

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КАНАЛОВ РЕАКТОРА ИРТ-Т ДЛЯ НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

М.Н. Аникин, И.И. Лебедев, А.Г. Наймушин

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*



Представлены результаты нейтронно-физического расчета активной зоны реактора ИРТ-Т по выбору одного из горизонтальных экспериментальных каналов в качестве базы при создании установки для проведения работ в области нейтронозахватной терапии (НЗТ) социально значимых заболеваний. В программном средстве MSU-PTR разработана полномасштабная расчетная модель, включающая в себя детальное описание тепловыделяющих сборок, блоков бериллиевого отражателя, стержней системы управления и защиты, а также всех экспериментальных каналов реактора. В результате проведения расчета получены детальные энергетические спектры нейтронов и фотонов в каждом горизонтальном канале реактора. Поскольку важной характеристикой для НЗТ является минимизация вклада дозы, формируемой быстрыми нейтронами и фотонами, в суммарную дозу, были определены детальные дозиметрические нагрузки в предполагаемой области облучения образцов. Для определения дозиметрических параметров пучка использовались керма-факторы для нейтронов и фотонов с учетом энергетического распределения. Показано, что абсолютные значения плотности потока нейтронов выше в радиальных экспериментальных каналах реактора, однако меньший вклад быстрых нейтронов и фотонов в касательном горизонтальном канале позволяет сделать вывод о том, что касательный канал является предпочтительным для создания установки для проведения НЗТ.

Ключевые слова: нейтронозахватная терапия (НЗТ), лучевая терапия, исследовательский реактор, ИРТ-Т, экспериментальные каналы.

ВВЕДЕНИЕ

Лучевая терапия, в которой нуждается не менее 65% 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 направлений в решении проблемы избирательного поражения злокачественных опухолей и повышения эффективности лучевого воздействия является развитие методики нейтро-

нозахватной терапии (НЗТ) [1].

Нейтронзахватная терапия – бинарная форма радиотерапии, основанная на возможности изотопов ^{10}B или ^{157}Gd поглощать тепловые нейтроны. Терапевтический эффект создается за счет разрыва спиралей ДНК фотонами или тяжелыми заряженными продуктами ядерных реакций нейтронов с радиочувствительными медикаментами [2].

Актуальность внедрения методики НЗТ в клиническую практику обусловлена возможностью селективного поражения раковых клеток при минимальной радиационной и химической травматичности организма пациента. НЗТ является перспективным подходом в лечении ряда злокачественных новообразований, в первую очередь, трудноизлечимых опухолей головного мозга, метастаз меланомы и других новообразований, резистентных к существующим методам лучевой терапии [3].

В качестве источников нейтронов для нейтронзахватной терапии могут служить ядерные реакторы, ускорители и нейтронные генераторы [4]. В связи со значительным развитием технологии НЗТ и широким набором потенциальных источников нейтронов в мировой практике сформированы критерии качества ионизирующего излучения для применения в рассматриваемой области при отсутствии факторов, вносящих возмущения в распределение потоков ионизирующего излучения (табл. 1).

Таблица 1

Значения рекомендованных МАГАТЭ критериев качества [5]

Параметр	Размерность	Значение
Плотность потока эпитепловых нейтронов ($E = 0,5 - 10000$ эВ)	Φ_{epi} ($\text{н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$)	$> 1,0\cdot 10^9$
Доза от быстрых нейтронов, приходящаяся на один эпитепловой нейтрон	D_t / Φ_{epi} ($\text{Гр}\cdot\text{см}^2$)	$< 2,0\cdot 10^{-13}$
Доза от γ -квантов, приходящаяся на один эпитепловой нейтрон	$D_\gamma / \Phi_{\text{epi}}$ ($\text{Гр}\cdot\text{см}^2$)	$< 2,0\cdot 10^{-13}$
Отношение между плотностью потока тепловых и эпитепловых нейтронов	$\Phi_{\text{th}} / \Phi_{\text{epi}}$	$< 0,05$
Отношение тока нейтронов к плотности потока нейтронов	J / Φ_{epi}	$> 0,7$

Наибольший объем медико-биологических исследований и контролируемых клинических испытаний нейтронзахватной терапии был проведен на ядерных реакторах в Брукхейвенской национальной лаборатории (BMRR), Массачусетском технологическом институте (MITR), Нидерландах (HFR), Финляндии (FiR-1), Швеции (R2-0), Чехии (LVR-15), Италии (TAPIRO), Японии (KUR и JRR-4), Аргентине (RA-6) и Тайване (THOR) [6 – 10].

В результате исследований, проведенных во многих мировых научных центрах, были определены основные направления по внедрению метода НЗТ в клиническую практику:

- создание компактных специализированных источников нейтронов;
- разработка методов определения концентрации бора в тканях в реальном масштабе времени;
- разработка селективных борсодержащих препаратов нового поколения.

