

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.55

В.В. Андреев¹, Н.Г. Андреев², А.А. Кувшинова¹, С.Л. Леванов¹, И.С. Худяков¹

РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НЕЙТРОННОГО КОНВЕРТЕРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
АО «ОКБМ Африкантов»²

Проведено расчётно-теоретическое обоснование конструкции нейтронного конвертера. Выполнены нейтронно-физический расчёт установки по программам DOT-III и MCNP-5 и расчёт степени активации материалов по программе DOTActiv. Получены значения мощности дозы на поверхности установки и плотности потока тепловых нейтронов в канале для измерений.

Ключевые слова: нейтронный конвертер, биологическая защита, нейтронная физика, DOT-III, MCNP-5.

В соответствии с программой развития НГТУ как опорного вуза лабораторная установка «Нейтронный конвертер» является базовым направлением развития кафедры ЯРиЭУ и всего ИЯЭиТФ в целом. Нейтронный конвертер - установка, предназначенная для конвертации потока нейтронов в тепловую область спектра. Область применения установки – проведение научно-исследовательских и лабораторных работ.

На начальном этапе реализации проекта, в соответствии с техническим заданием, требовалось расчётно-теоретическое обоснование конструкции конвертера.

При выполнении расчётно-теоретического обоснования были решены задачи определения:

- потока тепловых нейтронов в центральном канале установки;
- мощности дозы излучения на поверхности установки;
- активности материалов установки после окончания срока её эксплуатации.

В ходе работы использованы три расчётные программы: DOT-III [1] и MCNP-5 [2] и DOT-Activ [3]. Данные программы основаны на разных математических методах решения поставленных задач: DOT-III - на методе дискретных ординат, MCNP-5 - на методе Монте-Карло. Именно это позволяет повысить достоверность полученных результатов.

Исходные данные

Основными исходными данными для проведения расчёта являются мощность и спектр плутоний-бериллиевого источника, использованного в конвертере, геометрия установки, ядерные концентрации материалов.

В качестве источников нейтронов предполагается использовать шесть источников типа ИБН-6, представляющих собой герметичные двойные ампулы из нержавеющей стали, заполненные интерметаллическим соединением плутония с бериллием. Мощность каждого нейтронного источника $\sim 5 \cdot 10^5$ нейтр/с в 4π телесный угол [4]. В качестве расчетного был принят спектр Pu-Be источника, приведенный в книге К. Бекурца и К. Виртца «Нейтронная физика» [5]. Оцифрованный спектр представлен на рис. 1.

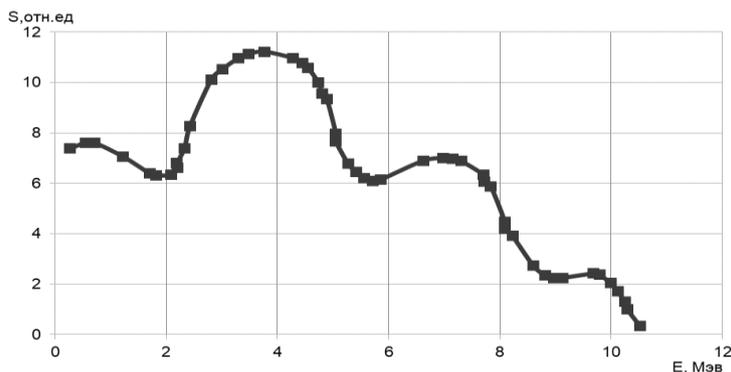


Рис. 1. Оцифрованный спектр Pu-Be источника

Конструктивная схема нейтронного конвертера представлена на рис. 2. Биологическая защита тепловой колонны представляет собой стальные конструкции, заполненные первичным замедлителем (парафином) в месте расположения источников излучения и сплавом парафина с борной кислотой ($31,3\% \text{C}_{30}\text{H}_{62} + 68,7\% \text{H}_3\text{BO}_3$) на периферии. В центре колонны в качестве основного замедлителя использован реакторный графит.

