

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА
ИРТ-Т ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ БОР-НЕЙТРОНЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ**

П.А. Молодов, М.Н. Аникин, А.Г. Наймушин

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. А.Г. Наймушин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: molodovpavel@gmail.com

**THE PROSPECTS OF USING IRT-T REACTOR EXPERIMENTAL FACILITIES FOR BORON
NEUTRON CAPTURE THERAPY RESEARCH**

P.A. Molodov, M.N. Anikin, A.G. Naymushin

Scientific Supervisor: associate professor, A.G. Naymushin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: molodovpavel@gmail.com

***Abstract.** Investigation on the use of IRT-T research reactor experimental facilities for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) applications was performed by calculating beam parameters at the horizontal channels' exits. Calculations were performed using MCU-PTR Monte-Carlo code, developed by Kurchatov Institute and verified for IRT-T reactor modeling. It has been established, that HEC-1 channel can be used for BNCT applications if a neutron scatter and an appropriate Beam Shaping Assembly (BSA) are designed and placed into the channel.*

Введение. Лучевая терапия, в которой нуждается не менее 65-70% всех больных злокачественными новообразованиями, является самым востребованным методом противоопухолевого лечения. Лучевая терапия имеет целый ряд серьезных ограничений, поскольку полного уничтожения опухоли можно добиться лишь подведением суммарных доз, заведомо превышающих толерантность нормальных тканей. Одним из методов повышения эффективности лучевого воздействия является использование излучений с высокой линейной передачей энергии. Наиболее перспективным, но, одновременно, и наиболее сложным методом является нейтронзахватная лучевая терапия (НЗТ).

Бор-нейтрон-захватная терапия – бинарная технология лучевой терапии, основанная на возможности изотопа ^{10}B поглощать тепловые нейтроны в результате реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Продукты данной реакции быстро тормозятся и выделяют энергию 2,3 МэВ на длине ~ 10 мкм, что обеспечивает возможность селективного поражения раковых клеток [1].

Для успешной реализации в клинической практике потенциальных возможностей БНЗТ должен быть решен комплекс химических, биологических, медицинских и физико-технических проблем. Основные направления развития метода БНЗТ касаются создания компактных специализированных источников нейтронов, методов определения концентрации бора в тканях в реальном масштабе времени и разработки новых селективных боросодержащих препаратов нового поколения [2]. Для экспериментальных исследований по указанным направлениям на реакторе ИРТ-Т проведено расчетное обоснование возможности использования экспериментальных устройств для целей нейтронзахватной терапии.

Материалы и методы исследования. Реактор ИРТ-Т – исследовательский реактор бассейного типа с использованием в качестве замедлителя, теплоносителя и верхней защиты обессоленной воды и бериллия в качестве отражателя. Реактор предназначен для проведения научно-исследовательских работ по физике твердого тела, нейтронно-активационному анализу элементного состава веществ, производству радионуклидов, легированию кремния, нейтронной радиографии. Реактор имеет 10 горизонтальных экспериментальных каналов (ГЭК) для вывода пучка нейтронов и облучения образцов: 8 радиальных диаметром 100 мм из нержавеющей стали и два касательных диаметром 150 мм. Для облучения за пределами корпуса активной зоны, в водном отражателе, имеется 10 вертикальных каналов из алюминия АД-1 с диаметрами 70, 55 и 25 мм. В некоторых горизонтальных и вертикальных каналах имеются пневмотранспортные устройства.

Для расчетного обеспечения исследований по НЗТ разработана модель исследовательского реактора ИРТ-Т (рисунок 1) в программном комплексе MCU-PTR [3], подробно описывающая реальную геометрию активной зоны реактора и экспериментальных устройств. Программа MCU (Monte-Carlo Universal) разработана в НИЦ «Курчатовский Институт» и предназначена для моделирования процессов переноса излучения (нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов) методами Монте-Карло в 3-D геометрии с использованием библиотек ядерных данных в непрерывном и групповом представлении. Версия MCU-PTR аттестована для расчётов нейтронно-физических характеристик исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т [4].