В этой работе исследуется возможность применения экспериментальных каналов исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т для проведения работ в области нейтронзахватной терапии.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РЕАКТОР ИРТ-Т

ИРТ-Т – исследовательский реактор бассейнового типа с использованием в качестве замедлителя, теплоносителя и верхней защиты деминерализованной воды. Картограмма активной зоны реактора приводится на рис. 1. Подробное описание активной зоны, тепловыделяющих сборок, блоков бериллиевого отражателя и стержневой системы управления и защиты представлены в [11].

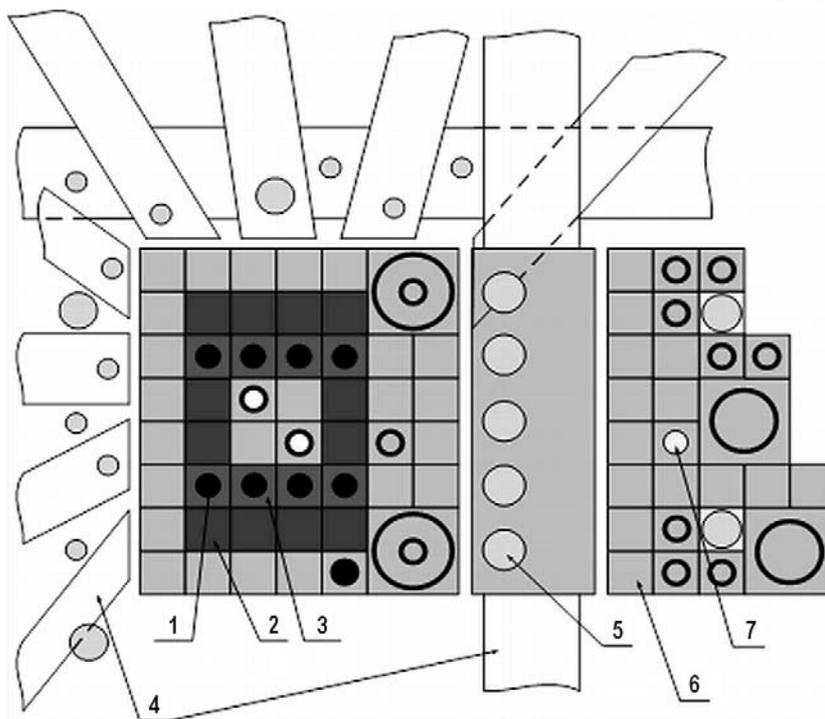


Рис. 1. Схема активной зоны реактора ИРТ-Т: 1 – стержни регулирования; 2 – восьмитрубные ТВС; 3 – шеститрубные ТВС; 4 – горизонтальные экспериментальные каналы; 5 – вертикальные экспериментальные каналы; 6 – бериллиевые блоки; 7 – экспериментальные каналы с водой

Реактор ИРТ-Т является мощным инструментом для проведения широкого круга фундаментальных и прикладных научных исследований по физике твердого тела, нейтронно-активационному анализу, производству радионуклидов, легированию кремния, нейтронной радиографии и т.д. Реактор имеет 14 вертикальных каналов, устанавливаемых за блоками бериллиевого отражателя, и 10 горизонтальных экспериментальных каналов (ГЭК) для вывода пучка нейтронов и облучения образцов – восемь радиальных \varnothing 100 мм из нержавеющей стали и два касательных \varnothing 150 мм.

Касательный канал ГЭК-1 имеет один выход и изготовлен из сплава алюминия САВ-1. Касательный канал ГЭК-4, изготовленный из нержавеющей стали, проходит через весь бак и имеет два выхода – в физический зал и в радиационный павильон.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО MSU-PTR

Программа MSU-PTR, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт», предназначена для прецизионного моделирования процессов переноса нейтронов и фотонов аналоговыми и весовыми (неаналоговыми) методами Монте-Карло на основе оценённых ядерных данных в ядерных реакторах бассейнового типа с учё-

том изменения изотопного состава материалов реактора в процессе эксплуатации. Константное обеспечение MCU-PTR составляет банк нейтронно-физических данных MDBPT50 [12].

Для расчетного обеспечения сопровождения эксплуатации реактора ИРТ-Т и моделирования условий проведения исследований разработана модель исследовательского реактора, подробно описывающая реальную геометрию активной зоны и экспериментальных устройств реактора. Модель реактора включает в себя детально проработанные ТВС, бериллиевые блоки, стержни СУЗ, экспериментальные горизонтальные и вертикальные каналы. На рисунке 2 представлено сечение расчетной модели, полученное при помощи плоттера программы MCU-PTR.

