

УДК 621.039.572

ВЛИЯНИЕ ОТРАВЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВЫХ БЛОКОВ НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Прозорова Ирина Валентиновна,

начальник группы лаборатории физики реакторных установок
Института атомной энергии НЯЦ РК, Казахстан, 711100,
г. Курчатова, ул. Красноармейская, 10. E-mail: Prozorova@nnc.kz

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценить влияние отравления бериллиевых блоков на реактивность реактора, плотность потока тепловых нейтронов и распределение мощности реактора ИВГ.1М.

Цель работы: оценить влияние отравления бериллиевых блоков на нейтронно-физические характеристики реактора ИВГ.1М.

Методы исследования. Решение задачи состояло из двух частей: на первом этапе были выполнены нейтронно-физические расчеты скоростей реакции и плотности потока нейтронов с помощью программы MCNP5. На втором этапе для решения систем с известными начальными величинами концентраций для бериллия, лития, трития и гелия была разработана программа на языке программирования Visual Basic в среде Excel.

Результаты. Представлены результаты нейтронно-физических расчетов активной зоны реактора ИВГ.1М. с 1975 по 2013 гг. с учетом периодов пусков и простоев между пусками, и результаты по определению влияния отравления бериллия на реактивность. Результаты показывают, что периоды останова реактора сильно влияют на накопление гелия-3 в бериллиевых блоках, которое, в свою очередь, изменяет спектр нейтронов. Время останова не оказывает непосредственного влияния на концентрацию лития б. Основное накопление отравляющих веществ происходит не в периферийных зонах отражателя, а в бериллиевых межканальных вытеснителях, расположенных непосредственно около водоохлаждаемых каналов. Результаты расчетов могут быть использованы для оценки нейтронно-физических характеристик реактора в течении длительного времени. Расчетная модель с уточненными примесями материалов бериллиевых вытеснителей и отражателя может быть использована для получения более точных результатов при расчетах.

Ключевые слова:

Реактор ИВГ.1М, отравление, бериллий, скорость реакций, нейтронно-физические расчеты.

Повреждение бериллия в процессе его использования в ядерных реакторах происходит в результате протекания в нем двух первичных процессов: упругого взаимодействия нейтронов с ядрами и ядерных реакций. Облучение бериллия потоком нейтронов с энергией от 0,7 до 20 МэВ приводит к образованию изотопов лития (${}^6\text{Li}$), трития (${}^3\text{H}$) и гелия (${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$) в результате реакций (n, α) и $(n, 2n)$. Долговременное накопление газов гелия и трития производит эффект вздутия в бериллиевых блоках, а образовавшиеся ${}^3\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$, вызванные реакцией ${}^9\text{Be}(n, \alpha)$, имеют большое сечение поглощения. Эти процессы происходят и во время пусков, и во время простоев, и в конечном итоге влияют на характеристики реактора, внося отрицательные значения реактивности и изменения в распределение плотности потока тепловых нейтронов [1–13].

Объектом исследования являлись бериллиевые блоки вытеснителей и отражателей АЗ реактора ИВГ.1М [14, 15], графическое представление модели АЗ реактора приведены на рис. 1, 2. Расчетная модель построена с помощью программы MCNP5 [16], относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5,6 [17].

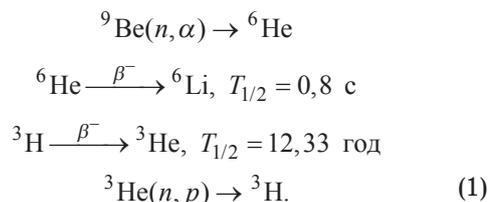
При подготовке расчетной модели учтены характерные особенности конструкции тепловыделяющей сборки водоохлаждаемого технологического канала (ВОТК), АЗ и органов регулирования, температурные режимы элементов конструкции реактора, включены программные опции, наилуч-

шим образом моделирующие процессы взаимодействия нейтронов с веществом. Основные особенности расчетной модели приведены ниже:

- тепловыделяющая сборка ВОТК, отражатели, вытеснители, регулирующие барабаны (РБ) и центральный экспериментальный канал (ЦЭК) заданы гетерогенной структурой;
- задано двухзонное профилирование тепловыделяющей сборки по радиусу;
- температура топлива и конструктивных элементов реактора принята равной 293 К;
- предусмотрена возможность изменения положения стержней системы, компенсирующей реактивность и изменения углового положения РБ от 0 градусов (поглощающие элементы направлены в сторону АЗ) до 180 градусов (поглощающие элементы направлены в противоположную сторону от АЗ). Вращение РБ осуществляется по часовой стрелке при виде сверху на реактор.

