

ОБОБЩЕНИЕ ПРИОБРЕТЕННОГО ОПЫТА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КАНАЛАХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИР-100

П.А. Пономаренко¹, И.Г. Тананаев², С.Д. Стрекалов³, М.А. Фролова¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,

E-mail: frolova-85@mail.ru

²ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,

РФ, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

E-mail: geokhi@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,

РФ, г. Волгоград, пр. В.И. Ленина, д. 28

E-mail: strekalov_sergey@mail.ru

На момент физического пуска исследовательского ядерного реактора ИР-100 (далее – ИР-100) – 1967 год – состояние всех видов и систем безопасности, в том числе радиационной безопасности, соответствовали нормативным документам того времени и воздействие на окружающую среду было сведено к минимуму. Системы контроля и измерений параметров технологических сред остались неизменными. Однако за это время нормативные документы в части касающейся радиационной безопасности и оценки воздействия на окружающую среду стали более жесткими и более конкретными. В связи с этим необходимо постоянно контролировать соответствие экологической и радиационной обстановки места расположения и самого объекта – ИР-100 на соответствие требованиям постоянно изменяющихся документов [1].

Ключевые слова: генерация, радионуклид, экология, исследовательский реактор, контроль, экспериментальный канал, измерения.

Поступила в редакцию: 25.02.2020. После доработки: 16.03.2020.

Введение. При проведении экспериментов количественную оценку поступления радионуклидов в организм персонал не проводит, но, за рабочий день в 8 часов, ингаляционно в организм поступает и облученный воздух объемом примерно 10^7 см³. В связи с этим необходимо оценить нагрузку на организм работников установки путем анализа процесса генерации радионуклидов химических элементов, которые являются составляющими воздушной среды облучательных устройств ядерного исследовательского реактора, а, соответственно, вдыхаемого при вскрытии каналов, воздуха; рассчитать наведенную удельную активность ядрами-продуктами воздушной среды, учитывая, что в вертикальных экспериментальных каналах (ВЭК), находящихся во втором слое графитового отражателя, преобладают нейтроны

тепловых энергий. Более того, облученный воздух после вскрытия каналов по вентиляционной трубе поступает в окружающую среду, что может негативно отразиться на состоянии экологической ситуации в месте расположения объекта.

Постановка задачи. Исследовательский реактор ИР-100 представляет собой ядерный реактор водо-водяного бассейнового типа, на тепловых нейтронах, мощность 200 кВт. Ядерное топливо UO_2 в виде металло-керамических стержней диаметром 7 см и длиной 50 см. Каждый стержень находится в цилиндрической герметичной оболочке диаметром 1 см из алюминиевого сплава АД-1, толщина оболочки – 0,1 см. Эта конструкция представляет собой тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ). Семь ТВЭЛ объединены и размещены в одной конструкции по

треугольной решетке. Такая конструкция называется тепловыделяющей сборкой (ТВС) [2, 3]. В активной зоне находится 46 ТВС.

В принципе, исследовательские реакторы являются источниками полей проникающей радиации (нейтронных и гамма) высокой интенсивности, и служащей для обеспечения облучения в этих полях различных материалов, а также исследования свойств этих новых материалов, которые возникают в результате трансформации исходных. Эти технологические операции должны быть абсолютно безопасными для персонала, который их реализует. Поэтому исследовательские реакторы оборудуются спецустройствами для безопасного облучения. ИР-100 имеет 17 таких экспериментальных устройств различного назначения. В этих устройствах вместе с облучаемой пробой облучается и воздух внутри устройства. Часть экспериментальных

устройств для реализации безопасной технологии облучения герметичны, а часть – нет.

По условиям обеспечения безопасности в негерметичных устройствах спецвентиляция при работе реактора должна работать всегда и, благодаря этому, в негерметичных устройствах поддерживается небольшой вакуум. Поэтому в эти устройства через щели идет подсос чистого воздуха и образующиеся в негерметичных устройствах радиоактивные газы и аэрозоли попасть в рабочие помещения не могут. К герметичным устройствам относятся центральный экспериментальный канал и вертикальные экспериментальные каналы (рис. 1), которые находятся в графитовом отражателе. Последнее свидетельствует о том, что в вертикальных экспериментальных каналах значительно преобладает плотность потока тепловых нейтронов.