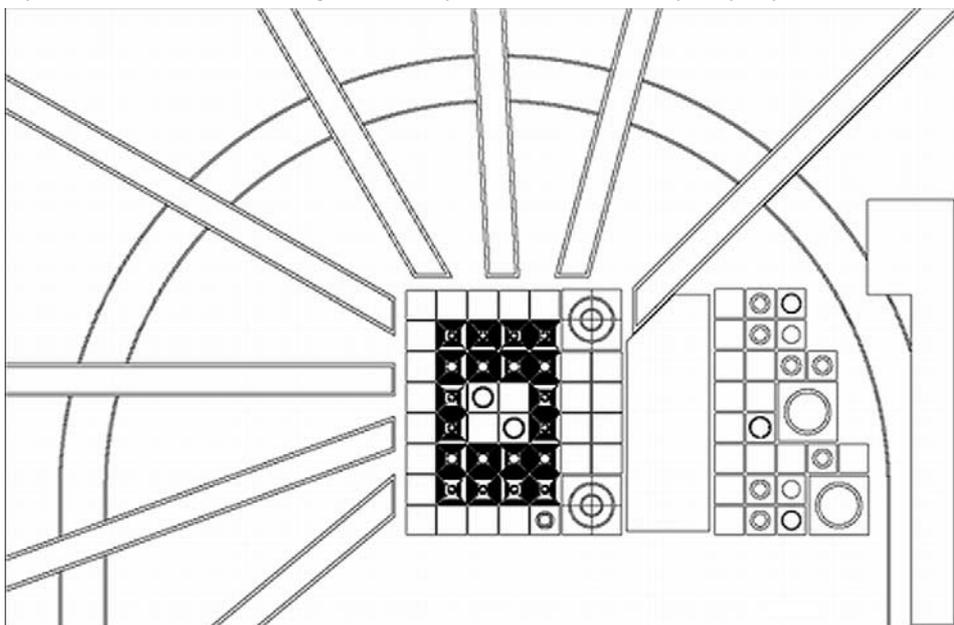


Рис. 2. Сечение расчетной модели активной зоны

В 2015 г. проведена верификация программы MCU-PTR для проведения расчетов исследовательского реактора ИРТ-Т. Получен аттестационный паспорт ПС № 393 от 14.07.2016. Верификация основывалась на сравнении результатов расчета по программе MCU-PTR с эксплуатационными экспериментальными данными реактора ИРТ-Т [13 – 15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки возможности реализации установки для проведения нейтронозахватной терапии был проведен расчет по определению энергетических распределений плотности потока нейтронов и фотонов в каждом из горизонтальных каналов реактора ИРТ-Т (рис. 3, 4). Исключением является ГЭК-4, так как на базе этого канала реализован комплекс по нейтронно-трансмутационному легированию монокристаллического кремния [16].

Величина стандартного отклонения при определении значений плотности потока нейтронов не превышала 1% для тепловых, 10% для эпитепловых и 15% для быстрых нейтронов.

Величина стандартного отклонения при определении значений плотности потока фотонов всех энергий не превышала 10%.

При определении наиболее подходящих экспериментальных каналов и уст-

роиств для создания технологии НЗТ важную роль играет жесткость спектра нейтронов, так как при изначально низких значениях плотности потока быстрых нейтронов потребуются применение меньшего количества фильтрующих компонентов, следовательно, будет наблюдаться малое уменьшение значений плотности потока целевой энергетической группы.