Основные уравнения

Для нейтронов с энергией $E \geq 0,71$ МэВ [18] идет реакция (n, α) , которая приводит к серии реакций:



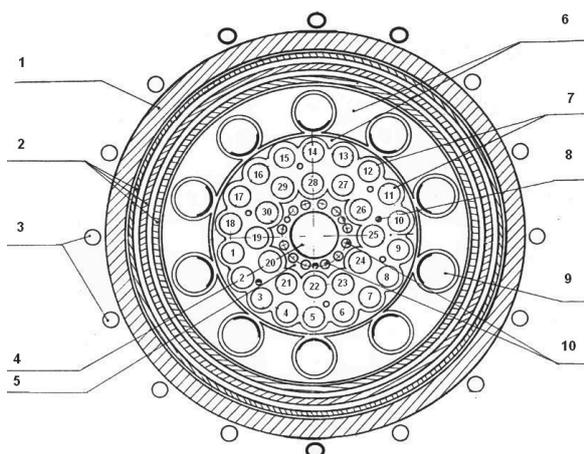


Рис. 1. Схема поперечного сечения реактора ИВГ.1М: 1) корпус; 2) боковые экраны; 3) ионизационные камеры; 4) центральная ампула; 5) центральный вытеснитель; 6) отражатель; 7) технологические каналы (ТК); 8) источник нейтронов; 9) регулирующие барабаны (РБ); 10) стержни компенсации реактивности (СКР)

Fig. 1. Scheme of cross section of the IVG.1M reactor: 1) body; 2) side walls; 3) ionization chamber; 4) central ampule; 5) central displacer; 6) reflector; 7) process channel; 8) neutron source; 9) control drums; 10) reactivity compensation rods

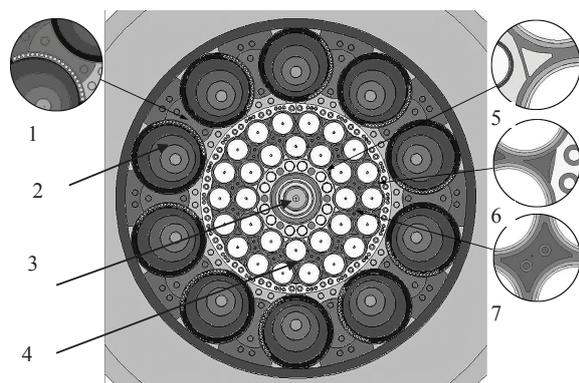


Рис. 2. Бериллиевые блоки в активной зоне реактора ИВГ.1М в расчетной модели: 1) отражатель; 2) регулирующие барабаны; 3) центральный вытеснитель; 4) боковой вытеснитель; 5) малые межканальные треугольные вытеснители; 6) межканальные треугольные вытеснители; 7) межканальные вытеснители

Fig. 2. Beryllium blocks of core of the IVG.1M reactor in the design model: 1) reflector; 2) control drums; 3) central displacer; 4) side displacer; 5) small interchannel triangle displacers; 6) interchannel triangle displacers; 7) interchannel displacers

Для нейтронов с энергией $E \geq 2,7$ МэВ [17] идет реакция $(n, 2n)$

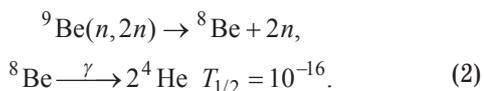


Схема цепочек реакций, происходящих при облучении бериллия, приведена на рис. 3.

Как видно из уравнения (1), некоторое количество бериллия почти сразу же превращается в ${}^6\text{Li}$. Концентрация бериллия, гелия, лития и трития определяется с использованием следующих уравнений [19–23]:

$$\frac{dN_{\text{Be}}}{dt} = -N_{\text{Be}} \cdot \{RR\}_{\text{Be}}; \\ \frac{dN_{\text{L}}}{dt} = N_{\text{Be}} \cdot \{RR\}_{\text{Be}} - N_{\text{L}} \cdot \{RR\}_{\text{L}}; \\ \frac{dN_{\text{T}}}{dt} = N_{\text{L}} \cdot \{RR\}_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} \cdot N_{\text{T}} + N_{\text{He}} \cdot \{RR\}_{\text{He}}; \\ \frac{dN_{\text{He}}}{dt} = \lambda_{\text{T}} \cdot N_{\text{T}} - N_{\text{He}} \cdot \{RR\}_{\text{He}}, \quad (3)$$

где зависимость концентрации N_{Be} от времени не учитывалась для упрощения системы расчета. Подстрочные индексы Be, L, T и He соответствуют ${}^9\text{Be}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$. Постоянная λ_{T} является постоянной распада трития и равна $1,78 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Скорость изотопной реакции $\{RR\}_x$: (n, T) для ${}^6\text{Li}$, (n, p) для ${}^3\text{He}$ и реакция (n, α) для бериллия определяется из следующего уравнения:

$$\{RR\}_x = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \varphi(E, t) \sigma_x(E) dE. \quad (4)$$

Энергетический интервал (E_{\min}, E_{\max}) охватывает полный диапазон энергий нейтронов, а $\sigma_x(E)$ является сечением для соответствующего изотопа x .

В случае, когда нейтронный поток $\varphi(E, t) = 0$ (перерыв в работе реактора), последние два уравнения системы (3) становятся нетривиальными и описывают распад трития и образование ${}^3\text{He}$.

Матрица коэффициентов системы (3) состоит из скоростей реакций изотопов и постоянной распада трития и имеет следующий вид

$$\begin{bmatrix} -\{RR\}_{\text{Be}} & 0 & 0 & 0 \\ +\{RR\}_{\text{Be}} & -\{RR\}_{\text{L}} & 0 & 0 \\ 0 & +\{RR\}_{\text{L}} & -\lambda_{\text{T}} & +\{RR\}_{\text{He}} \\ 0 & 0 & +\lambda_{\text{T}} & -\{RR\}_{\text{He}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Так как скорость реакции для бериллия зависит от величины нейтронного потока с энергией выше 0,7 МэВ, а скорости реакций для ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ – от величины потока тепловых нейтронов, то концентрация гелия и трития сильно зависит от спектра нейтронов в бериллии. Учет изменения потока нейтронов в коэффициентах уравнения $\{RR\}$ делает задачу нелинейной. При проведении данного расчета было сделано допущение, что скорость реакции постоянна.