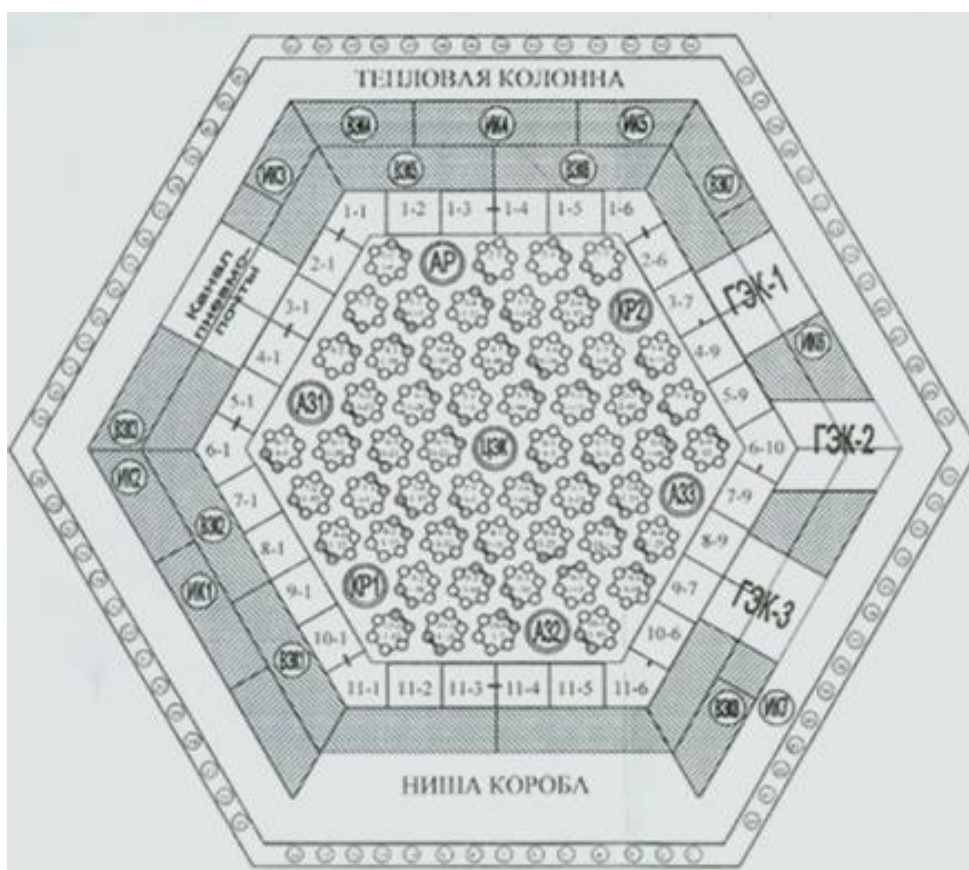


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны реактора ИР-100
 Fig. 1. Cross section of the core of the IR-100 reactor

Все герметичные устройства представляют собой алюминиевые трубы с нижним дном, а верхняя часть трубы закрывается специальной пробкой, при вскрытии которой, сгенерированные в канале за время работы реактора радиоактивные газы и аэрозоли попадают в рабочие помещения и окружающую среду по вентиляционной системе. Вот почему актуальна информация о виде и величине активности накопившихся радиоактивных газов и аэрозолей в этих каналах, и удельной активности воздуха в рабочем помещении, создаваемой газами и золями при вскрытии экспериментального канала, а также оценке экологической обстановки в месте расположения ИР-100. Настоящая статья и посвящена анализу данной информации при работе реактора на номинальной мощности и после его останова. Объектом исследования является воздушная среда одного из экспериментальных каналов (ЭК) – вертикального экспериментального канала ВЭК-4. Для подобных устройств расчет будет производиться по заданному алгоритму.

ВЭК имеет внутренний диаметр $d_{\text{п}}=76$ мм, длина канала $H_{\text{п}} = 3800$ мм, верхняя часть канала закрыта пробкой на глубину $H_{\text{пр}} = 1760$ мм [2, 3], объем воз-

духа внутри канала постоянен и составляет $9,3 \cdot 10^3$ см³. Температура воздушной среды принята 30°C, плотность воздуха при этих условиях – $1,165 \cdot 10^{-3}$ г·см⁻³; масса воздуха – 10,8 г.

Средние данные о качестве севастьяпольского воздуха, который облучается в канале ВЭК-4: средняя влажность воздуха 70 %; абсолютная влажность воздуха при температуре 30°C будет составлять $2,1 \cdot 10^{-5}$ г·см⁻³. Кроме того, атмосферная вода содержит до 300 мг·л⁻¹ хлор-ионов.

Состав облучаемого воздуха в канале ВЭК-4: азот 75,5 масс. %, кислород 23,1 масс. %, аргон 1,29 масс. %, углекислый газ 0,046 масс. %, неон $1,3 \cdot 10^{-3}$ масс. %, гелий $7,2 \cdot 10^{-5}$ масс. %, криптон $2,9 \cdot 10^{-4}$ масс. %, водород $3,5 \cdot 10^{-6}$ масс. %, двуокись азота $7,6 \cdot 10^{-5}$ масс. %, ксенон $3,6 \cdot 10^{-6}$ масс. %, вода в канале составляет 0,2 г, а хлор-ионы – 0,06 мг.

Эти данные позволяют оценить массу и число ядер составляющих воздуха в ВЭК-4 при выбранных условиях, которые облучаются плотностью потока тепловых нейтронов в этом канале (табл. 1).

Число ядер каждого из изотопов рассмотренных химических элементов в воздухе экспериментального канала представлено в табл. 2 [4].

