

**ТЕКУЩИЙ СТАТУС ПРОЕКТА УСТАНОВКИ НЗТ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ЯДЕРНОМ
РЕАКТОРЕ ИРТ-Т**

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 CURRENT STATUS OF BNCT FACILITY AT THE IRT-T RESEARCH REACTOR

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 the IRT-T research reactor as a neutron source for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) has been performed by calculating «in air» parameters at the HEC-1 exit. The designed epithermal neutron flux is $\sim 2 \cdot 10^8$ n/sm²s in air at the beam exit, accompanied by photon and fast neutron absorbed dose rates of 10^{-12} Gy·sm² per one epithermal neutron. Obtained results have shown that the further modernization of the horizontal experimental channel HEC- 1 is necessary for BNCT-applications.*

Введение. В 2015 г. в Российской Федерации выявлено 589 341 случай злокачественных новообразований (в том числе 270 046 и 319 335 у пациентов мужского и женского пола соответственно). Прирост данного показателя по сравнению с 2014 г. составил 4,0%. В структуре смертности населения России злокачественные новообразования занимают второе место (15,5% в 2015 г.; в 2014 г. данный показатель составлял 15,3%) после болезней системы кровообращения [1]. Среди применяемых методов лечения злокачественных новообразований, на сегодняшний день лучевая терапия является наиболее востребованным методом. В свою очередь, одним из перспективных, но одновременно и наиболее трудных методов является нейтрон-захватная терапия (НЗТ).

Отрицательным свойством традиционно используемой конвенциональной лучевой терапии является то, что при облучении опухоли также поражаются здоровые ткани, особенно когда опухоль имеет сложную конфигурацию и локализацию.

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

Нейтрон захватная терапия является перспективным методом лечения агрессивных форм злокачественных опухолей [2], резистентных к существующим методам лучевой терапии, таких как: глиобластомы мозга, метастазы меланомы и др. В стадии изучения находится бор нейтрон захватная терапия рака полости рта, рака щитовидной железы и неонкологическое применение НЗТ – лечение ревматического артрита.

В настоящее время проблемами нейтрон-захватной терапии занимаются практически все страны, на территории которых имеются исследовательские ядерные реакторы. Большое внимание к НЗТ проявлено отечественными исследователями. На исследовательском ядерном реакторе ИРТ-МИФИ создана экспериментальная облучательная база для предклинических исследований НЗТ. Начата эксплуатация радиобиологического канала ГЭК 4 для НЗТ, на котором успешно прошли лечение более 100 домашних животных со спонтанной меланомой, остеосаркомой и другими видами злокачественных новообразований. Разработан проект клинического канала ГЭК-1 на тепловой колонне реактора ИРТ МИФИ для НЗТ. В Обнинске развивается проект медицинского комплекса на реакторе ВВРц и реакторной установке «МАРС».

Для проведения НЗТ мировым сообществом выработаны требования к радиационным характеристикам поля излучения пучка, степень выполнения которых характеризует качество данного пучка по отношению к НЗТ. Критерии качества делятся на первичные и вторичные [3]. Первичные критерии качества «in phantom» характеризуют воздействие излучений пучка на орган или ткань. Это дозиметрические величины в облучаемой опухоли и ткани. Вторичные критерии качества «in air» относятся собственно к излучению пучка, предназначенного для НЗТ. Вторичные критерии определяются по физическим характеристикам поля излучения на выходе пучка. Эти характеристики локализуются в районе операционного поля, но в отсутствии облучаемого объекта. Вторичные критерии качества позволяют сравнивать качество выводимых пучков и непосредственно фигурируют в качестве ограничений в задачах оптимизационных характеристик выводимого пучка. Рекомендуемые МАГАТЭ вторичные критерии качества выводимого пучка:

- Плотность потока эпитепловых нейтронов $\Phi_{epi} > 1,0 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$;
- Мощность поглощённой дозы гамма-излучения на один эпитепловой нейтрон $D_{\gamma} / \Phi_{epi} < 2,0 \cdot 10^{-13} \text{ Гр} \cdot \text{см}^2$;
- Мощность поглощённой дозы быстрых нейтронов на один эпитепловой нейтрон $D_{fast} / \Phi_{epi} < 2,0 \cdot 10^{-13} \text{ Гр} \cdot \text{см}^2$;
- Отношение аксиального тока эпитепловых нейтронов к потоку $J_{epi} / \Phi_{epi} < 0,7$.