В уравнениях (3)–(5) не учитывается реакция ${}^9\text{Be}(n, 2n)$. Поэтому образование ${}^4\text{He}$ в результате этой реакции определяется отдельно. Для уравнения (2) образование ${}^4\text{He}$ решается следующей системой уравнений (6)

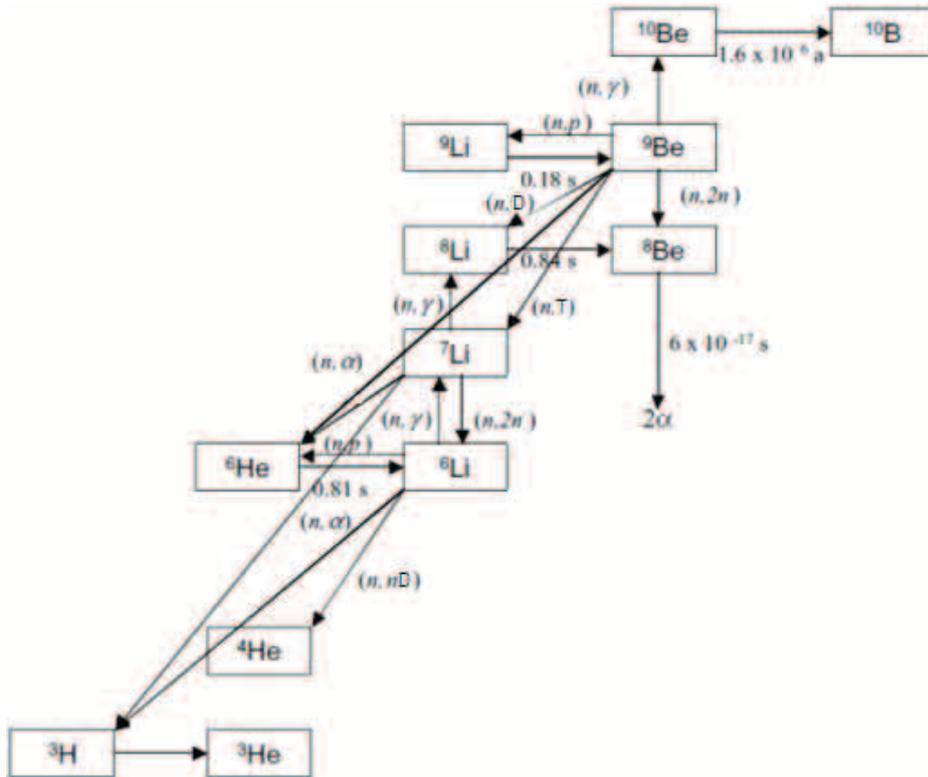


Рис. 3. Схема цепочек реакций, происходящих при облучении бериллия

Fig. 3. Scheme of chains of reactions occurring at beryllium radiation

$$\frac{dN_{\text{Be}}}{dt} = -N_{\text{Be}} \{RR\}_{\text{Be}},$$

$$\frac{dN_{\text{He}}}{dt} = N_{\text{Be}} \{RR\}_{\text{Be}} - N_{\text{He}} \{RR\}_{\text{He}}. \quad (6)$$

Матрица коэффициентов системы (7) имеет следующую форму

$$\begin{bmatrix} -\{RR\}_{\text{Be}} & 0 \\ +\{RR\}_{\text{Be}} & -\{RR\}_{\text{He}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Методы и инструменты вычислений

Решение задачи состояло из двух частей: на первом этапе были выполнены нейтронно-физические расчеты скоростей реакции и плотности потока нейтронов с помощью программы MCNP5; на втором этапе для решения систем 3 и 6 с известными начальными величинами концентраций для бериллия, лития, трития и гелия были использованы соотношения (8)–(10), была разработана программа на языке программирования Visual Basic в среде Excel [24].

$$N_{\text{L}}(t) = N_{\text{L}}(0) \cdot \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\} + \frac{A}{RR_{\text{L}}} \cdot (1 - \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\}), \quad (8)$$

где $A = N_{\text{Be}} \cdot RR_{\text{Be}}$, N_{Be} – константа.

Уравнения для расчета концентраций трития и гелия имеют следующий вид:

$$N_{\text{T}}(t) = a_1 + a_2 \cdot \exp\{-(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}) \cdot t\} + \frac{A \cdot RR_{\text{He}}}{\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}} \cdot t + \frac{(RR_{\text{He}} - RR_{\text{L}}) \cdot (N_{\text{L}}(0) - A / RR_{\text{L}})}{(RR_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} - RR_{\text{He}})} \times \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\}, \quad (9)$$

$$N_{\text{He}}(t) = \frac{\lambda_{\text{T}}}{RR_{\text{He}}} \cdot a_1 - a_2 \cdot \exp\{-(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}) \cdot t\} + \frac{A \cdot \lambda_{\text{T}}}{\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}} \cdot (t - 1 / RR_{\text{He}}) + \frac{\lambda_{\text{T}} \cdot (N_{\text{L}}(0) - A / RR_{\text{L}})}{(RR_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} - RR_{\text{He}})} \cdot \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\}, \quad (10)$$