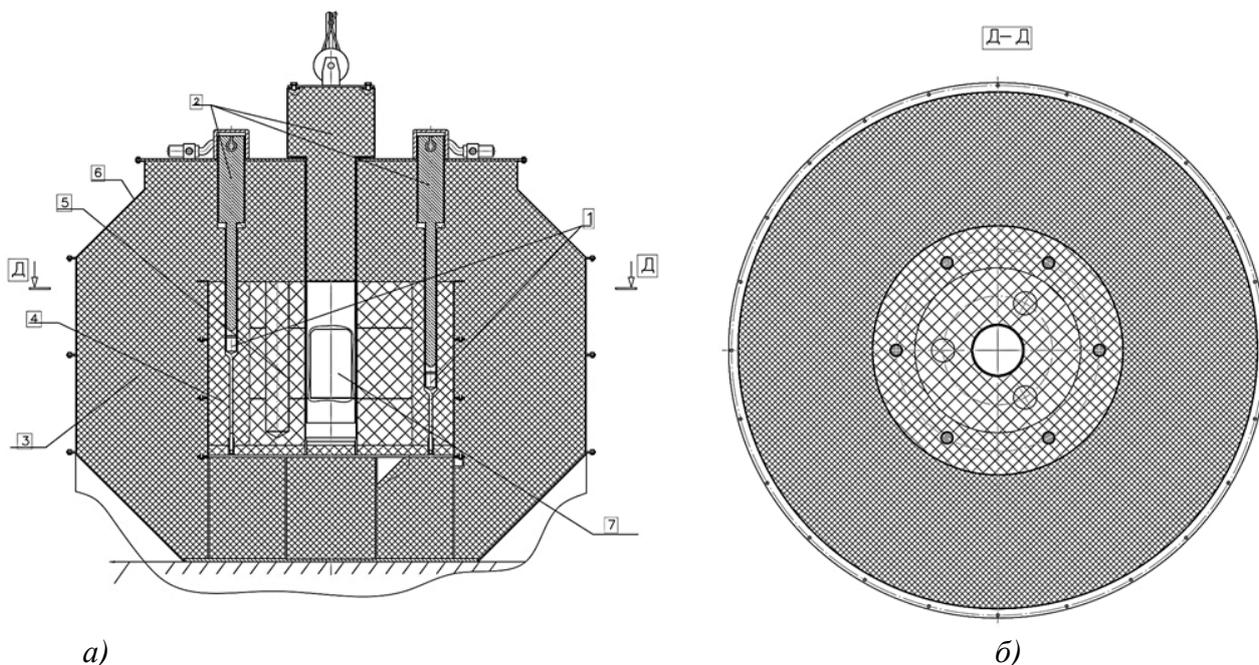


Рис. 2. Конструктивная схема нейтронного конвертера:

а - горизонтальный разрез; *б* - вертикальный разрез;

1 – источники нейтронов; 2 – пробки; 3 – защита; 4 – парафин; 5 – графит;

6 – корпус; 7 – рабочая полость (канал)

Центральный графитовый блок имеет цилиндрическую воздушную «рабочую» полость с линейными размерами, обеспечивающими размещение в ней исследуемых материалов для облучения. Также в конструкции колонны предусмотрен измерительный блок для помещения образцов на разной высоте

Расчёт по DOT-III

При расчете по программе DOT-III спектр излучения Pu-Be источника усреднялся по энергетическим группам библиотеки констант CASK-40 [6]. Определялась мощность дозы на внешней боковой поверхности установки. Так как программа DOT-III выполняет расчет в двухмерной геометрии, был выполнен расчёт моделей в *R-Z* и *X-Y* геометриях. Отметим, что в *R-Z* геометрии невозможно учесть влияние нескольких источников излучения на мощность

дозы, то есть расчёт можно произвести только для одного источника. В X-Y геометрии модели можно произвести расчёт для всех источников, но при этом не будет учитываться конечный размер высоты источника. Чтобы учесть все указанные условия, необходимо провести ряд дополнительных расчётов.