Таблица 1. Расчетные значения массы и числа ядер химических элементов

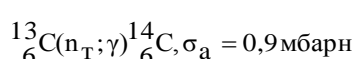
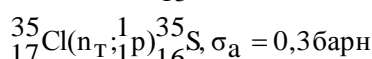
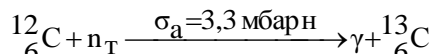
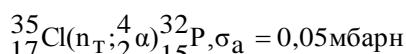
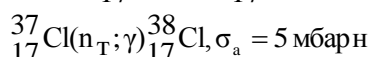
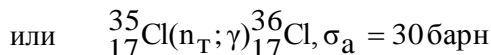
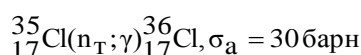
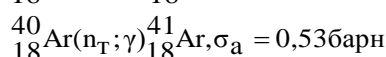
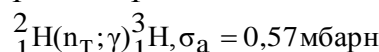
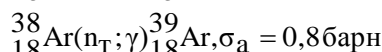
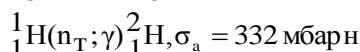
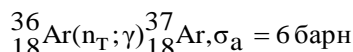
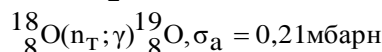
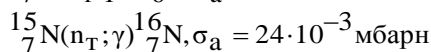
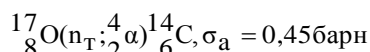
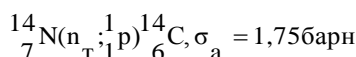
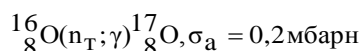
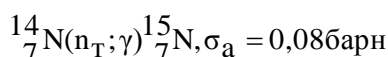
N п/п	Химический элемент	Масса элемента в канале ВЭК-4, г	Число ядер элемента в канале ВЭК-4	N п/п	Химический элемент	Масса элемента в канале ВЭК-4, г	Число ядер элемента в канале ВЭК-4
1	N	8,154	$3,51 \cdot 10^{23}$	10	Cl	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{19}$
2	O	2,5	$9,41 \cdot 10^{22}$	11	CO ₂	0,005	$6,84 \cdot 10^{19}$
3	Ar	0,138	$2,08 \cdot 10^{21}$		C	0,00136	$6,83 \cdot 10^{19}$
4	Ne	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$4,18 \cdot 10^{18}$		O	0,00364	$1,37 \cdot 10^{20}$
5	He	$7,78 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{18}$	12	NO ₂	$8,21 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{17}$
6	Kr	$3,13 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{17}$		N	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{17}$
7	H	$3,78 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{17}$		O	$5,71 \cdot 10^{-6}$	$2,15 \cdot 10^{17}$
8	H ₂ O	0,2	$6,69 \cdot 10^{21}$	13	∑O	2,682	$1,01 \cdot 10^{23}$
	H	0,022	$1,33 \cdot 10^{22}$	14	∑H	0,022	$1,33 \cdot 10^{22}$
	O	0,178	$6,7 \cdot 10^{21}$	15	∑N	8,154	$3,51 \cdot 10^{23}$
9	Xe	$3,88 \cdot 10^{-7}$	$1,78 \cdot 10^{15}$				

Таблица 2. Число ядер каждого из изотопов химических элементов воздуха

Нуклид	Число ядер	Нуклид	Число ядер	Нуклид	Число ядер	Нуклид	Число ядер
$^{14}_7\text{N}$	$3,49 \cdot 10^{23}$	$^{13}_6\text{C}$	$7,59 \cdot 10^{17}$	$^{78}_{36}\text{Kr}$	$7,74 \cdot 10^{14}$	$^{129}_{54}\text{Xe}$	$4,71 \cdot 10^{14}$
$^{15}_7\text{N}$	$1,3 \cdot 10^{21}$	$^{20}_{10}\text{Ne}$	$3,8 \cdot 10^{18}$	$^{80}_{36}\text{Kr}$	$5,02 \cdot 10^{15}$	$^{130}_{54}\text{Xe}$	$7,26 \cdot 10^{13}$
$^{16}_8\text{O}$	$1,01 \cdot 10^{23}$	$^{21}_{10}\text{Ne}$	$1,09 \cdot 10^{16}$	$^{82}_{36}\text{Kr}$	$2,55 \cdot 10^{16}$	$^{131}_{54}\text{Xe}$	$3,77 \cdot 10^{14}$
$^{17}_8\text{O}$	$3,7 \cdot 10^{19}$	$^{22}_{10}\text{Ne}$	$3,69 \cdot 10^{17}$	$^{83}_{36}\text{Kr}$	$2,55 \cdot 10^{16}$	$^{132}_{54}\text{Xe}$	$4,79 \cdot 10^{14}$
$^{18}_8\text{O}$	$2,06 \cdot 10^{20}$	^4_2He	$1,17 \cdot 10^{18}$	$^{84}_{36}\text{Kr}$	$1,26 \cdot 10^{17}$	$^{134}_{54}\text{Xe}$	$1,86 \cdot 10^{14}$
$^{36}_{18}\text{Ar}$	$7,07 \cdot 10^{18}$	^1_1H	$1,33 \cdot 10^{22}$	$^{86}_{36}\text{Kr}$	$3,84 \cdot 10^{16}$	$^{136}_{54}\text{Xe}$	$1,58 \cdot 10^{14}$
$^{38}_{18}\text{Ar}$	$1,31 \cdot 10^{18}$	^2_1H	$2 \cdot 10^{18}$	$^{124}_{54}\text{Xe}$	$1,71 \cdot 10^{12}$		
$^{40}_{18}\text{Ar}$	$2,07 \cdot 10^{21}$	$^{35}_{17}\text{Cl}$	$7,69 \cdot 10^{18}$	$^{126}_{54}\text{Xe}$	$1,6 \cdot 10^{12}$		
$^{12}_6\text{C}$	$6,76 \cdot 10^{19}$	$^{37}_{17}\text{Cl}$	$2,51 \cdot 10^{18}$	$^{128}_{54}\text{Xe}$	$3,42 \cdot 10^{13}$		