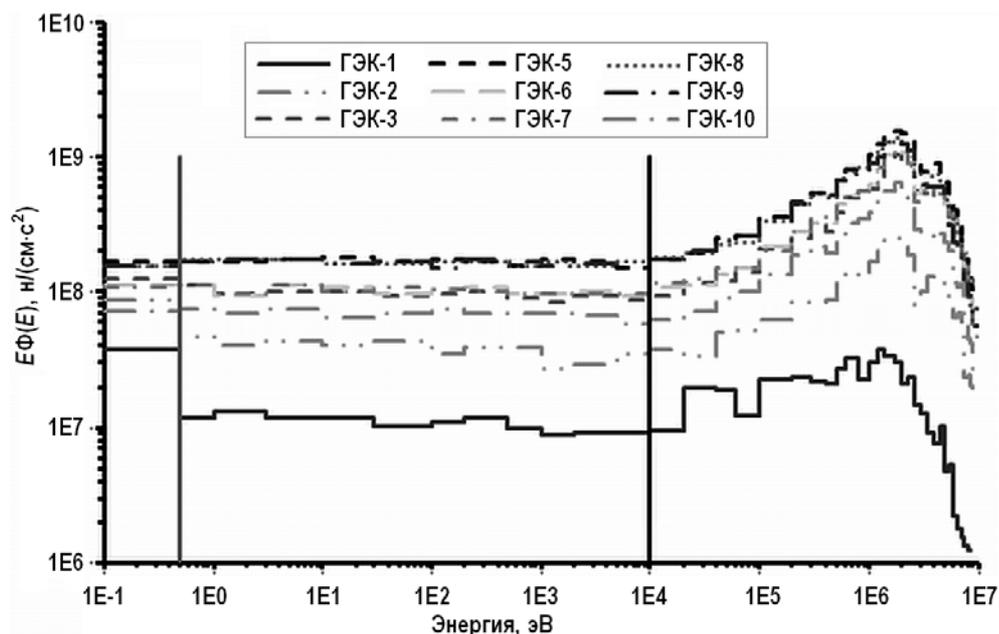


Рис. 3. Энергетическое распределение плотности потока нейтронов на выходе горизонтальных каналов реактора ИРТ-Т

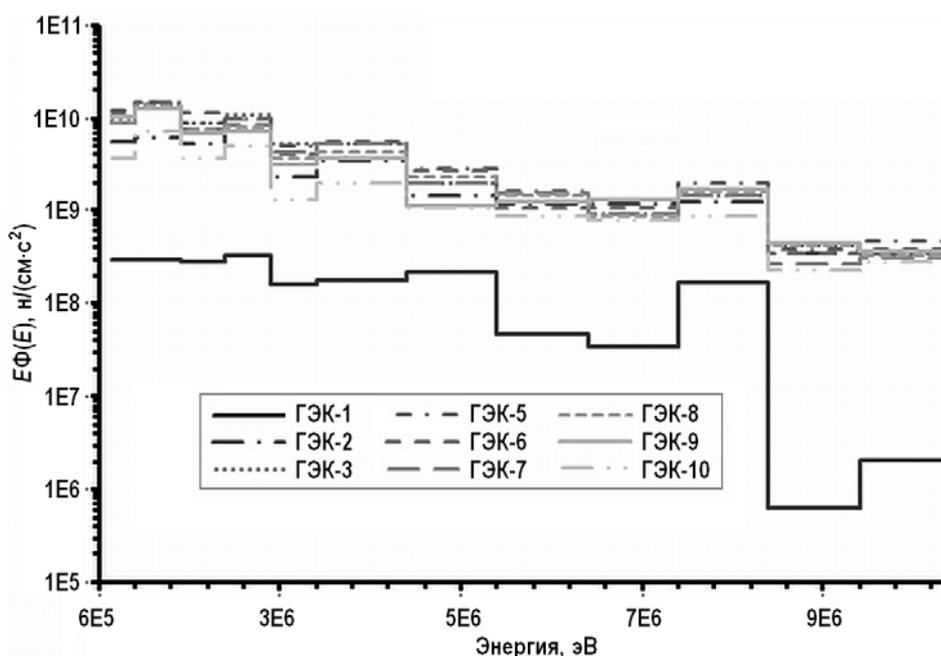


Рис. 4. Энергетическое распределение плотности потока фотонов на выходе горизонтальных каналов реактора ИРТ-Т

Спектральные характеристики радиальных экспериментальных каналов обладают значительной долей быстрых нейтронов, которая формируется благодаря прямому прострелу от активной зоны. Более мягкий спектр нейтронов на выходе из касательного канала ГЭК-1 формируется за счет значительного рассеяния быстрых нейтронов в материалах внутренней тепловой сборки и биологической защиты реактора.

Аналогичная ситуация наблюдается при анализе энергетического распределения фотонов в предполагаемом месте облучения. За счет рассеяния в материалах внутрибачных устройств реактора, а также в биологической защите общая интенсивность фотонов во всех энергетических группах снижается.

Сводная информация по характеристикам пучков всех горизонтальных каналов представлена в табл. 2, а именно, плотности потоков тепловых (Φ_T), эпитепловых ($\Phi_{\text{эпи}}$) и быстрых ($\Phi_{\text{быстр}}$) нейтронов, отношение мощности поглощенной дозы гамма-излучения к плотности потока тепловых (эпитепловых) нейтронов (D^*_{γ}/Φ_T ; $D^*_{\gamma}/\Phi_{\text{эпи}}$), отношение мощности поглощенной дозы быстрых нейтронов к плотности потока тепловых (эпитепловых) нейтронов ($D^*_{\text{быстр}}/\Phi_T$; $D^*_{\text{быстр}}/\Phi_{\text{эпи}}$).