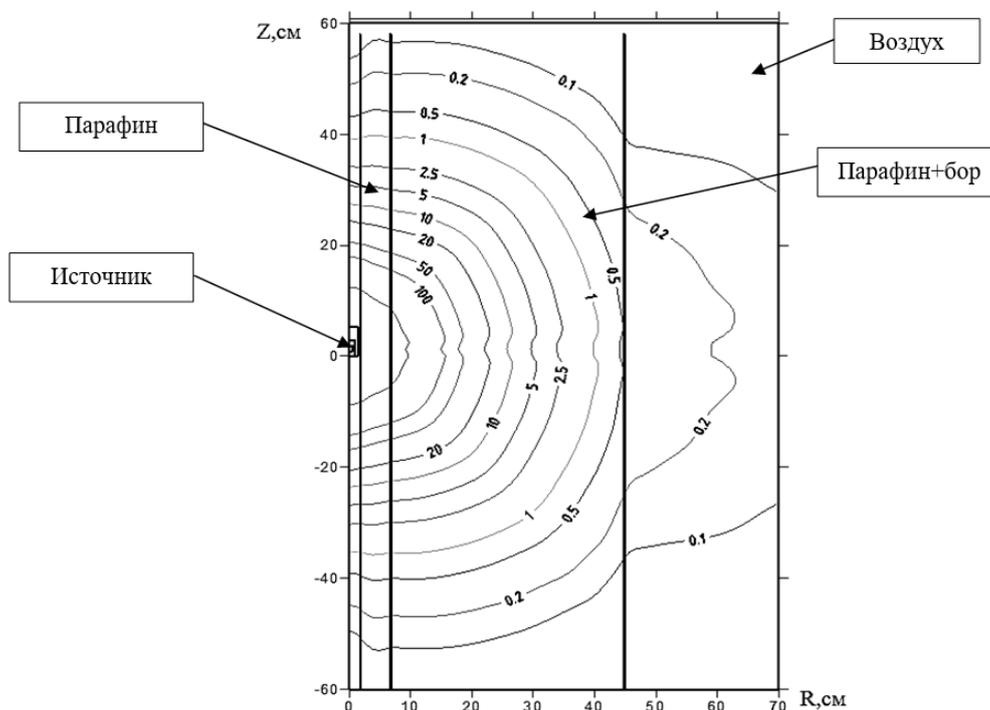


Рис. 3. Распределение суммарной мощности дозы нейтронного и γ -излучения от первого источника (R-Z геометрия), мкЗв/ч