Ядерно-химические модели. Схемы ядерно-химических моделей трансформации ядер представленных изотопов

химических элементов в поле тепловых нейтронов в ВЭК--4 будут иметь вид [4, 5]



Анализ ядерно-химических преобразований:

– образовавшиеся дочерние нуклиды: $^{15}_7\text{N}$, $^{17}_8\text{O}$, ^2_1H и $^{13}_6\text{C}$ стабильны, поэтому на радиационную обстановку окружающей среды не влияют и из дальнейшего рассмотрения могут быть исключены;

– образовавшиеся радионуклиды: $^{16}_7\text{N}$, $^{19}_8\text{O}$ имеют малый период полураспада. Такие радионуклиды также из дальнейшего рассмотрения в статье исключаются;

– образовавшиеся радионуклиды: $^{14}_6\text{C}$, ^3_1H , $^{39}_{18}\text{Ar}$, $^{36}_{17}\text{Cl}$ имеют очень большой период полураспада и будут участвовать в дальнейшем анализе;

– часть радионуклидов характеризуются средними периодами полураспада и по классификации относятся к инертным газам: $^{79,83,85,87}_{36}\text{Kr}$, $^{37,40}_{18}\text{Ar}$, $^{125,127,129\text{m},131\text{m},133\text{m},135}_{54}\text{Xe}$. Эти радионуклиды рассматриваются как источник внешнего облучения для объектов биосферы;

– радионуклиды $^{36,38}_{17}\text{Cl}$, $^{32}_{15}\text{P}$, $^{35}_{16}\text{S}$, а также дочерние радионуклиды второго поколения $^{87}_{37}\text{Rb}$, $^{125}_{53}\text{Y}$, $^{135,137}_{55}\text{Cs}$ относятся к радионуклидам внешнего и возможного внутреннего облучения, поэтому рассматриваться будут только нуклиды $^{36,38}_{17}\text{Cl}$, $^{32}_{15}\text{P}$, $^{35}_{16}\text{S}$;

– все дочерние радионуклиды являются низкоэнергетическими бета излучателями.

В виду отсутствия на ИР-100 приборной базы, обладающей достаточной чувствительностью и эффективностью регистрации бета активных компонентов, проведение измерений параметров указанных радионуклидов невозможно.

Во всех ядерно-химических моделях трансформации составляющих воздуха в поле тепловых нейтронов активной составляющей величиной выступает плотность потока тепловых нейтронов. Измерению этой составляющей было отведено на исследовательском реакторе значительное время.

Материалы и методы. Определение плотности потока тепловых нейтронов в ВЭК-4. Работы по измерению плотности потока нейтронов в канале ВЭК-4 проводились под руководством Пономаренко П.А. и при участии Фроловой М.А. [6, 7], результаты которых отражены в [8, 9]. Плотность потока измерялась экспериментально аналитически с помощью набора активационных детекторов, аттестованных Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ): АКН и АКН-Т [10]. Абсолютная плотность потока тепловых нейтронов измерялась дисковыми золотыми детекторами из набора АКН-Т с использованием из этого набора кадмиевых чехлов.

Активность облученного детектора измерялась на аттестованных ВНИИФТРИ гамма-анализаторе АИ-1024 и CANBERRA по измерению гамма-квантов. Бета активность золотого детектора измерялась с помощью торце-

вого счетчика МСТ-17 на аттестованном приборе ПСО-2-4.

В ВЭК-4 нейтронное поле складывается из поля тепловых, замедляющихся и нейтронов спектра деления. Все указанные группы нейтронов облучают золотой детектор и создают активность в нем, пропорционально плотностям потоков каждого вида нейтронов. Чтобы выделить активность, пропорциональную плотности потока только тепловых нейтронов в одной и той же точке пространства ВЭК-4 и при одинаковой мощности нейтронов последовательно облучались два дисковых золотых детектора: один в стандартном кадмиевом чехле, другой – без чехла. Кадмиевый чехол непрозрачен для тепловых нейтронов. Таким образом активность золотого детектора после облучения без чехла пропорциональна плотностям потоков всех нейтронов. Активность золотого детектора, облученного в кадмиевом чехле пропорциональна плотностям потоков, замедляющихся и нейтронов спектра деления. Разность этих двух активностей дает активность, пропорциональную только плотности потока тепловых нейтронов. Используя зависимость, речь о которой пойдет ниже, активности и плотности потока нейтронов, аналитически определялась плотность потока тепловых нейтронов [11–14]. Активность золотого детектора пропорциональна плотности потока тепловых нейтронов, которая использовалась для дальнейших вычислений, является средне арифметическим активностей по гамма- и бета-излучению. По измеренной активности (A) плотность потока тепловых нейтронов вычислялась аналитически по формуле:

$$\varphi_{\text{ТН}} = \frac{A \cdot M \cdot e^{\lambda_{\text{Au}} \cdot t_{\text{выд}}}}{\sigma_{\text{акт}}^{\text{Au}} \cdot N_A \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\text{Au}} \cdot t_{\text{обл}}}\right)}; \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}},$$

где A – измеренная активность детектора, Бк; M – массовое число золота $^{197}_{79}\text{Au}$, г·моль $^{-1}$; λ_{Au} – постоянная распада $^{198}_{79}\text{Au}$, с $^{-1}$; $\sigma_{\text{акт}}^{\text{Au}}$ – сечение активации

золота $^{197}_{79}\text{Au}$, см 2 ; N_A – число Авогадро, моль $^{-1}$; $t_{\text{обл}}$ – время облучения детектора, с; $t_{\text{выд}}$ – время от конца облучения до измерения активности детектора, с.

Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте канала ВЭК-4 определялась с помощью аттестованных ВНИИФТРИ медных детекторов в кадмиевых чехлах и без. Измерение активности медных детекторов осуществлялось по энергии гамма-квантов 0,511 МэВ $^{64}_{29}\text{Si}$ на гамма-анализаторах, указанных выше. Бета-активность медных детекторов измерялась счетчиком МСТ-17 на ПСО-2-4 в области энергий бета-частиц 0,05–0,656 и 0,05–0,573 МэВ.

Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте канала отличается от косинусоидального (как внутри активной зоны), максимум плотности по отношению к геометрическому центру активной зоны сдвинут вверх, и происходит значительное расширение границ нейтронного поля по вертикали.

Путем графического интегрирования кривой распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте воздушного объема ВЭК-4 определялась средняя плотность потока тепловых нейтронов в канале. Она оказалась равной $3,8 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

При всех измерениях плотности потока тепловых нейтронов золотыми и медными детекторами всегда использовался и один серный детектор, как свидетель стабильности в канале ВЭК-4 нейтронного поля.

Кроме этого, экспериментально было установлено, что плотности потока нейтронов тепловых, нейтронов спектра деления и нейтронов с энергией более 3 МэВ в канале ВЭК-4 пропорциональны

$$\begin{cases} \frac{dN_{N-14}}{dt} = -\sigma_a^{N-14} \cdot N_{N-14} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}} \\ \frac{dN_{C-14}}{dt} = \sigma_a^{N-14} \cdot N_{N-14} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}} - N_{C-14} \cdot (\lambda_{C-14} + \sigma_a^{C-14} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}}) \end{cases} \quad (1)$$

Анализ данной системы: если плотность потока тепловых нейтронов принять равной $3,8 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, микросечение активации $^{14}_6\text{C}$ менее 200 мбарн, постоянная распада $3,95 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$, то вы-

тепловой мощности реактора, но с разными коэффициентами пропорциональности

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ТН}}^{\text{ВЭК-4}} &= K_{\text{ТН}}^{\text{ВЭК-4}} \cdot W_{\text{T}}, \\ K_{\text{ТН}}^{\text{ВЭК-4}} &= 1,9 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Вт}}; \\ \varphi_{\text{сд}}^{\text{ВЭК-4}} &= K_{\text{сд}}^{\text{ВЭК-4}} \cdot W_{\text{T}}, \\ K_{\text{сд}}^{\text{ВЭК-4}} &= 3,37 \cdot 10^4 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Вт}}; \\ \varphi_{E \geq 3\text{ММэ}}^{\text{ВЭК-4}} &= K_{E \geq 3\text{ММэ}}^{\text{ВЭК-4}} \cdot W_{\text{T}}, \\ K_{E \geq 3\text{ММэ}}^{\text{ВЭК-4}} &= 7 \cdot 10^3 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Вт}}. \end{aligned}$$

Математические модели ядерно-химических превращений химических элементов в ВЭК-4 [15]. Схемы приведенных моделей ядерно-химических превращений элементов под действием тепловых нейтронов дают качественную картину. Количественный анализ таких трансформаций описывается математическими моделями. В основу математических моделей трансформации ядер исходных изотопов был положен закон сохранения вещества

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{обр}} - \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{убыли}}, \text{ ядер},$$

где $\frac{dN}{dt}$ – скорость изменения числа ядер, составляющих воздуха в канале ВЭК-4.