Таблица 2

Плотности потоков трех групп нейтронов и мощности доз на выходах горизонтальных каналов

	Φ_T , н/см ² /с	$\Phi_{\text{эпи}}$, н/см ² /с	$\Phi_{\text{быстр}}$, н/см ² /с	$D^*_{\text{быстр}}/\Phi_T$, Гр·см ²	$D^*_{\text{быстр}}/\Phi_{\text{эпи}}$, Гр·см ²	D^*_{γ}/Φ_T , Гр·см ²	$D^*_{\gamma}/\Phi_{\text{эпи}}$, Гр·см ²
ГЭК-1	8,41E8	1,07E8	1,28E8	2,59E-12	2,04E-11	1,98E-11	1,56E-10
ГЭК-2	1,98E9	3,85E8	6,28E8	5,40E-12	2,78E-11	1,45E-10	7,43E-10
ГЭК-3	2,78E9	9,59E8	2,36E9	1,62E-11	4,71E-11	1,59E-10	4,60E-10
ГЭК-5	3,80E9	1,68E9	3,83E9	1,81E-11	4,10E-11	1,26E-10	2,85E-10
ГЭК-6	2,52E9	1,02E9	2,53E9	1,91E-11	4,71E-11	1,83E-10	4,53E-10
ГЭК-7	2,42E9	1,03E9	2,48E9	1,90E-11	4,47E-11	1,64E-10	3,85E-10
ГЭК-8	3,46E9	1,66E9	3,51E9	1,76E-11	3,66E-11	1,13E-10	2,36E-10
ГЭК-9	3,50E9	1,65E9	3,35E9	1,59E-11	3,37E-11	1,05E-10	2,24E-10
ГЭК-10	1,62E9	6,98E8	1,45E9	1,59E-11	3,68E-11	1,29E-10	3,01E-10

Перевод значений плотности потока нейтронов и фотонов в значения мощности кермы от соответствующего типа излучения выполнен в многогрупповом приближении с помощью керма-факторов.

Исходя из представленных значений можно сделать вывод о том, что несмотря на низкие абсолютные значения плотности потока тепловых и эпитепловых нейтронов физические характеристики пучка ионизирующего излучения горизонтального канала ГЭК-1 наиболее близки к требуемым значениям при проведении нейтронозахватной терапии. Относительные кермы быстрых нейтронов и фотонов на один тепловой и эпитепловой нейтрон других горизонтальных каналов реактора более чем на два порядка выше требований, предъявляемых к терапевтическим пучкам для НЗТ. Таким образом, в качестве базы для создания установки нейтронозахватной терапии был выбран ГЭК-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристики пучка ионизирующего излучения канала ГЭК-1 в полной мере не удовлетворяют требованиям МАГАТЭ, однако необходимо отметить, что в на-

стоящее время в рассматриваемом канале не установлены материалы, способные модифицировать спектральные характеристики нейтронных и гамма-полей. В таблице 3 представлены требуемые характеристики нейтронных пучков, а также характеристики используемых для предклинических и клинических исследований НЗТ действующих установок.

Таблица 3

Сравнение характеристик пучков ГЭК-1 и существующих установок [17]

	Φ_T , н/см ² /с	$\Phi_{Эли}$, н/см ² /с	$\Phi_{быстр}$, н/см ² /с	$D'_{быстр}/\Phi_T$, Гр·см ²	$D'_{быстр}/\Phi_{Эли}$, Гр·см ²	D'_{γ}/Φ_T , Гр·см ²	$D'_{\gamma}/\Phi_{Эли}$, Гр·см ²
МАГАТЭ	1Е10	1Е9	5Е7	2Е-13	2Е-13	2Е-13	2Е-13
ГЭК-1 ИРТ-Т	8,41Е8	1,07Е8	1,28Е8	2,59Е-12	2,04Е-11	1,98Е-11	1,56Е-10
Нейтронные пучки для клинических исследований							
KURRI	2,05Е8	1,14Е9	2,50Е7	–	2,20Е-13	–	1,70Е-13
MIT-FCB	1,16Е8	3,71Е9	1,40Е8	–	1,80Е-13	–	1,00Е-13
FiR-1	7,20Е7	1,07Е9	3,40Е8	–	2,30Е-13	–	1,50Е-13
Нейтронные пучки для предклинических исследований							
RA-6	3,30Е7	6,50Е8	4,40Е7	–	9,70Е-13	–	9,10Е-13
IEA-R1	1,39Е8	–	–	–	4,08Е-11*	–	1,02Е-11
МИФИ ГЭК-4	7,40Е8	3,90Е8	1,50Е8	2,3Е-12	4,40Е-12	6,40Е-13	1,20Е-12

* Суммарная нейтронная доза на один тепловой нейтрон

Считается, что наиболее удачной конструкцией экспериментального объема, на котором достигались наилучшие характеристики пучка, является установка для НЗТ реактора MIT. В настоящее время эта установка демонтирована. Многие используемые установки в полной мере не удовлетворяют идеальным требованиям, однако результаты проведенных исследований показывают значимые результаты как в предклинической, так и в клинической практике.