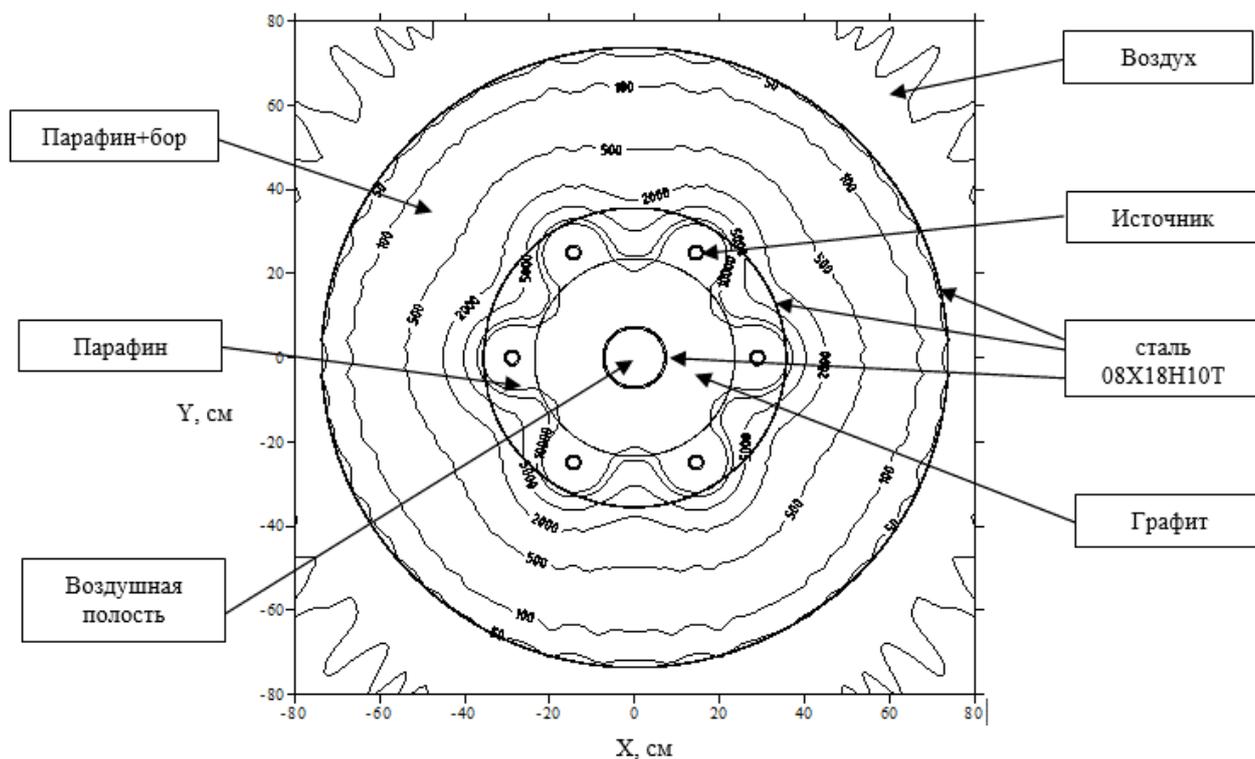


Рис. 4. Распределение суммарной мощности дозы нейтронного и γ -излучения от шестити источников (X-Y геометрия), мкЗв/ч

Схемы расчетных моделей с результатами расчетов суммарной мощности дозы нейтронного и γ -излучения приведены на рис. 3 и рис. 4. Расчеты выполнены с одним источником в $R-Z$ геометрии и с одним и шестью источниками излучения в $X-Y$ геометрии. Расчеты в $R-Z$ геометрии позволяют учесть конечный размер тепловой колонны по радиусу и высоте, а расчеты в $X-Y$ геометрии позволяют учесть влияние шести источников на мощность дозы.

Сравнение результатов расчётов для одного и шести источников в $X-Y$ геометрии позволяет получить коэффициент, показывающий увеличение мощности дозы в зависимости от числа источников. Коэффициент находим по следующей формуле:

$$K = \frac{P_6^{X-Y}}{P_1^{X-Y}},$$

где P_1^{X-Y} и P_6^{X-Y} - мощность дозы в $X-Y$ геометрии для первого источника и для шести источников соответственно.

$$K = \frac{P_6^{X-Y}}{P_1^{X-Y}} = \frac{36,79 \text{ мкЗв/ч}}{23,23 \text{ мкЗв/ч}} = 1,58.$$

Помножив на этот коэффициент результаты, полученные при расчёте в $R-Z$ геометрии, получим значения, отражающие реальную картину распределения излучения:

$$P = K \cdot P_1^{R-Z}$$

где P_1^{R-Z} - мощность дозы в $R-Z$ геометрии для первого источника.

Для вычисления коэффициента были использованы результаты расчета в программе DOT-III.

Мощность дозы на боковой поверхности составляет

$$P = K \cdot P_1^{R-Z} = 1,58 \cdot 0,37 = 0,59 \text{ мкЗв/ч}.$$

При этом мощность дозы γ -излучения – 0,15 мкЗв/ч, нейтронного излучения – 0,44 мкЗв/ч. Полученные значения мощности дозы учитывают количество источников и геометрию тепловой колонны.

Результаты расчёта мощности дозы нейтронного и гамма-излучения представлены в виде изолиний на рис. 3, рис. 4, а также в табл. 1.

Таблица 1
Мощность дозы в средней части внешней боковой поверхности тепловой колонны

Мощность дозы, мкЗв/ч		
нейтроны	гамма-кванты	сумма
0,44	0,15	0,59

Расчёт по MCNP-5

Первым этапом расчета нейтронного конвертера по программе MCNP-5 является построение расчетной модели установки, которую будет обрабатывать расчетный код.