Например, математическая модель для определения числа ядер $^{14}_6\text{C}$, образовавшегося из $^{14}_7\text{N}$ будет иметь вид:

ражение $(\lambda_{C-14} + \sigma_a^{C-14} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}})$ второго уравнения системы (1) будет равно λ_{C-14} . Применяя аналогичный анализ к математическим моделям в дальнейшем, модели будут иметь общий вид, учитывая,

что в первом уравнении системы описывается процесс бомбардировки ядер-

мишени, а во втором – образование ядер-продукта

$$\begin{cases} \frac{dN_{\text{ядро-мишень}}}{dt} = -\sigma_a^{\text{ядро-мишень}} \cdot N_{\text{ядро-мишень}} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}} \\ \frac{dN_{\text{ядро-продукт}}}{dt} = \sigma_a^{\text{ядро-продукт}} \cdot N_{\text{ядро-продукт}} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}} - N_{\text{ядро-продукт}} \cdot \lambda_{\text{ядро-продукт}} \end{cases} .$$

Таким образом, согласно математическим моделям, в воздухе канала ВЭК-4 под действием тепловых нейтронов получено 8 радионуклидов: $^{14}_6\text{C}$, ^3_1H , $^{37}_{18}\text{Ar}$, $^{39}_{18}\text{Ar}$, $^{36}_{17}\text{Cl}$, $^{38}_{17}\text{Cl}$, $^{32}_{15}\text{P}$, $^{35}_{16}\text{S}$. Актив-

ность каждого радионуклида выражается как $A_i = N_i \cdot \lambda_i$, Бк. С учетом этого решением каждой математической системы будет уравнение вида

$$A_{i\text{я-п}} = \lambda_{i\text{я-п}} \cdot N_{i\text{я-п}} = \frac{\lambda_{i\text{я-п}} \cdot N_{0i}^{\text{я-м}} \cdot \sigma_{i\text{акт}}^{\text{я-м}} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}}}{\lambda_{\text{доч}} + \overline{\varphi_{\text{ТН}}} \cdot \sigma_{i\text{акт}}^{\text{Д}} - \overline{\varphi_{\text{ТН}}} \cdot \sigma_{i\text{акт}}^{\text{Мат}}} \cdot \left[e^{-\overline{\varphi_{\text{ТН}}} \cdot \sigma_{i\text{акт}}^{\text{я-м}} \cdot t_{\text{обл}}} - e^{-(\lambda_{i\text{я-п}} + \overline{\varphi_{\text{ТН}}} \cdot \sigma_{i\text{акт}}^{\text{я-п}}) \cdot t_{\text{обл}}} \right] \cdot \frac{\text{Бк}}{\text{см}^3} \quad (2)$$

где индексом «я-м» обозначено ядро-мишень, а индексом «я-п» – ядро-продукт. После упрощения формула (2) приводится к виду

$$A_{i\text{я-п}} = N_{0i}^{\text{я-м}} \cdot \sigma_{i\text{акт}}^{\text{я-м}} \cdot \overline{\varphi_{\text{ТН}}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{i\text{я-п}} \cdot t_{\text{обл}}}) \quad (3)$$

Формула (3) часто используется в практическом нейтронно-активационном анализе [5]. Анализ наведенной активности в ВЭК-4 выполнялся с использованием упрощенной формулы (3) при различных плотностях потока тепловых нейтронов $\varphi^1=4 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\varphi^2=2 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\varphi^3=10 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и средней плотности потока $\varphi^{\text{ср}}=3,8 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при различном времени облучения (50000 с, 100000 с, 150000 с, 200000 с, 300000 с). Произведен расчет активности генерируемых радионуклидов в канале ВЭК-4 (табл. 3).

Так, при постоянной мощности реактора ИР-100 активность радионуклидов $^{14}_6\text{C}$, ^3_1H , $^{37}_{18}\text{Ar}$, $^{39}_{18}\text{Ar}$, $^{36}_{17}\text{Cl}$, $^{32}_{15}\text{P}$, $^{35}_{16}\text{S}$ в зависимости от продолжительности работы реактора растет; образованными активностями $^{39}_{18}\text{Ar}$, $^{36}_{17}\text{Cl}$ и $^{38}_{17}\text{Cl}$ – их влиянием на окружающую среду можно пренебречь. В табл. 4 представлены результаты аналитических исследований

зависимости активности дочерних радионуклидов, составляющих воздуха в канале ВЭК-4, от времени работы реактора на различных мощностях.

Из данных табл. 4 видно, что:

– при всех рассмотренных в таблице плотностях потоков тепловых нейтронов имеется заметный рост активности дочерних радионуклидов в зависимости от увеличения плотности потока и времени облучения;

– при всех мощностях работы реактора ниже номинальной и временах облучения образованием активности $^{36}_{17}\text{Cl}$, $^{38}_{17}\text{Cl}$, $^{39}_{18}\text{Ar}$ и влиянием на окружающую среду можно пренебречь.

