

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УЧАСТКА ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА  
ДЛЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ**

Е.А. Загуменный, М.Н. Аникин

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: Zeilt@mail.ru

**MATERIALS FOR THE NEUTRON BEAMS SPECTRUM FORMATION FOR NEUTRON-CAPTURE  
THERAPY**

E.A. Zagumennov, M.N. Anikin

Scientific Supervisor: Ph.D. A.G. Naymushin

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

E-mail: Zeilt@mail.ru

***Abstract.** The title of this work is "Materials for the neutron beams spectrum formation for neutron-capture therapy", in which, using the example of existing facilities, materials are considered that are most often used to design a neutron flux filter. As a result of analysis of the material they have identified the positive aspects of their application, as well as and disadvantages that require the use of certain technological solutions. Also were shown technical solutions of the drawbacks. Also in this work was shown that it is possible to construct such device on IRT-T reactor.*

**Введение.** Одной из проблем современного человечества является рак. Несмотря на то, что традиционная методика лечения достигла определенных успехов в борьбе с раковыми заболеваниями, окончательно вылечить все их формы пока не удастся, и альтернативой для существующих методов лечения, может быть нейтрон-захватная терапия (НЗТ), она разработана для избирательного воздействия излучения на опухоль. НЗТ – метод, при котором мощный источник излучения создается непосредственно в нужном месте человеческого организма. При глубоких залеганиях опухоли наиболее перспективным средством лечения являются эпитепловые нейтроны с энергией 0,5 эВ – 10 кэВ [1].

Достаточную для терапии плотность потока нейтронов можно получить на исследовательских реакторах, но, в требуемом спектре нейтронов наряду с эпитепловыми будут присутствовать нейтроны других энергий, а также сопутствующее гамма-излучение. Таким образом, неотъемлемой частью установки для НЗТ является участок формирования спектра – фильтр. Настоящая работа посвящена обзору конструкционных материалов, используемых, в будущем, для создания фильтра реактора ИРТ-Т.

**Материалы и методы исследования.** Поскольку концепция НЗТ существует уже порядка полвека, то научное сообщество определило список материалов, которые являются наиболее подходящими для конструирования фильтра, позволяющего создать пучок нейтронов с необходимым энергетическим спектром.

Одним из самых распространённых материалов по применению является алюминий, т.к. он обладает наиболее приемлемыми значениями общего ядерного сечения нейтронов различных энергий: тепловые нейтроны – максимальное значение 27 бн, эпитепловые – ~1,5 бн, быстрые – пиковые значения,

доходящие до уровня 100 бн [2]. Также, алюминий в металлическом виде не токсичен, т.е. дополнительные меры предосторожности применять не надо. Но следует отметить, что алюминий подвержен радиационному распуханию, и это необходимо учитывать при проектировании фильтра.

Ещё одним распространенным материалом является металлокерамика на основе алюминия и фтора. Благодаря добавлению фтора, у металлокерамики повышается общее значение ядерного сечения, поскольку у фтора: для тепловых нейтронов – 50 бн, для эпитепловых – 3,6 бн, для быстрых – наблюдаются пиковые значения до 136 бн [2]. Также к положительным качествам этого материала следует отнести его высокую радиационную стойкость, и его слабую токсичность [3].

Для отсеивания тепловых нейтронов наилучшим вариантом является кадмий, т.к. значение ядерного сечения для тепловых нейтронов составляет максимум 580 бн [2]. При этом кадмий, как и все металлы, подвержен радиационному распуханию, до 10-20 % от первоначального объёма, что следует учитывать при проектировании фильтра. Металлический кадмий не токсичен, опасны только его пары и растворы. Также следует учитывать, что при захвате тепловых нейтронов кадмий будет выделять гамма-излучение, в дополнение к реакторному, из этого следует, что располагать его следует до защитного слоя от гамма-излучения.

В качестве защиты пациента от вредоносного гамма-излучения применяется уже стандартный материал – свинец. Он сравнительно дешев и методика его применения хорошо отработана. Альтернативой ему могут служить висмут и вольфрам. Но висмут не используют поскольку он крайне токсичен, а вольфрам значительно дороже свинца, что делает установку ещё более дорогостоящей.

На существующей установке «ТАПИРО» фильтр состоит из сплава  $AlF_3$ , а в качестве защиты от нежелательного гамма-излучения используют свинец [4].