где α_1 и α_2 – два дополнительных коэффициента:

$$a_1 = \frac{1}{(1 + \lambda_{\text{T}} / RR_{\text{He}})} \times \left[N_{\text{L}}(0) + N_{\text{T}}(0) + N_{\text{He}}(0) - \frac{A}{RR_{\text{L}}} + \frac{(\lambda_{\text{T}} \cdot A / RR_{\text{He}})}{(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}})} \right];$$

$$a_2 = \frac{1}{(1 + RR_{\text{He}} / \lambda_{\text{T}})} \times \left[\frac{RR_{\text{L}}}{(RR_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} - RR_{\text{He}})} \cdot (N_{\text{L}}(0) - A / RR_{\text{L}}) + N_{\text{T}}(0) - \frac{RR_{\text{He}}}{\lambda_{\text{T}}} \cdot N_{\text{He}}(0) - \frac{A}{(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}})} \right];$$

N_{Be} – концентрация бериллия; $N_T(0)$ – концентрация трития в начальный момент времени; $N_{He}(0)$ – концентрация гелия в начальный момент времени; $N_L(0)$ – концентрация лития в начальный момент времени; $N_T(t)$ – концентрация трития в момент времени t ; $N_{He}(t)$ – концентрация гелия в момент времени t ; $N_L(t)$ – концентрация Li (лития) в момент времени t ; RR_L – скорость реакции для Li (лития); RR_{He} – скорость реакции для гелия; λ_T – постоянная распада трития.

Расчет количества гелия и тория

Массовая доля бериллия в блоках составляет не менее 97,8 %. Массовая доля примесей в бериллии приведена в табл. 1.

Таблица 1. Массовая доля примесей в бериллии

Table 1. Impurity index in beryllium

Массовая доля примесей не более, % Impurity index is less than, %								
Fe	Al	Si	Cr	F	O	C	Ti	Сумма (Total) Mg, Mn, Ni, Cu
0,25	0,03	0,04	0,05	0,002	1,3	0,12	0,04	0,08

В качестве начальных условий принято, что литий, тритий и гелий имеют нулевую концентрацию $N_L(0)=N_T(0)=N_{He}(0)=0$, а концентрация бериллия соответствует технической характеристике бериллиевых образцов $N_{Be}(0)=0,1206003$ атом/барн·см. Для последующих периодов времени вычисленные концентрации, рассчитанные на конец текущего периода, использовались как начальные величины концентрации следующего периода.

Для оценки общего количества трития и гелия в бериллиевых блоках использовались сведения о работе реактора с 1975 по 2013 гг. Облучение проводилось с 07.03.1975 г. При проведении расчетов использовалась модель АЗ реактора ИВГ.1М с водяным теплоносителем.

Программа рассчитана на произвольное количество шагов. В каждом шаге точно определяется количество часов работы реактора, за которым сле-

дуют часы простоя. Важно, что расчет изменения ядерной концентрации лития, трития и гелия проводился как во время работы реактора, так и во время простоев. Во время простоев реактора идут процессы распада трития 3H и наработки гелия 3He .

В табл. 2 приведены скорости реакций бериллия, лития, трития и гелия в блоках отражателя и вытеснителей, принятые при решении системы уравнений (3).

Для иллюстрации процессов, происходящих в реакторе, выбран один из малых межканальных вытеснителей (рис. 2), который подвергался сильному влиянию облучения. Все графики изменения концентрации построены для него.

Изменение ядерной концентрации лития и трития, имеющее место во время облучения бериллиевых блоков, представлено на рис. 4.

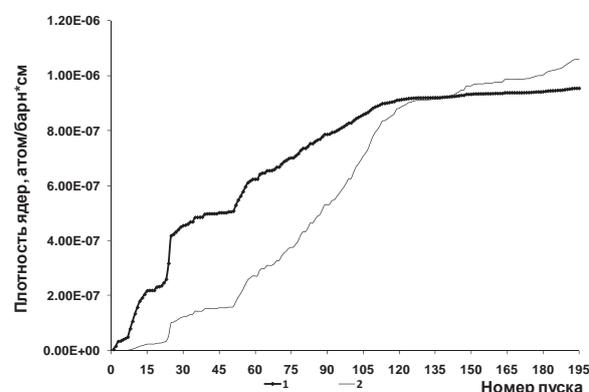


Рис. 4. Изменение ядерной концентрации лития и трития в течение длительной работы реактора без учета распада (1 – литий; 2 – тритий)

Fig. 4. Change of lithium and tritium nuclear concentration at long-term operation of the reactor without reference to decay (1 – lithium; 2 – tritium)

На рис. 5 представлено изменение ядерной концентрации наработанного 4He в течение длительной работы реактора.