В ходе рассмотрения указанного вопроса выполнен экспериментально-аналитический анализ ядерно-химических трансформаций составляющих воздуха в экспериментальном канале реактора ИР-100 ВЭК-4 под действием плотности потока тепловых нейтро-

нов в зависимости от уровня мощности и времени работы реактора. В результате было установлено:

- количественные ядерные характеристики составляющих воздуха в ВЭК-4 были приняты при температуре воздушной среды равной 30°C и давлении 760 мм Нг;
- плотность потока тепловых нейтронов в ВЭК-4 пропорциональна мощности реактора;
- оценка абсолютных значений плотностей потока тепловых нейтронов и их пространственные распределения в объеме канала были выполнены по методикам и аттестованным техническим средствам ВНИИФТРИ;
- разработаны ядерно-химические модели трансформации составляющих воздуха в ВЭК-4 под действием тепловых нейтронов;
- разработаны, обоснованно упрощены математические модели трансформа-

ций элементно-изотопного состава воздуха в ВЭК-4 и представлено общее решение этих моделей;

- представлены расчетные данные активностей дочерних радионуклидов и их анализ;
- среднее суммарное значение активности в канале генерируемых радионуклидов составляет 55,1 Бк/см³;
- с учетом того, что объем надреакторного помещения № 102 составляет 450 м³ и при отсутствии работающей вентиляции активность воздуха, в том числе вдыхаемого персоналом, увеличивается до 1140 Бк/м³, что не превышает нормативных значений ни по одному из параметров;
- расчетное значение совпадает с экспериментальными данными измерений с помощью прибора РВ-4. При этом отличие результатов измерений составляет ~ 8%.

Таблица 3. Активности радионуклидов, генерируемых в канале ВЭК-4 при стабильной средней плотности потока тепловых нейтронов в зависимости от времени облучения

Радионуклид	$\overline{\varphi_{\text{ТН}}} = 3,8 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$					Допустимая среднегодовая объемная активность, Бк/л [1]
	А, Бк при t=50000с	А, Бк при t=100000с	А, Бк при t=150000с	А, Бк при t=200000с	А, Бк при t=300000с	
¹⁴ ₆ C	45799,02	91598,049	137397,06	183196,1	274794,0411	1,3·10 ³
³ ₁ H	0,038821	0,0776400	0,1164548	0,155266	0,232878342	4,4·10 ⁶
³⁷ ₁₈ Ar	189019,2	375822,04	560434,38	742882	1101384,004	-
³⁹ ₁₈ Ar	1,651181	3,3023555	4,9535230	6,604684	9,90698455	-
³⁶ ₁₇ Cl	0,321075	0,6421501	0,9632251	1,2843	1,926450319	24
³⁸ ₁₇ Cl	1,709327	3,4180427	5,1261454	6,833636	10,24678079	3,5·10 ²
³² ₁₅ P	4,040710	7,9696746	11,789981	15,50464	22,62860068	2,5
³⁵ ₁₆ S	4027,198	8035,8978	12026,181	15998,13	23887,38563	1,5·10 ²

Факт значительного превышения по всем радионуклидам в канале допустимых значений говорит о том, что наведенная активность превалирует именно в воздушной среде канала ВЭК-4, но при вскрытии пробки происходит разбавление с воздушной средой надреакторного помещения, и эта активность в помещении значительно снижается в первые секунды после вскрытия. В конечном

итоге активность по всем радионуклидам в отдельности в надреакторном помещении будет ниже допустимых значений [1]. Расчетные значения активности ³⁹₁₈Ar подтверждены измерениями аэрозольно-газового радиометра РВ-4. Расхождение расчетных значений и практически определенных составило 11%, что позволяет полагать расчетные значения достоверными.

Таблица 4. Активности радионуклидов, генерируемых в канале ВЭК-4 при сменных значениях плотности потока тепловых нейтронов

Радионуклид	$t_{\text{ОБЛ}} = 50\ 000\ \text{с}$				$t_{\text{ОБЛ}} = 100\ 000\ \text{с}$			
	А, Бк		А, Бк		А, Бк		А, Бк	
	при $\varphi_{\text{ТН}} = 4 \cdot 10^{11}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	при $\varphi_{\text{ТН}} = 10^{11}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	при $\varphi_{\text{ТН}} = 5 \cdot 10^{10}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	при $\varphi_{\text{ТН}} = 10^{10}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	при $\varphi_{\text{ТН}} = 4 \cdot 10^{11}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	при $\varphi_{\text{ТН}} = 10^{11}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	при $\varphi_{\text{ТН}} = 5 \cdot 10^{10}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	при $\varphi_{\text{ТН}} = 10^{10}\ \text{н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
$^{14}_6\text{C}$	49414,7	12052,3	6026,18	1205,2	98829,4	24104,74	12052,3	2410,4
^3_1H	0,04188	0,0102	0,00510	0,0010	0,08376	0,0204	0,01021	0,0020
$^{37}_{18}\text{Ar}$	203941,	49741,9	24870,9	4974,1	405492,	98900,5	49450,2	9890,0
$^{39}_{18}\text{Ar}$	1,78153	0,4345	0,21726	0,0434	3,56306	0,8690	0,43452	0,0869
$^{36}_{17}\text{Cl}$	0,34642	0,0844	0,04224	0,0084	0,69284	0,1689	0,08449	0,0168
$^{38}_{17}\text{Cl}$	1,84427	0,4498	0,22491	0,0449	3,68788	0,8994	0,44974	0,0899
$^{32}_{15}\text{P}$	4,35971	1,0633	0,53167	0,1063	8,59885	2,0972	1,04864	0,2097
$^{35}_{16}\text{S}$	4345,13	1059,7	529,894	105,97	8670,31	2114,7	1057,35	211,47