Расчетная модель включает:

- геометрические параметры установки;
- материалы, использованные в установке;
- мощность, спектр и расположение источников нейтронов.

Геометрия расчетной модели установки представляет собой ряд соосных цилиндров, ограниченных сверху и снизу плоскостями, расположенными на разной высоте. В качестве спектра был принят спектр Pu-Be источника (рис. 1) [5].

Исходя из перечисленного и в соответствии с чертежом общего вида, была построена расчетная модель нейтронного конвертера (рис. 5).

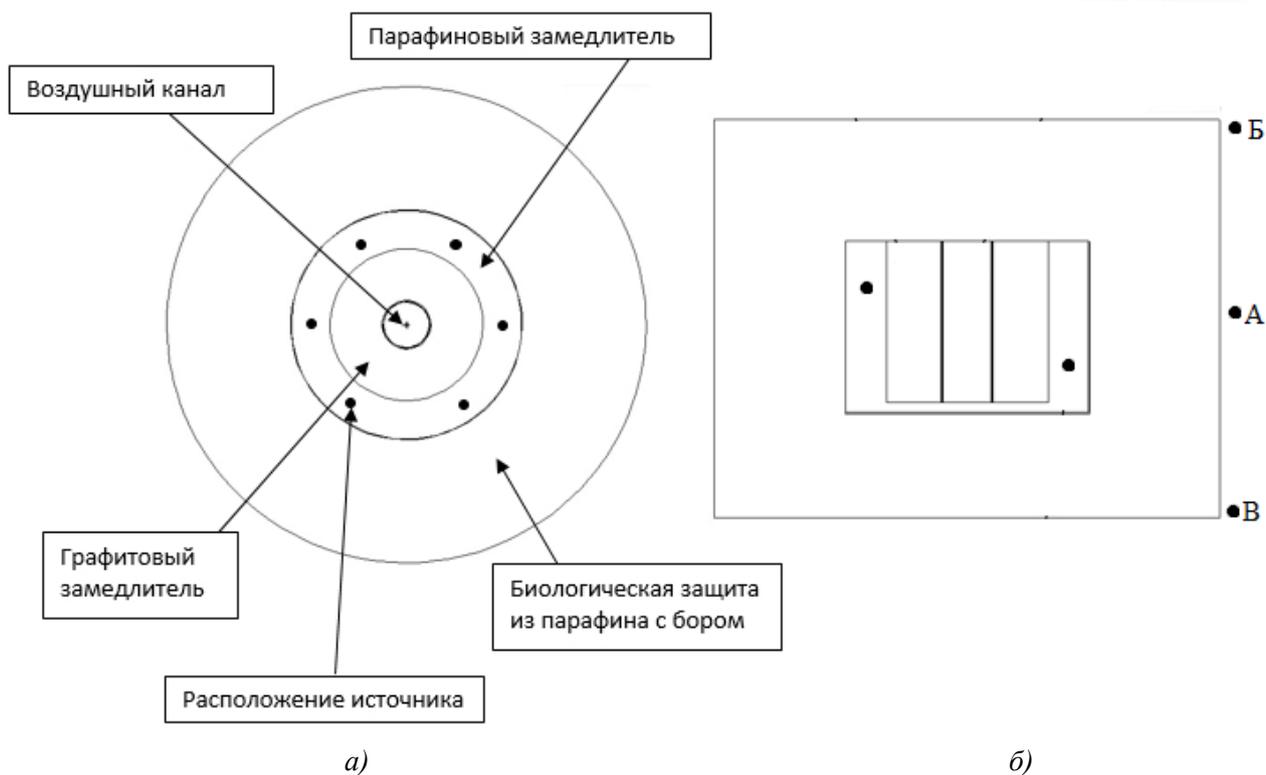


Рис. 5. Расчетная модель установки:
а - горизонтальный разрез; *б* - вертикальный разрез

Расчет распределения потока тепловых нейтронов по высоте центрального канала

Так как в конструкции колонны предусмотрен измерительный блок, который позволяет помещать образцы в центральном измерительном канале на разной высоте, целесообразно построить распределение потока нейтронов по высоте канала. Для этого в центре канала была создана еще одна ячейка, представляющая собой цилиндр диаметром 1 см. Эта ячейка была разбита на 10 сегментов высотой по 5 см. Расчетная модель центрального канала представлена на рис. 6.