Таблица 2. Скорость реакций в бериллиевых блоках

Table 2. Reaction rate in beryllium blocks

Элементы активной зоны Active zone elements	Скорость реакций RR, с ⁻¹ см ⁻³ /RR reactivity, s ⁻¹ cm ⁻³			
	Be	Li	⁴ He	³ He
Отражатель Reflector	1,28351·10 ⁻¹³	1,05114·10 ⁻⁸	2,75826·10 ⁻⁸	5,93592·10 ⁻⁸
Регулирующие барабаны Control drums	1,01014·10 ⁻¹³	7,61473·10 ⁻⁹	2,01145·10 ⁻⁸	4,30012·10 ⁻⁸
Центральный вытеснитель Central displacer	1,29476·10 ⁻¹²	1,35066·10 ⁻⁷	3,54822·10 ⁻⁷	7,62731·10 ⁻⁷
Боковой вытеснитель Side displacer	8,41708·10 ⁻¹³	8,20287·10 ⁻⁸	2,17644·10 ⁻⁷	4,63225·10 ⁻⁷
Малые межканальные треугольные вытеснители Small interchannel triangle displacers	1,89539·10 ⁻¹²	2,06592·10 ⁻⁷	5,57057·10 ⁻⁷	1,16665·10 ⁻⁶
Межканальные треугольные вытеснители Interchannel triangle displacers	1,45091·10 ⁻¹²	1,56001·10 ⁻⁷	4,22042·10 ⁻⁷	8,80953·10 ⁻⁷
Межканальные вытеснители Interchannel displacers	1,83924·10 ⁻¹²	1,97866·10 ⁻⁷	5,29051·10 ⁻⁷	1,11737·10 ⁻⁶

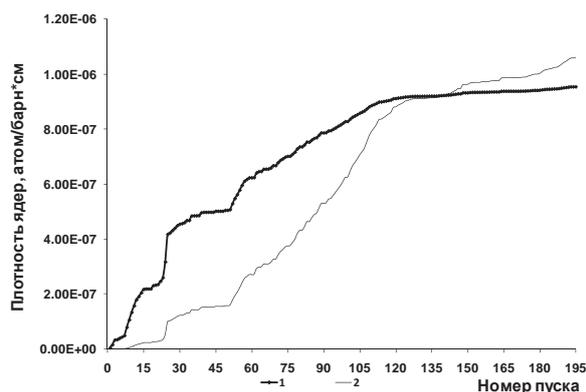


Рис. 5. Распределение ядерной концентрации ^4He в течение длительной работы реактора

Fig. 5. Distribution of ^4He nuclear concentration at long-term operation of the reactor

Из распределений, приведенных на рис. 4 и 5, видно, что плотность ядер в течение приблизительно первых 120 пусков резко возрастает, а затем рост снижается. Это связано с тем, что мощности и время проведения первых пусков были достаточно большими, по сравнению с последующими пусками.

На рис. 6 представлено изменение ядерной концентрации наработанного трития во время длительной работы реактора без учета распада (линия 1) и изменение ядерной концентрации с учетом распада трития в периоды простоя реактора (линия 2).

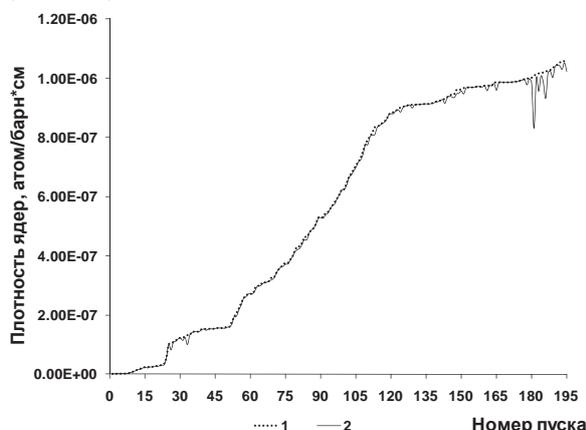


Рис. 6. Изменение ядерной концентрации ядер трития в течение длительной работы реактора: 1) с учетом; 2) без учета распада

Fig. 6. Change of tritium nuclear concentration at long-term operation of the reactor: 1) without; 2) with reference to decay

На рис. 7 представлено изменение ядерной концентрации наработанного ^3He во время длительной работы реактора без учета распада (линия 1) и изменение ядерной концентрации с учетом распада ^3He в периоды простоя реактора (линия 2).

Из распределений, представленных на рис. 6 и 7, видно, что учет распада трития и гелия в те-

чение длительной работы реактора влияет на изменение их ядерных концентраций. Видно, что на протяжении длительного останова реактора (в течение года) между 181 и 182 пусками количество ^3He увеличилось более чем на семь раз.

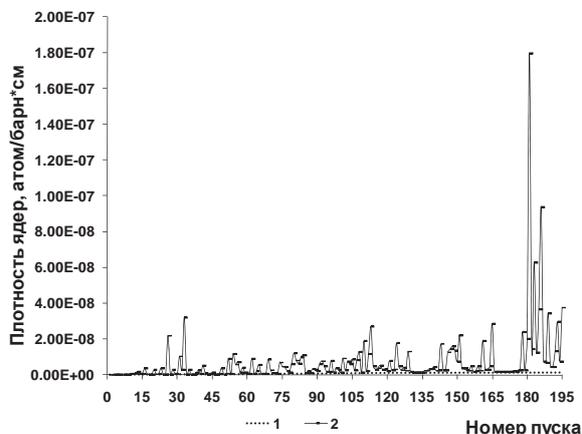


Рис. 7. Распределение плотности ядер ^3He в течение длительной работы реактора: 1) с учетом; 2) без учета распада

Fig. 7. Distribution of ^3He nuclear density at long-term operation of the reactor: 1) without; 2) with reference to decay

Результаты оценки атомной концентрации лития, трития и гелия в бериллиевых блоках отражателя и вытеснителей реактора ИВГ1.М на 2013 г. приведены в виде графика на рис. 8.