Заключение. Таким образом, цель статьи достигнута: оценена нагрузка на организм работников исследовательского ядерного реактора при выдыхании воздуха, удельная активность которого при вскрытии каналов, наведенная ядрами-продуктами воздушной среды, составляет 7,12 Бк на один вдох. Данную активность будут наводить радиоактивные нуклиды, имеющие наибольший интерес с точки зрения биологической значимости – имеющие большой период полураспада, имеющие большой массовый %, нуклиды биологически активных химических элементов: радиоуглерод, тритий, радиоактивные аргон-37 и 39, хлор-38 и -37, сера-35 и фосфор-35. Полученное значение суммарной удельной активности воздуха надреакторного помещения не превышает допустимых значений норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 и при работе на номинальной мощности требует соблюдения правил техники безопасности и применения средств индивидуальной защиты при работе в безаварийном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 // Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07 июля 2009 года № 47.

2. *Лабораторный практикум по курсу ядерных реакторов и парогенераторов / коллектив авт. под ред. член-корр. АН СССР А.А. Саркисова. ВМФ, 1986. 225 с.*

3. *Черняев С.В. Лабораторные работы на ядерном реакторе «ИР-100». Ч. 1 / под ред. д-ра техн. наук, профессора А.А. Саркисова. Севастополь: Севастопольское высшее военно-морское инженерное училище, 1977. 64 с.*

4. *Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.В. Справочник по ядерно-физическим константам для расчетов реакторов. М.: Изд-во государственного комитета совета министров СССР по использованию атомной энергии, 1960. 279 с.*

5. *Меднис И.В. Справочные таблицы для нейтронно-активационного. Рига: Изд-во Зинатне, 1974. 410 с.*

6. *Измерение плотности потока тепловых нейтронов с помощью аттестованного набора АКН-Т. Методические рекомендации [Текст]: отчет о НИР: / Мин-во топлива и энергетики Украины, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленно-сти; рук. В.Н. Подтынных; исполн.: П.А. Пономаренко. Севастополь, 2008. 23 с.*

7. *Определение плотности потока тепловых нейтронов при облучении золотых детекторов [Текст]: отчет науч.-техн. / Мин-во топлива и энергетики*

Украины, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности; рук. Подтынных В.Н.; исполн.: Пономаренко П.А. Севастополь, 2008. 28 с.

8. Фролова М.А., Пономаренко П.А., Киеня Е.Н., Тяпкина В.А. Экспериментально-аналитическое измерение плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальных каналах реактора ИР-100 // Сборник научных трудов Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности. 2009. Т. 2, № 30.

9. Пономаренко П.А., Киеня Е.Н., Фролова М.А., Безотосный С.С. Экспериментально-аналитическое измерение плотности потока тепловых нейтронов в отражателе реактора ИР-100 // Сборник научных трудов Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности. 2010. Т. 3, № 35. С. 115.

10. Свидетельство о метрологической аттестации набора активационных комплектов нейтронных тепловых АКН-

Т-3 № 617. Всесоюзный ордена трудового красного знамени научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 1986. 10 с.

11. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., Тихонов Е.Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976. 232 с.

12. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. М.: Атомиздат, 1975. 208 с.

13. Бриксман Б.А. Внутрореакторная дозиметрия: практическое руководство / Б.А. Бриксман, В.В. Генералова, Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин. М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.

14. Климентов В.Б. Активационные измерения потоков и спектров нейтронов в ядерных реакторах / В.Б. Климентов, Г.А. Копчинский, В.В. Фрунзе: Издво стандартов, 1974. 208 с.

15. Левин В.И., Хамьянов Л.П. Измерение ядерных излучений. М.: Атомиздат, 1969. 233 с.

GENERALIZATION OF THE ACQUIRED EXPERIENCE OF THE AIR PARAMETERS MONITORING IN THE EXPERIMENTAL CHANNELS OF THE IR-100 RESEARCH NUCLEAR REACTOR

P.A. Ponomarenko¹, I.G. Tananaev², S.D. Strekalov³, M.A. Frolova¹

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Far Eastern Federal University», RF, Vladivostok, Sukhanova St., 8

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University», RF, Volgograd, Lenin Av., 28

At the time of the physical launch of the IR-100 research nuclear reactor (hereinafter - IR-100), the condition of all types and safety systems, including radiation safety, corresponded to the regulatory documents of that time and the environmental impact was minimized. 40 years have passed since then. The systems for monitoring and measuring the parameters of technological environments have remained unchanged. However, during this time, regulatory documents regarding radiation safety and environmental impact assessment have become more stringent and more specific. In this regard, it became necessary to monitor the compliance of the environmental and radiation conditions of the location and the reactor itself - IR-100 with the requirements of modern documents [1].

Keywords: generation, radionuclide, ecology, research reactor, control, experimental channel, measurements.