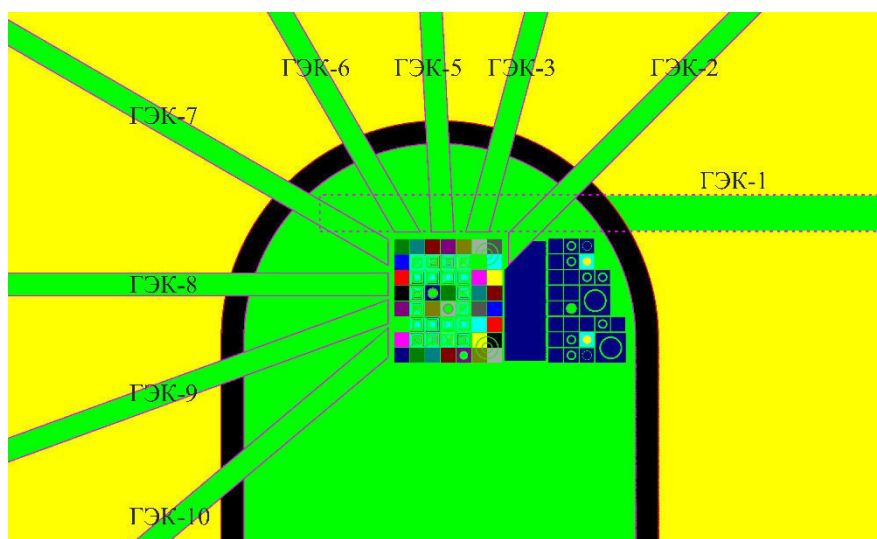


Рис. 1. Модель реактора ИРТ-Т в программе MCU-PTR

Результаты. Для проведения НЗТ мировым сообществом выработаны требования к радиационным характеристикам поля излучения пучка, степень выполнения которых характеризует качество данного пучка по отношению к НЗТ [1]. На основе многовариантных расчетов методом Монте-Карло по программе MCU-PTR были оценены следующие характеристики полей излучений на выходах горизонтальных каналов: плотности потоков тепловых (Φ_T), эпитепловых ($\Phi_{эпн}$) и быстрых ($\Phi_{быстр}$) нейтронов, отношение мощности поглощенной дозы гамма-излучения к плотности потока тепловых/эпитепловых нейтронов (\dot{D}_γ/Φ_T ; $\dot{D}_\gamma/\Phi_{эпн}$), отношение поглощенной дозы быстрых нейтронов к

плотности потока тепловых/эпитепловых нейтронов ($\dot{D}_{\text{быстр}}/\Phi_{\text{т}}$; $\dot{D}_{\text{быстр}}/\Phi_{\text{эпи}}$). Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Плотности потоков 3-х групп нейтронов и мощности доз для горизонтальных каналов

	$\Phi_{\text{т}}$, н/см ² /с	$\Phi_{\text{эпи}}$, н/см ² /с	$\Phi_{\text{быстр}}$, н/см ² /с	$\dot{D}_{\text{быстр}}/\Phi_{\text{т}}$, Гр·см ²	$\dot{D}_{\text{быстр}}/\Phi_{\text{эпи}}$, Гр·см ²	$\dot{D}_{\gamma}/\Phi_{\text{т}}$, Гр·см ²	$\dot{D}_{\gamma}/\Phi_{\text{эпи}}$, Гр·см ²
ГЭК-1	8,41E+08	1,07E+08	1,28E+08	3,78E-10	2,96E-09	2,17E-11	1,70E-10
ГЭК-2	1,98E+09	3,85E+08	6,28E+08	8,98E-10	4,63E-09	1,59E-10	8,17E-10
ГЭК-3	2,78E+09	9,59E+08	2,36E+09	2,51E-09	7,27E-09	1,75E-10	5,06E-10
ГЭК-5	3,80E+09	1,68E+09	3,83E+09	2,94E-09	6,67E-09	1,39E-10	3,14E-10
ГЭК-6	2,52E+09	1,02E+09	2,53E+09	2,96E-09	7,34E-09	2,01E-10	4,99E-10
ГЭК-7	2,42E+09	1,03E+09	2,48E+09	3,01E-09	7,08E-09	1,80E-10	4,25E-10
ГЭК-8	3,46E+09	1,66E+09	3,51E+09	2,94E-09	6,13E-09	1,24E-10	2,59E-10
ГЭК-9	3,50E+09	1,65E+09	3,35E+09	2,74E-09	5,83E-09	1,16E-10	2,46E-10
ГЭК-10	1,62E+09	6,98E+08	1,45E+09	2,60E-09	6,05E-09	1,42E-10	3,30E-10

Заключение. По абсолютным значениям плотностей потоков тепловых и эпитепловых нейтронов касательный канал ГЭК-1 уступает радиальным, что обусловлено большей длиной канала ГЭК-1. Однако, меньший вклад быстрых нейтронов и гамма-квантов делает канал ГЭК-1 предпочтительным вариантом для создания установки НЗТ. С помощью размещения в канале нейтронного рассеивателя и модификатора спектра нейтронов можно значительно улучшить нейтронно-физические параметры установки. Основным недостатком канала ГЭК-1 является его длина, составляющая 4 м. Для сокращения расстояния между активной зоной и выходом канала разрабатывается проект блока вывода пучка с заменой существующего шибера, длиной 1,65 м, на более компактный. Указанные пути модернизация канала позволят создать облучательную установку для проведения широкого спектра исследований в области изучения воздействия теплового пучка нейтронов на клеточные культуры и биологические объекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Current status of neutron capture therapy: IAEA-TECDOC-1223 // Technical reports series. International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2001.
2. Таскаев С. Ю., Каныгин В. В. Бор-нейтронозахватная терапия // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 216 с. – 2016.
3. Alekseev N. I. et al. MCU-PTR program for high-precision calculations of pool and tank type research reactors // Atomic energy. – 2011. – Т. 109. – №. 3. – P. 149-156.
4. Shchurovskaya M. V. et al. Validation of the MCU-PTR computational model of beryllium poisoning using selected experiments at the IRT-T research reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Vol. 113. – P. 436-445.