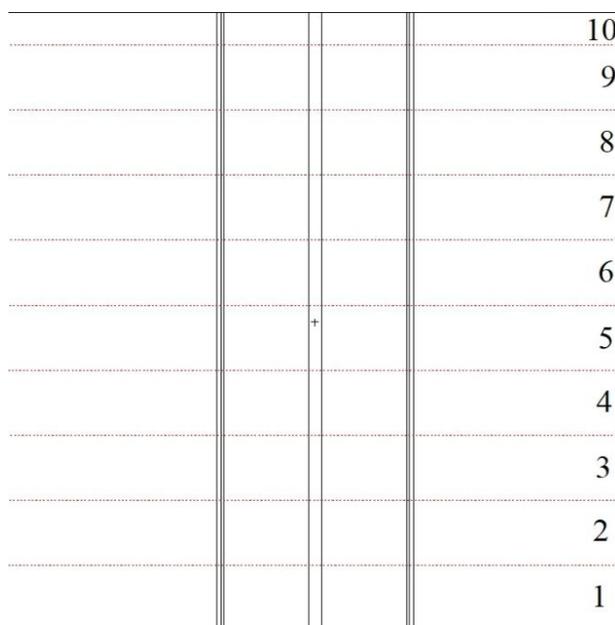


Рис. 6. Расчетная модель центрального канала

В этих ячейках находился средний поток тепловых нейтронов. Распределение потока тепловых нейтронов по радиусу канала в каждом сечении близко к равномерному с небольшим ростом от центра к периферии. Для получения результата необходимой степени точности (среднеквадратичное отклонение $\sigma < 10\%$) было разыграно 50 млн историй. Результаты расчета распределения потока тепловых нейтронов по высоте измерительного канала представлены в табл. 2.

Таблица 2**Распределение потока тепловых нейтронов по высоте центрального канала**

№ сегмента	Высота, см	Поток тепловых нейтронов
1	0-5	318 ± 53 нейтр/см ² с
2	5-10	351 ± 54 нейтр/см ² с
3	10-15	391 ± 53 нейтр/см ² с
4	15-20	417 ± 54 нейтр/см ² с
5	20-25	424 ± 54 нейтр/см ² с
6	25-30	403 ± 54 нейтр/см ² с
7	30-35	350 ± 52 нейтр/см ² с
8	35-40	274 ± 43 нейтр/см ² с
9	40-45	192 ± 36 нейтр/см ² с

Поскольку помещение исследуемых образцов под крышку установки не планируется, результаты расчета потока нейтронов в сегменте 10 не приводятся.

Максимальный поток тепловых нейтронов в измерительном канале составил 424 ± 54 нейтр/см²с. Средний поток тепловых нейтронов по объёму центрального канала равен 331 ± 13 нейтр/см²с.

Несимметричность распределения потока тепловых нейтронов по высоте канала вызвана наличием парафинового замедлителя непосредственно под каналом.

Расчет мощности дозы на поверхности установки

Определение мощности дозы сводится к определению потока нейтронов и фотонов около определенной поверхности с дальнейшим умножением потоков на дозовые коэффициенты. Дозовые коэффициенты использовались из НРБ-99/2009 [7]. Для получения консервативной оценки мощности дозы применялись дозовые коэффициенты при внешнем облучении всего тела в ПЗ геометрии.

Внешняя поверхность установки была разделена на 11 сегментов, в которых определялся поток нейтронов и фотонов для расчета мощности дозы излучения по высоте боковой поверхности. При этом первый сегмент находился в нижней части тепловой колонны.

Результаты расчетов мощности дозы P по высоте боковой поверхности установки представлены в табл. 3.