На спроектированной отечественной установке для НЗТ «МАРС» фильтр для спектра нейтронов сконструирован из пластинок металлокерамики (56 % F, 43 % Al и 1 % LiF), для защиты пациентов также как и на «ТАПИРО» применяется свинец [5].

ИРТ-Т – ядерный реактор Физико-технического института Томского политехнического университета является водо-водяным аппаратом бассейнового типа, его проект был разработан Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт». В настоящий момент мощность реактора составляет 6 МВт. ИРТ-Т имеет 10 горизонтальных экспериментальных каналов: восемь радиальных диаметром 100 мм, два касательных канала (ГЭК-1 и ГЭК-4) диаметром 150 мм [6].

Оптимальным каналом размещения установки для НЗТ является ГЭК-1, т.к. он является касательным, что значительно уменьшает вклад быстрых нейтронов и гамма-квантов, а это, в свою очередь, существенно снижает негативное воздействие излучения на пациента.

На базе пакета программ MCU-PTR [7] была создана расчетная модель реактора с детальной проработкой существующего канала, после чего проведены расчетные исследования, в результате которых были получены следующие значения: для нейтронов с энергией от 0 до 0,5 эВ плотность потока нейтронов составила  $1,02 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; для нейтронов с энергией от 0,5 эВ до 10 кэВ плотность потока нейтронов –  $1,11 \text{E} \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; для нейтронов с энергией от 10 кэВ и выше –  $1,83 \text{E} \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Из предоставленных результатов видно, что канал ГЭК-1 реактора ИРТ-Т не обладает требуемыми характеристиками для НЗТ, однако обеспечивает высокий общий поток нейтронов. Из этого

можно сделать вывод, что для достижения требуемых параметров по спектру нейтронов нужна модернизация, и одним из её направлений является создание фильтра.

**Заключение.** При выполнении настоящей исследовательской работы на примере зарубежных и отечественных установок для НЗТ определены основные конструкционные материалы, необходимые для получения требуемого спектра нейтронного потока, преимущественного эпитеплогового и без вредоносного гамма-излучения. У каждого материала были выявлены положительные стороны их применения, а также недостатки, которые требуют использования определенных технологических решений.

Наиболее распространёнными материалами для общей фильтрации нейтронов являются алюминий, сплавы алюминия, металлокерамика и т.д. Для устранения нежелательного гамма-излучения используют чаще всего свинец, а для тепловых нейтронов – кадмий и бор [4,5].

Общая цель исследования – проектирование установки для НЗТ, а в последующем её сборка на канале ГЭК-1 реактора ИРТ-Т. Для этого поставлена первичная задача по проектированию фильтра нейтронного потока в канале. Благодаря этому будет получен требуемый спектр потока нейтронов для терапии. В разработке фильтра, будут учтены все современные тенденции по данному вопросу, выбрана оптимальная геометрическая форма и материалы.

Наиболее перспективно видно применение металлокерамики на основе алюминия, в качестве альтернативы можно опробовать сплав –  $Al_2O_3$ . Для защиты от гамма-излучения будет использоваться свинец, а для отчистки спектра нейтронов от тепловых нейтронов – кадмий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулленников Э.Л. Нейтроны и онкология / Э.Л. Кулленников, А.Н. Довбня, С.С. Кандыбей, А.И. Тутубалин, В.В. Красильников // Научные ведомости: математика. Физика. – 2012. – N 23. – С. 151-176.
2. N. Soppera, M. Bossant, E. Dupont, "JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System", Nuclear Data Sheets, Volume 120, June 2014, Pages 294-296.
3. International Atomic Energy Agency. Current status of neutron capture therapy //IAEA-TECDOC-1223. – 2001.
4. Кураченко Ю.А., Моисеенко Д.Н. МАРС и ТАПИРО: реакторы малой мощности для нейтронозахватной терапии / Ю.А. Кураченко, Д.Н. Моисеенко// Известия вузов: ядерная энергетика. – 2010. – N 1. – С. 153-163.
5. Кураченко Ю.А. Реакторные пучки для лучевой терапии: Автореф. дис ... д-ра физ.-мат. наук: – Обнинск, 2008. – 37 с.
6. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1985. – 278 с.
7. 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. – С. 149-156.
8. Борисов Г.И. Физические основы нейтроно-захватной терапии: Автореф. дис ... д-ра физ.-мат. наук: – Москва, 2012. – 50 с.