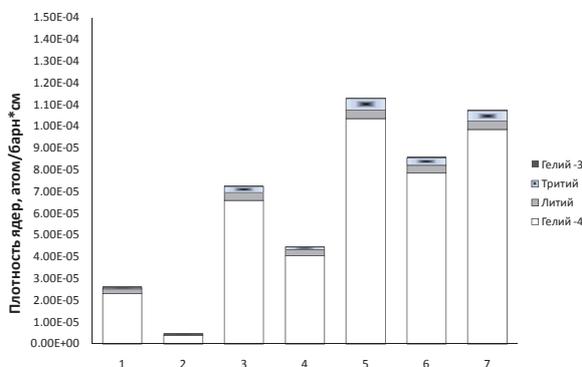


Рис. 8. Концентрации лития, трития и гелия на 2013 г.: 1) отражатель; 2) РБ; 3) центральный вытеснитель; 4) боковой вытеснитель; 5) малые межканальные треугольные вытеснители; 6) межканальные треугольные вытеснители; 7 – межканальные вытеснители

Fig. 8. Concentration of lithium, tritium and helium for 2013: 1) reflector; 2) control drums; 3) central displacer; 4) side displacer; 5) small interchannel triangle displacers; 6) interchannel triangle displacers; 7) interchannel displacers

Из распределений, представленных на рис. 8, видно, что наибольшая концентрация элементов приходится на межканальные вытеснители и треугольники, которые находятся непосредственно рядом с ВОТК.

Нейтронно-физические расчеты

Нейтронно-физические расчеты были проведены с помощью программы MCNP5, с целью определения эффективного коэффициента размножения $K_{эф}$ и запаса реактивности и эффективности РБ в реакторе ИВГ.1М.

В расчетной модели по результатам расчетов концентраций лития, трития и гелия заданы необходимые примеси в материалах бериллиевых блоков вытеснителей и отражателей с учетом работы реактора ИВГ1.М до 2013 г. Результаты нейтронно-физических расчетов с примесями в материалах бериллиевых блоков приведены в табл. 3, для сравнения также приведены данные расчетной модели без примесей.

Таблица 3. Результаты нейтронно-физических расчетов

Table 3. Results of neutronic calculations

Угол разворота РБ Control drum angle	$K_{эф}/C_{эф}$		Запас реактивности, $\beta_{эф}$ Reactivity charge, $\beta_{эф}$		Эффективность РБ, $\beta_{эф}$ Control drum efficiency, $\beta_{эф}$	
	1	2	1	2	1	2
79°	1,00026± 0,00018	1,00887± 0,00020	0,04	1,37	13,83	13,61
0°	0,95879± 0,00018	0,95975± 0,00021	-6,73	-6,55		
180°	1,04771± 0,00015	1,04734± 0,00017	7,12	7,06		

По результатам расчета, приведенным в табл. 3, видно, что уточнение данных материалов бериллиевых блоков приведет к изменению запаса реактивности при развороте регулирующих барабанов, при этом эффективность РБ снижается приблизительно на 1,6 %.

Обсуждение результатов

Исследовательский реактор эксплуатируется с перерывами. Результаты показывают, что периоды останова реактора сильно влияют на накопле-

ние ^3He в бериллиевых блоках, при этом время останова не оказывает непосредственного влияния на концентрацию ^6Li . Однако накопление ^3He изменяет спектр нейтронов и, следовательно, скорость реакции. Это изменение скорости реакции, в свою очередь, влияет на содержание ^6Li в последующие периоды работы реактора.

Отравление бериллия интересно главным образом из-за его влияния на реактивность реактора. Другими словами, важно знать, какое количество ^3He и ^6Li может привести к значительному изменению реактивности реактора. Несомненно, что этот эффект сильно зависит от периодов простоя реактора и основное накопление отравляющих веществ происходит не в периферийных зонах отражателя, а в бериллиевых межканальных вытеснителях, расположенных непосредственно около водоохлаждаемых каналов.

Заключение

1. Создана расчетная модель реактора ИВГ.1М, в которой учтены характерные особенности конструкции. Разработана программа для расчета концентраций трития и гелия в бериллиевых блоках.
2. Выполнены расчеты и сделана оценка влияния отравления бериллиевых блоков на реактивность реактора ИВГ.1М с учетом времени наработки и распада в течение длительной работы реактора (с 1975 г.).
3. Проведенные расчетные исследования позволяют сделать вывод, что отравление бериллиевых блоков приведет к изменению запаса реактивности при развороте РБ 79° на 1,33, при 0° на 0,18, при 180° на 0,06, при этом эффективность РБ снижается приблизительно на 1,6 %.
4. Показано, что на изменение ядерных концентраций гелия (^3He) большое влияние оказывают периоды останова реактора.
5. Определены бериллиевые блоки АЗ с наибольшей концентрацией отравляющих элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koonen E. BR2 Research Reactor Modifications: Experience gained from BR2 Beryllium Matrix Replacement and Second Matrix Surveillance Programme, IAEA-SM-310, AECC-9926 // International Symposium on Research Reactor Safety, Operations and Modifications. – Ontario, Oct. 23–27 1989. – V. 3. – P. 18–22.
2. Влияние отравления бериллия на нейтронно-физические характеристики реактора МИР / О.В. Анисимков и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология. – 1993. – Вып. 1. – С. 49–51.
3. Долотов А.Е., Кузьмин А.В., Куткина И.С. О модели отравления реактора продуктами облученного бериллия // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. докладов 12 Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 294–296.
4. Andrzejewski K.J., Kulikowska T.A., Marcinkowska Z.E. Computations of fuel management in MARIA reactor with highly poisoned beryllium matrix // Nukleonika. – 2008. – V. 53 (4). – P. 173–179.
5. Glasstone S., Sesonske A. Nuclear Reactor Engineering. – New York, USA: D. Van Nostrand Company, Inc., 1967. – 381 p.
6. Khattab K., Sulieman I., Monte Carlo simulation of core physics parameters of the Syrian MNSR reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2011. – V. 38 (5). – P. 1211–1213.
7. Khattab K., Haddad Kh., Haj-Hassan H. Design of a permanent Cd-shielded epithermal neutron irradiation site in the Syrian Miniature Neutron Source Reactor // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2008. – V. 277 (2). – P. 311–316.
8. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. – New York: John Wiley&Sons, 2010. – 860 p.
9. Lamarsh J.R. Introduction to Nuclear Engineering. 3rd ed. – Prentice, UK: Prentice & Hall, 2001. – 783 p.
10. Beryllium as reflector of MNSR / S.T. Muhammad, S. Ahmad, K.S. Chaudri, A. Ahmad // Ann. Nucl. Eng. – 2008. – V. 35. – P. 1708–1712.
11. Renterghem W., Van Leenaers A., Van denBerghe S. TEM investigation of long-term annealed highly irradiated beryllium // J. Nucl. Mater. – 2008. – V. 374. – P. 54–60.