Таблица 3**Распределение мощности дозы на боковой поверхности по высоте**

№ сегмента	Высота, см	P_n , мкЗв/ч	P_{ph} , мкЗв/ч	P , мкЗв/ч
1	2	3	4	5
3	20-30	$0,13 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,0009$	$0,22 \pm 0,009$
4	30-40	$0,24 \pm 0,013$	$0,12 \pm 0,001$	$0,36 \pm 0,011$

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
5	40-50	$0,37 \pm 0,015$	$0,14 \pm 0,0011$	$0,52 \pm 0,012$
6	50-60	$0,47 \pm 0,018$	$0,16 \pm 0,0011$	$0,62 \pm 0,014$
7	60-70	$0,42 \pm 0,015$	$0,15 \pm 0,0011$	$0,58 \pm 0,012$
8	70-80	$0,31 \pm 0,014$	$0,13 \pm 0,001$	$0,44 \pm 0,011$
9	80-90	$0,19 \pm 0,012$	$0,1 \pm 0,0009$	$0,29 \pm 0,011$

Из анализа результатов расчета видно, что наибольшая мощность дозы от нейтронного и γ -излучения наблюдается в средней части боковой поверхности установки (60-70 см от низа) и составляет 0,62 мкЗв/ч. Результаты расчетов мощности дозы в двух нижних и двух верхних сегментах 1, 2, 10, 11 не приводятся из-за отличия реальной геометрии колонны и геометрии расчетной модели в этой области.

Расчёт активности

Расчётно-теоретическое обоснование конструкции тепловой колонны подразумевает рассмотрение всего жизненного цикла установки, поэтому необходим расчёт активности конструкционных материалов нейтронного конвертера, который был выполнен в программе DOTActiv [3] с использованием модели в X-Y геометрии. Расчёт можно считать консервативным, так как в нем присутствуют шесть источников бесконечной длины, обеспечивающих большую плотность потока нейтронов, чем в реальной установке.

Была использована модель, представленная на рис. 4.

Модель состоит из шести зон:

- зона 1 – воздушная полость;
- зона 2 – источник;
- зона 3 – сталь 08X18H10T;
- зона 4 – парафин + бор;
- зона 5 – парафин;
- зона 6 – графит.

С использованием модели был проведен расчет активации установки при назначенном времени эксплуатации 30 лет (в соответствии с техническим заданием). Полученные результаты были представлены в виде удельных активностей, вычисленных с учетом массы конструкционных материалов в соответствующих зонах.

В табл. 4 приведены удельные активности для радионуклидов, период полураспада которых превышает 2 ч. Удельные активности были вычислены с учетом массы конструкционных материалов в соответствующих зонах.

Таблица 4

Удельная активность изотопов на момент вывода из эксплуатации, Бк/кг

Изотоп	Зона					Сумма
	2	3	4	5	6	
1	2	3	4	5	6	7
Fe ⁵⁵	4,76·10	8,03·10	0	0	0	1,28·10 ²
Fe ⁵⁹	1,42	2,33	0	0	0	3,75
Mn ⁵⁴	3,05·10	1,15·10	0	0	0	4,19·10
Mn ⁵⁶	1,58·10 ²	2,49·10 ²	0	0	0	4,06·10 ²

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
Cr ⁵¹	6,80·10	1,15·10 ²	0	0	0	1,83·10 ²
Co ⁵⁸	6,16·10	2,33·10	0	0	0	8,49·10
Co ⁶⁰	9,10	1,39·10	0	0	0	2,30·10
Ni ⁵⁹	4,17·10 ⁻²	7,06·10 ⁻²	0	0	0	1,12·10 ⁻¹
Ni ⁶³	4,74	8,10	0	0	0	1,28·10
Ni ⁶⁵	8,80·10 ⁻¹	1,47	0	0	0	2,35
C ¹⁴	0	0	2,28·10 ⁻⁴	1,45·10 ⁻³	2,68·10 ⁻³	1,30·10 ⁻²
Сумма	3,82·10 ²	5,05·10 ²	2,28·10 ⁻⁴	1,45·10 ⁻³	2,68·10 ⁻³	9,20·10 ²

Из приведённых результатов видно, что основная часть радионуклидов образуется в зонах 2 и 3 модели, материалом в которых является сталь. Полученные значения активности по каждому изотопу сравнивались с приведенными значениями в ОСПОРБ-99/2010 [8]. В результате было показано, что все величины находятся ниже предела, установленного данным нормативным документом. Следовательно, материалы тепловой колонны после назначенного срока эксплуатации 30 лет не относятся к категории РАО.

