zadonskaya Yliya Nikolaevna, Engineer NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Zadonskiy_NV@nrcki.ru;
Zadonsky Nikolay Vasil'evich, Head of Group NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Zadonskiy_NV@nrcki.ru.