12. Khattab K. Sulieman I., Calculation of the top beryllium shim plate worths for the of the Syrian miniature neutron source reactor // *Progress in Nuclear Energy*. – 2004. – V. 44 (1). – P. 33–42.
13. Omarn H., Ghazi N., Haddad Kh. Ezzuddin Study the effect of beryllium reflector poisoning on the Syrian MNSR // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2012. – V. 70. – P. 988–993.
14. Прозорова И.В. Определение содержания трития и гелия в облученном бериллии // *Ядерная и радиационная физика: Матер. докладов девятой Междунар. конф.* – Алматы: РГП ИЯФ, 2013. – С. 66–69.
15. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований / Э.С. Айтхожин, Ф.М. Аринкин, Г.А. Батырбеков и др.: препринт НЯЦ РК-00–12. – Курчатова: НЯЦ РК, 2000. – 75 с.
16. X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, V. II: User's guide, Los Alamos National Laboratories. Los Alamos, New Mexico, 2003.
17. Van der Marck S.C. Benchmarking ENDF/B-VII.0 // *Nuclear Data Sheets*. – 2006. – V. 107 (12). – P. 3061–3118.
18. Серняев Г.А. Радиационная повреждаемость бериллия. – Екатеринбург: Изд-во «Екатеринбург», 2001. – 396 с.
19. Comparison of nuclear data uncertainty propagation methodologies for PWR burn-up simulations / C.J. Dieza, O. Bussc, A. Hoferc, D. Porschd, O. Cabellosa // *Annals of Nuclear Energy*. – 2015. – P. 101–114.
20. Chandler D. Spatially-Dependent Reactor Kinetics and Supporting Physics Validation Studies at the High Flux Isotope Reactor. PhD diss. – University of Tennessee, 2011.
21. High accuracy tritium measurement for the verification of the tritium production rate calculations with MCNPX / I. Rovnia, M. Sziebertha, L. Palcsu, Z. Majorb, S. Fehera // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2013. – V. 714. – P. 141–146.
22. Comparative validation of Monte Carlo codes for the conversion of a research reactor / V.P. Alferova, A.I. Radaeva, M.V. Shchurovskaya, G.V. Tikhomirova, N.A. Hanan, F.A. Heerdenc // *Annals of Nuclear Energy*. – 2015. – P. 273–280.
23. Brian S., Jeff S. Using Visual Basic. – Indianapolis, USA: Que, 1998. – 860 p.

Поступила 16.06.2014 г.

UDC 621.039.572

INFLUENCE OF BERYLLIUM BLOCKS POISONING ON REACTIVITY OF THE IVG.1M REACTOR

Irina V. Prozorova,

Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan,
10, Krasnoarmeickaya street, Kurchatov, 711100, Republic of Kazakhstan.

E-mail: Prozorova@nnc.kz

The relevance of the discussed issue is caused by the need to evaluate the effect of beryllium blocks poisoning on nuclear reactivity, flux density of thermal neutrons and power distribution of IVG.1M reactor.

The main aim of the study is to evaluate the effect of beryllium blocks poisoning on neutronic characteristics of the IVG.1M reactor.

The methods used in the study. A solution of the problem included two stages: at the first stage the author carried out neutronic calculations of rates of a reaction and the neutron-flux density using MCNP5 program. At the second stage the author developed the program in the programming language Visual Basic in the Excel to solve the systems with known start values of concentrations for beryllium, lithium, tritium and helium.

The results. The paper introduces the results of neutron and physical calculations of the IVG.1M. reactor active zone from 1975 to 2013 taking into account the periods of start-up and idle times between start-ups, and the results of determination of beryllium poisoning effect on reactivity. The results show that the reactor shutdown periods influence significantly on helium-3 accumulation in beryllium blocks. This changes neutron spectrum, in its turn. The shutdown period duration does not influence lithium-6 concentration. Poisoning substances are mostly accumulated not in reflector perimeter zones but in beryllium interchannel displacers near water-cooling channels. The results of calculations can be used to assess neutron and physical characteristics of the reactor during the long time. The design model with the specified impurity of of beryllium displacer materials and a reflector can be used for receiving more exact results at calculations.