Для проведения клинических исследований НЗТ и облучения пациентов требуется значительная реконструкция канала ГЭК-1. Основными недостатками канала ГЭК-1 являются сложность внесения существенных изменений в его конструкцию (канал фиксирован в биологической защите) и удаленность выхода канала от активной зоны (расстояние от центра активной зоны до предполагаемого места облучения ~ 3,5 м). Наиболее перспективным способом значительного улучшения характеристик выводимого пучка является замена существующего внешнего шибера длиной 1,80 м на более компактный. Однако помимо сокращения расстояния между активной зоной реактора и местом облучения объектов обязательным условием повышения характеристик канала является установка комплекса формирования пучка.

В настоящий момент предклинические исследования являются необходимым этапом при разработке новых борсодержащих препаратов и включают в себя исследования токсичности, изучение поглощения лекарственного средства, оценку метаболизма препарата и т.д. на клеточных культурах и животных. Основываясь на опыте эксплуатации комплекса для проведения исследований в области нейтронозахватной терапии на базе горизонтального канала ГЭК-4 реактора ИРТ МИФИ можно отметить, что характеристики нейтронного пучка, достаточные

для проведения предклинических испытаний, могут быть получены на канале ГЭК-1 реактора ИРТ-Т после размещения необходимого набора материалов для увеличения плотности потока нейтронов в месте облучения и формирования спектра нейтронов [18, 19].

Для возможности проведения исследований по актуальным направлениям развития технологии НЗТ на реакторе ИРТ-Т разрабатывается проект по реконструкции экспериментального объема горизонтального канала ГЭК-1 для облучения клеточных культур и биологических объектов тепловым пучком нейтронов. Проведена модернизация комплекса биологической защиты. Сформирован объем помещения для расположения облучаемых объектов, визуального и аппаратного контроля параметров облучения. Проводятся расчетные и экспериментальные исследования по оптимизации характеристик выводимого пучка.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации. Номер проекта: СП-1731.2019.2.

Литература

1. Абсалямов Р.И. Современные методы лучевого лечения опухолей головы и шеи (обзор) // Опухоли головы и шеи. – 2013. – № 3. – С. 27-34.
2. Locher G.L. Biological effects and the therapeutic possibilities of neutrons // Am. J. Roentgenol. – 1936. – Vol. 36. – PP. 1-13.
3. Шейно И.Н., Ижевский П.В., Липенгольц А.А., Кулаков В.Н., Вагнер А.Р., Сухих Е.С., Варлачев В.А. Разработка бинарных технологий лучевой терапии злокачественных новообразований: состояние и проблемы // Бюллетень сибирской медицины. – 2017. – Т. 16. – № 3. – С. 192-209. DOI: <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2017-3-192-209>
4. Купленников Э.Л., Довбня А.Н., Телегин Ю.Н., Цымбал В.А., Кандыбей С.С. Пучки нейтронов для терапии. Обзор. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2011. – 31 с.
5. Sauerwein W.A.G., Moss R.L. Requirement for boron neutron capture therapy (BNCT) at a nuclear research reactor. – The European BNCT Project, Belanda. – 2009. – 130 p.
6. Skrk J., Stecher-Rasmussen F., Tinti R. et al. Current status of neutron capture therapy. / Report of International Atomic Energy Agency No. 1223. Vienna. – 2001. – 289 p.
7. Liu Y.W., Huang T.T., Jiang S.H., Liu H.M. Renovation of epithermal neutron beam for BNCT at THOR. // Applied Radiation and Isotopes. – 2004. – Vol. 61. – PP. 1039-1043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.042>
8. Esposito J., Rosi G., Agosteo S. The new hybrid thermal neutron facility at TAPIRO reactor for BNCT radiobiological experiments. // Radiation protection dosimetry. – 2007. – Vol. 126. – No. 1-4. – PP. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm015>
9. Rogus R., Harling O., Yanch J. Mixed field dosimetry of epithermal neutron beams for boron neutron capture therapy at the MITR-II research reactor. // Med. Phys. – 1994. – Vol. 21. – No. 10. – PP. 1611-1625. DOI: <https://doi.org/10.1118/1.597267>
10. Hawthorne M.F., Shelly K., Wiersema R.J. (ed.). Frontiers in neutron capture therapy. – Springer, 2013. – 1467 p.
11. Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Radaev A.I., Naymushin A.G., Chertkov Y.B., Anikin M.N., Lebedev I.I. Control rod calibration simulation using Monte Carlo code for the IRT-type research reactor. // Annals of Nuclear Energy. – 2016. – Vol. 96. – PP. 332-343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.06.015>
12. Alekseev N.I., Gomin E.A., Marin S.V., Nasonov V.A., Shkarovskii D.A., Yudkevich M.S. MCU-PTTR program for high-precision calculations of pool and tank type research reactors. // Atomic Energy, 2011. – Vol. 109. – No. 3. – PP. 149-158.
13. Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Radaev A.I., Naymushin A.G., Chertkov Y.B., Anikin M.N., Lebedev I.I. Validation of the MCU-PTTR computational model of beryllium poisoning

using selected experiments at the IRT-T research reactor. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2018. – Vol. 113. – PP. 436-445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.11.046>