Материалы и методы исследования. Для оценки возможности создания установки НЗТ на исследовательском реакторе ИРТ-Т были рассчитаны вторичные критерии качества выводимого пучка с помощью прецизионной программы MCU-PTR [4] в которой была разработана полномасштабная нейтронно-физическая модель активной зоны реактора ИРТ-Т [5], включающая подробную проработку горизонтального канала ГЭК-1, касательного к активной зоне. Целесообразность такого подхода обусловлена тем, что пучок, имеющий лучшие характеристики по вторичным критериям относительно НЗТ, имеет и лучшие характеристики по первичным дозиметрическим характеристикам.

Основные характеристики расчета:

- Константное обеспечение расчета процессов переноса нейтронов и фотонов осуществлено с помощью библиотеки оцененных нейтронно-физических данных MDBPT50.
- Перевод плотности потоков нейтронов и фотонов в дозы был осуществлен с помощью коэффициентов перевода согласно стандарту ANSI/ANS-6.1.1-1977.

- Использование различных способов неаналогового моделирования, для уменьшения дисперсии результатов. К числу таких способов относились расщепление и русская рулетка, использование функций ценности отдельных расчетных ячеек, локальная оценка потока.

Результаты. Плотность потока тепловых нейтронов на выходе из канала составляет $\sim 1 \cdot 10^9$ н/см²с, что позволяет проводить исследования по взаимодействию излучения с клеточными структурами, а также испытывать препараты, содержащие бор и другие сильнопоглощающие элементы на мелких животных. Подобные эксперименты позволят проводить оценки эффективности существующих препаратов для НЗТ.

Расчетная плотность потока эпитепловых нейтронов составляет $\sim 2 \cdot 10^8$ н/см²с. Согласно требованиям к нейтронным пучкам, выработанным мировым сообществом, желательная плотность потока эпитепловых нейтронов должна составлять $\sim 10^9$ н/см²с. Величины $\sim 10^8$ являются приемлемыми, но приводят к значительному увеличению времени облучения пациента. В настоящий момент, используя накопленный мировой опыт в повышении эффективности использования канала для облучения биологических объектов, проводятся расчетные исследования по определению оптимальной конструкции устройств, формирующих выходной пучок нейтронов.

Отношение мощности поглощенной дозы гамма-излучения и быстрых нейтронов на один эпитепловой нейтрон составляют величины порядка 10^{-12} Гр·см².

Заключение. Характеристики выводимого пучка, ориентированные на НЗТ, не удовлетворяют вторичным критериям качества, установка будет конкурентоспособной только после проведения модернизации горизонтального канала ГЭК-1. Используя накопленный мировой опыт в повышении эффективности использования канала для облучения биологических объектов можно значительно увеличить значения вторичных критериев качества. В настоящее время проводится модернизация комплекса биологической защиты горизонтального экспериментального канала ГЭК-1 реактора ИРТ-Т, которая позволит организовать облучательную камеру для проведения широкого спектра работ в области изучения воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты. Также проводятся расчетные исследования по определению оптимальной конструкции устройств, формирующих выходной пучок нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиссов В. И., Старинский В. В., Петрова Г. В. Злокачественные новообразования в России в 2015 году (заболеваемость и смертность) //М.: ФГБУ «МНИОИ им. ПА Герцена» Минздравсоцразвития России. – 2017. – С. 4.
2. Barth R. F. et al. Boron neutron capture therapy of cancer: current status and future prospects //Clinical Cancer Research. – 2005. – Т. 11. – №. 11. – Р. 3987-4002.
3. International Atomic Energy Agency (IAEA), Current status of neutron capture therapy, in IAEA-Tecdoc-1223. 2001, IAEA: Wien.
4. 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. – Р. 149-156.
5. Варлачев В. А. и др. Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т //Томск: Изд-во ТПУ. – 2002.