Выводы

В ходе расчётно-теоретического обоснования конструкции тепловой колонны были получены распределение потоков тепловых нейтронов в измерительном канале, мощность дозы на поверхности установки и рассчитана активность материалов установки на момент вывода её из эксплуатации. Из двух полученных по различным расчетным кодам значений мощности дозы выбираем наибольшее - 0,62 мкЗв/ч (из консервативных соображений).

В соответствии со ОСПОРБ-99/2010, продолжительность работы с установкой составляет 2000 ч/г. Исходя из этого годовая доза облучения будет составлять 1,24 мЗв, что меньше предельной годовой дозы для персонала группы Б, согласно [7], с учётом коэффициента запаса в соответствии с [8].

Основные результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Основные результаты расчётно-теоретического обоснования конструкции нейтронного конвектора

Параметр	Значения
Максимальный поток тепловых нейтронов в измерительном канале, нейтр/см ² ·с	424±54
Максимальная мощность дозы от нейтронного и гамма излучения на боковой поверхности, мкЗв/ч	0,62
Способ утилизации	Как бытовые отходы

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации программы развития Опорного университета НГТУ им. П.Е. Алексеева.

Библиографический список

1. **Rhoades, W.A.** The DOT III Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Code / W.A. Rhoades, F.R. Mynatt // ORNL TM4280, 1973.
2. X-5 Monte Carlo Team MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. V. I // Overview and Theory LANL. – 2003. – April 24.
3. **Андреев Н.Г., Вавилкин В.Н.** Разработка программы DOT-Activ для расчета источников и уровней излучения остановленного реактора в 2D-геометрии / Н.Г. Андреев, В.Н. Вавилкин // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: сб. ст. X российской науч. конф. – М., 2015.
4. Источники нейтронного излучения. [Электронный ресурс] URL: <http://www.isotop.ru/files/treescontent/nodes/attaches/0/96/noname..pdf>
5. **Бекурец, К.** Нейтронная физика / К. Бекурец, К. Виртц. – М.: Атомиздат, 1968.
6. **CASK**, 40 Groups Coupled Neutron and Gamma ray Cross Section Data. RSIC Data Library DLC23, 1973.
7. СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности НРБ 99/2009. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170553>
8. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). [Электронный ресурс] URL: <http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/inform/instructions/osprb-99-2010.pdf>

Дата поступления
в редакцию 01.06.2018

V.V. Andreev¹, N.G. Andreev², A.A. Kuvshinova¹, S.L. Levanov¹, I.S. Khudiakov¹

**NEUTRON CONVERTER DESIGN CALCULATIONS
AND THEORETICAL UNDERPINNINGS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
JSC OKBM AFRICANTOV, N. Novgorod²

Purpose: The purpose was the theoretical calculation of the converter design at the initial stage of the project implementation.

Design/methodology/approach: We used three calculation programs during the work: DOT-III, MCNP 5 and DOT-Activ. These programs based on different mathematical methods for solving the tasks: DOT-III - on the discrete ordinate method, MCNP-5 - on the Monte Carlo method. This makes it possible to increase the reliability of the results obtained.

Findings: In the course of the theoretical and theoretical substantiation of the thermal column construction, the distribution of thermal neutron fluxes in the measuring channel, the dose rate at the installation surface and the activity of the plant materials at the time of its decommissioning were calculated. From the two values of the dose rate obtained by different calculation codes, we choose the largest - 0.62 $\mu\text{Sv/h}$ from conservative considerations.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the scientific sector.

Originality/value: In accordance with the program of development of the NSTU as a basic university, the laboratory installation "Neutron converter" is the basic direction of the development of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants and the whole of INPEAP as a whole. The field of application of the plant is research and laboratory work.

Key words: neutron converter, biological protection, neutron physics, DOT-III, MCNP-5.