14. *Naymushin A., Chertkov Y., Shchurovskaya M., Anikin M., Lebedev I.* Modeling of operating history of the research nuclear reactor. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 135. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/135/1/012032>

15. *Naymushin A., Anikin M., Lebedev I., Busygin A., Dmitriev S., Zolotykh D.* Features of Fuel Burnup Calculations for IRT-T Reactor Using MCU-PTR Code. // *Journal of Industrial Pollution Control*. – 2016. – Vol. 32. – No. 2. – PP. 449-452.

16. *Варлачев В.А.* Нейтронное трансмутационное легирование кремния в бассейновом исследовательском ядерном реакторе. Дисс. д-ра техн. наук. – Томск: ТПУ, 2015. – 326 с.

17. *Binns P., Riley K., Harling O.* Epithermal neutron beams for clinical studies of boron neutron capture therapy: a dosimetric comparison of seven beams. // *Radiat. Res.* – 2005. – Vol. 164. – No. 2. – PP. 212-220. DOI: <https://doi.org/10.1667/RR3404>

18. *Zaitsev K.N., Portnov A.A., Mishcherina O.V., Kulakov, V.N., Khokhlov V.F., Meshcherikova V.V., Mitin V.N., Koslovskaya N.G., Sheino I.N.* Neutron capture therapy at the MEPHI reactor. // *International Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2004. – Vol. 1. – PP. 83-101. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2004.005273>

19. *Mitin V.N., Kulakov V.N., Khokhlov V.F., Sheino I.N., Arnopolskaya A.M., Kozlovskaya N.G., Zaitsev K.N., Portnov A.A.* Comparison of BNCT and GdNCT Efficacy in Treatment of Canine Cancer. // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2009. – Vol. 67. – Iss. 7-8 suppl. – PP. S299-S301.

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

Авторы

Аникин Михаил Николаевич, ассистент

E-mail: amn@tpu.ru

Лебедев Иван Игоревич, ассистент

E-mail: iil@tpu.ru

Наймушин Артём Георгиевич, доцент

E-mail: agn@tpu.ru

UDC 621.039.556

PROSPECTS OF USING THE EXPERIMENTAL CHANNELS OF IRT-T REACTOR IN NEUTRON CAPTURE THERAPY

Anikin M.N., Lebedev I.I., Naymushin A.G.

National Research Tomsk Polytechnic University

30 Lenin ave., Tomsk, 634050 Russia

ABSTRACT

Results of the neutronics calculation of the IRT-T reactor core for the purpose of selecting one of the horizontal experimental channels to serve as the basis for the installation for conducting activities in the field of neutron capture therapy (NCT) of socially significant diseases are presented in the present paper. Full-scale computational model was developed within the MCU-PTR software tool incorporating the detailed description of fuel assemblies, beryllium reflector blocks, shim rods of the control and protection system, as well as all experimental channels of the reactor. Detailed energy spectra of neutrons and photons in each horizontal channel

of the reactor were obtained as the result of the performed calculation. Since minimization of the contribution of the dose generated by fast neutrons and photons in the total dose represents an important characteristic for the NCT, detailed dosimetry loads were determined within the area intended for irradiation of samples. KERMA-factors for neutrons and photons were used in the determination of dosimetry parameters of the beam taking into account the energy distribution. It was demonstrated that the absolute values of the neutron flux density are higher in the radial experimental channels of the reactor, but, however, smaller contribution of fast neutrons and photons in the tangential horizontal channel allows formulating the conclusion that tangential channel is preferable for developing NCT installation. Possible approaches for modernization of HEC-1 channel for creating appropriate conditions for irradiation of cellular structures and small biological objects were identified. The expected result of the modernization will allow performing research of efficiency and toxicity of new drugs for the delivery of boron and other elements with high absorption cross-sections.

Key words: neutron capture therapy, NCT, radiation treatment, research reactor, IRT-T, beam ports.