Key words:

Reactor IVG.1M, poisoning, beryllium, reaction rate, neutronic calculations.

REFERENCES

- Koonen E. BR2 Research Reactor Modifications: Experience gained from BR2 Beryllium Matrix Replacement and Second Matrix Surveillance Programme, IAEA-SM-310, AECC-9926. *International Symposium on Research Reactor Safety, Operations and Modifications*. Ontario, Oct. 23–27 1989. Vol. 3, pp. 18–22.
- Anisimkov O. Vliyaniye otravleniya berilliya na neytronno-fizicheskie kharakteristiki reaktora MIR [Effect of beryllium poisoning on neutronic characteristics of the MIR reactor]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Yadernaya tekhnika i tekhnologiya – Problems of atomic science and technology. Ser. Nuclear energy technology and technique*, 1993, Iss. 1, pp. 49–51.
- Dolotov A.E., Kuzmin A.V., Kutkina I.S. O modeli otravleniya reaktora produktami oblučennoogo berilliya [The model of reactor poisoning with irradiated beryllium products]. *Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost. Materialy dokladov 12 Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of the twelfth All-Russian scientific and technical conference. Power engineering: ecology, safety, security]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. pp. 294–296.
- Andrzejewski K.J., Kulikowska T.A., Marcinkowska Z.E. Computations of fuel management in MARIA reactor with highly poisoned beryllium matrix. *Nukleonika*, 2008, vol. 53 (4), pp. 173–179.
- Glasstone S., Sesonske A. *Nuclear Reactor Engineering*. New York, USA, D.Van Nostrand Company, Inc., 1967. 381 p.
- Khatab K., Sulieman I., Monte Carlo simulation of core physics parameters of the Syrian MNSR reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, vol. 38 (5), pp. 1211–1213.
- Khatab K., Haddad Kh., Haj-Hassan H. Design of a permanent Cd-shielded epithermal neutron irradiation site in the Syrian Miniature Neutron Source Reactor. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2008, vol. 277 (2), pp. 311–316.
- Knoll G.F. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. New York, John Wiley&Sons, 2010. 860 p.
- Lamarsh J.R. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3rd ed. Prentice, UK, Prentice & Hall, 2001. 783 p.
- Muhammad S.T., Ahmad S., Chaudri K.S., Ahmad A. Beryllium as reflector of MNSR. *Ann. Nucl. Eng.*, 2008, vol. 35, pp. 1708–1712.
- Renterghem W., Van Leenaers A., Van denBerghe S. TEM investigation of long-term annealed highly irradiated beryllium. *J. Nucl. Mater.*, 2008, vol. 374, pp. 54–60.
- Khatab K. Sulieman I., Calculation of the top beryllium shim plate worths for the of the Syrian miniature neutron source reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 2004, vol. 44 (1), pp. 33–42.
- Omarn H., Ghazi N., Haddad Kh. Ezzuddin Study the effect of beryllium reflector poisoning on the Syrian MNSR. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, vol. 70, pp. 988–993.
- Prozorova I.V. Opredelenie sodержaniya tritiya i geliya v oblučennoem berillii [Determination of tritium and helium content in irradiated beryllium]. *Yadernaya i radiatsionnaya fizika. Materialy dokladov devyatoy mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of the ninth International conference. Nuclear and radiation physics]. Almaty, RSE INP Press, 2013. pp. 66–69.
- Aitkhozhin E.S., Arinkin F.M., Batyrbekov G.A. *Reaktornye komplekсы IGR, «Baikal-1», VVR-K i perspektivy razvitiya na ikh baze fundamentalnykh i prikladnykh issledovany: preprint NY-aTs RK-00–12* [The reactor complexes IGR, «Baikal-1», VWR-K and prospects of developing the basic and applied research on their basis: preprint NNC RK-00–12]. Kurchatov, NNC RK Press, 2000. 75 p.
- X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, V. II: User's guide, Los Alamos National Laboratories. Los Alamos, New Mexico, 2003.
- Van der Marck S.C. Benchmarking ENDF/B-VII.0. *Nuclear Data Sheets*, 2006, vol. 107 (12), pp. 3061–3118.
- Sernyaev G.A. *Radiatsionnaya povrezhdaemost berilliya* [Beryllium radiation damageability]. Yekaterinburg, Yekaterinburg Publ., 2001. 396 p.
- Dieza C.J., Busse O., Hoeferc A., Porschd D., Cabellosa O. Comparison of nuclear data uncertainty propagation methodologies for PWR burn-up simulations. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, pp. 101–114.
- Chandler D. *Spatially-Dependent Reactor Kinetics and Supporting Physics Validation Studies at the High Flux Isotope Reactor*. PhD diss. University of Tennessee, 2011.
- Rovnia I., Sziebertha M., Palcsu L., Majorb Z., Fehera S. High accuracy tritium measurement for the verification of the tritium production rate calculations with MCNPX. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, vol. 714, pp. 141–146.
- Alferova V.P., Radaeva A.I., Shchurovskaya M.V., Tikhomirova G.V., Hanan N.A., Heerdenc F.A. Comparative validation of Monte Carlo codes for the conversion of a research reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, pp. 273–280.
- Brian S., Jeff S. *Using Visual Basic*. Indianapolis, USA, Que, 1998. 860 p.

Received: 16 June 2014.