REFERENCES

1. Absalyamov R.I. Modern Methods of Radiation Treatment of Tumors of the Head and Neck (Review). *Opuholi Golovy i Shei*. 2013, no. 3, pp. 27-34 (in Russian).
2. Locher G.L. Biological effects and the therapeutic possibilities of neutrons. *Amer. J. Roentgenol.* 1936, v. 36, pp. 1-13.
3. Shejno I.N., Izhevskij P.V., Lipengol'c A.A., Kulakov V.N., Vagner A.R., Sukhikh E.S., Varlachev V.A. Development of binary technologies for radiotherapy of cancer: state and problems. *Bjulleten' sibirskoj mediciny*. 2017, no. 16 (3), pp. 192-209. DOI: <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2017-3-192-209> (in Russian).
4. Kuplennikov Ye.L., Dovbnaya A.N., Telegin Yu.N., Cymbal V.A., Kandybej S.S. *Neutron Beams for Therapy: An Overview*. Har'kov. NNTs HFTI Publ., 2011, 31 p. (in Russian).
5. Sauerwein W.A.G., Moss R.L. *Requirement for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) at a Nuclear Research Reactor*. The European BNCT Project. Belanda, 2009, 130 p.
6. Skrk J., Stecher-Rasmussen F., Tinti R., Uakkas A., Vana N., Wambersie A., Wemple C., Wheeler F., Yamamoto T., Zamenhof R. *Current Status of Neutron Capture Therapy*. Report of International Atomic Energy Agency No. 1223. Vienna, 2001, 289 p.
7. Liu Y. W., Huang T. T., Jiang S. H., Liu H. M. Renovation of Epithermal Neutron Beam for BNCT at THOR. *Applied radiation and isotopes*, 2004, v. 61(5), pp. 1039-1043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.042>
8. Esposito J., Rosi G., Agosteo S. The New Hybrid Thermal Neutron Facility at TAPIRO Reactor for BNCT Radiobiological Experiments. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007, v. 126, no. 1-4, pp. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm015>
9. Rogus R., Harling O., Yanch J. Mixed Field dosimetry of Epithermal Neutron Beams for Boron Neutron Capture Therapy at the MITR-II Research Reactor. *Med. Phys.* 1994, v. 21(10), pp. 1611-1625. DOI: <https://doi.org/10.1118/1.597267>
10. Hawthorne M.F., Shelly K., Wiersema R.J. (ed.). *Frontiers in Neutron Capture Therapy*. Springer, 2013. 1467 p.
11. Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Radaev A.I., Naymushin A.G., Chertkov Y.B., Anikin M.N. & Lebedev I.I. Control rod calibration simulation using Monte Carlo code for the IRT-type research reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 2016, v. 96, pp. 332-343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.06.015>
12. Alekseev N.I., Gomin E.A., Marin S.V., Nasonov V.A., Shkarovskii D.A. and Yudkevich M.S. MCU-PTR program for high-precision calculations of pool and tank type research reactors. *Atomic Energy*, 2011, v. 109, no. 3, pp. 149-158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9337-0>

13. Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Radaev A.I., Naymushin A.G., Chertkov Y.B., Anikin M.N. & Lebedev I.I. Validation of the MCU-PTR Computational Model of Beryllium Poisoning Using Selected Experiments at the IRT-T Research Reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 2018, v. 113, pp. 436-445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.11.046>
14. Naymushin A., Chertkov Y., Shchurovskaya M., Anikin M. & Lebedev I. Modeling of Operating History of the Research Nuclear Reactor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, v. 135. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/135/1/012032>
15. Naymushin A., Anikin M., Lebedev I., Busygin A., Dmitriev S. & Zolotykh D. Features of Fuel Burnup Calculations for IRT-T Reactor Using MCU-PTRCcode. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2016, v. 32, no. 2, pp. 449-452.
16. Varlachyov V.A. *Neutron Transmutation Doping of Silicon in Pool-Type Research Reactor*. Dr. Sci. (Engineering) Diss. Tomsk. TPU Publ., 2015. 326 p. (in Russian).
17. Binns P., Riley K., Harling O. Epithermal Neutron Beams for Clinical Studies of Boron Neutron Capture Therapy: a Dosimetric Comparison of Seven Beams. *Radiat. Res.* 2005, v. 164, no. 2, pp. 212-220. DOI: <https://doi.org/10.1667/RR3404>
18. Zaitsev K.N., Portnov A.A., Mishcherina O.V., Kulakov, V.N., Khokhlov V.F., Meshcherikova V.V., Mitin V.N., Koslovskaya N.G., Sheino I.N. Neutron Capture Therapy at the MEPHI Reactor. *International Journal of Nuclear Science and Technology*. 2004, v. 1, pp. 83-101. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2004.005273>
19. Mitin V.N., Kulakov V.N., Khokhlov V.F., Sheino I.N., Arnopolskaya A.M., Kozlovskaya N.G., Zaitsev K.N., Portnov A.A. Comparison of BNCT and GdNCT Efficacy in Treatment of Canine Cancer. *Applied Radiation and Isotopes*. 2009, v. 67, iss. 7-8 suppl., pp. S299-S301.

Authors

Anikin Mikhail Nikolaevich, Teaching Assistant

E-mail: amn@tpu.ru

Lebedev Ivan Igorevich, Teaching Assistant

E-mail: iil@tpu.ru

Naymushin Artyom Georgievich, Associate Professor

E-mail: agn@tpu.ru