

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА 4-ГО КАНАЛА ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ P7-M

А.Е. Овсенёв, М.В. Гладких, Н.В. Смольников, М.Н. Аникин,  
И.И. Лебедев, А.Г. Наймушин

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,  
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия,  
aeo3@tpu.ru, mvg23@tpu.ru, nvs38@tpu.ru, amn@tpu.ru, iil@tpu.ru, agn@tpu.ru*

Ускорители заряженных частиц играют важную роль в современной физике, медицине и промышленности, обеспечивая доступ к высокоэнергетическим пучкам различных заряженных частиц. Одним из ключевых аспектов использования ускорителей является их потенциал в качестве источников нейтронов. Нейтроны имеют особую значимость в различных областях исследований, таких как ядерная физика, медицинская диагностика и терапия, промышленные приложения и безопасность ядерной энергетики.

На сегодняшний момент в ТПУ работает и активно используется циклотрон P-7M. Однако, проблема отсутствия как универсальной модели источника нейтронов, так и полноценной модели экспериментальных каналов стоит особенно остро, в следствии того, что ускоритель используется в целях нейтронной терапии. Выявление закономерностей формирования пучка нейтронного излучения и дальнейшая постройка модели источника на основе данных закономерностей позволила бы существенно упростить и ускорить работы, связанные с оценкой дозовых нагрузок на пациента.

**Ключевые слова:** циклический ускоритель P7-M; бор-нейтронозахватная терапия; быстрые нейтроны; нейтронно-активационные мишени; нейтронно-активационный анализ.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE NEUTRON FLUX DENSITY OF THE 4-TH CHANNEL OF THE CYCLIC ACCELERATOR P7-M

Aleksandr Ovsenev, Mikhail Gladkikh, Nikita Smolnikov, Mikhail Anikin,  
Ivan Lebedev, Artem Naymushin

*National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia,  
aeo3@tpu.ru, mvg23@tpu.ru, nvs38@tpu.ru, amn@tpu.ru, iil@tpu.ru, agn@tpu.ru*

Currently, oncological diseases occupy one of the leading places among the causes of premature death of people. For example, in 2019, oncological diseases caused every sixth death in Russia [1]. And due to the further deterioration of the environmental situation, the number of oncological diseases will only grow. Therefore, the development and implementation of new promising technological methods for the treatment of malignant neoplasms is still ongoing.

One of the promising methods of cancer treatment is boron-neutron capture therapy (BNRT) [2]. BNRT is a binary form of radiotherapy, in which a non-radioactive isotope B10 is delivered to tumor cells with special preparations and further irradiation of these cells with a stream of epithermal neutrons. As a result of the interaction of the neutron flux with the boron isotope, an instantaneous nuclear reaction  $B^{10}(n,\alpha)Li^7$  occurs with the release of an energy of 2.79 MeV. The  $\alpha$ -particle has an energy of 1.47 MeV and due to the large mass and low mileage of this particle, the death of a cancer cell occurs.

Both research nuclear reactors and accelerators of various types are used as a source of epithermal neutron flux for BNRT. Despite the positive clinical results [3], conducting therapy on research reactors is a rather complex and expensive process. Therefore, charged particle accelerators have the greatest prospects.

In world practice, two types of charged particle accelerators are mainly used for the purposes of BNRT: linear and cyclic. Their work is based on the interaction of incoming particles with targets of various types and materials and the further emission of a neutron flux of a certain energy and spectrum. Practically, all types of accelerators use

two variants of targets for the formation of a neutron flux: a lithium target with incoming protons  $\text{Li}^7(p,n)\text{Be}^7$  and a beryllium target with incoming deuterons  $\text{Be}^9(d,n)\text{Be}^{10}$ .

**Keywords:** cyclic accelerator P7-M; boron-neutron capture therapy; fast neutrons; neutron activation targets; neutron activation analysis.

## Введение

В настоящее время онкологические заболевания занимают одно из лидирующих мест среди причин преждевременной смерти людей. Так, например, в 2019 году онкологические заболевания стали причиной каждой шестой смерти в России [1]. И из-за дальнейшего ухудшения экологической обстановки, количество онкологических заболеваний будет только расти. Поэтому, разработка и внедрение новых перспективных технологических методов лечения злокачественных новообразований до сих пор продолжается.

В Томском политехническом университете также имеется свой ускорители заряженных частиц. Данный ускоритель циклического типа и имеет 7 каналов для облучения материала различными видами заряженных частиц. Четвертый же канал ускорителя предназначен для проведения лучевой терапии рака быстрыми нейтронами. На данном канале осуществляется взаимодействие дейтронов с бериллиевой мишенью и дальнейшем облучением пациентов в специально оборудованном для этого помещении.

В данной работе предполагается провести различные теоретические и экспериментальные исследования для формирования плотности потока эпитепловых нейтронов на циклическом ускорителе P7-M для целей бор-нейтронозахватной терапии.

## Результаты и их обсуждение

В качестве детекторов при проведении экспериментов в 4-м канале циклического ускорителя P7-M (рис. 1) использовались аттестованные детекторы с известной массой и числом ядер мишени, которое указывается в свидетельстве о метрологической аттестации набора комплектов нейтронных АКН №415 для пороговых

детекторов и свидетельстве о метрологической аттестации набора активационных комплектов нейтронных тепловых АКН-Т-10 №401.

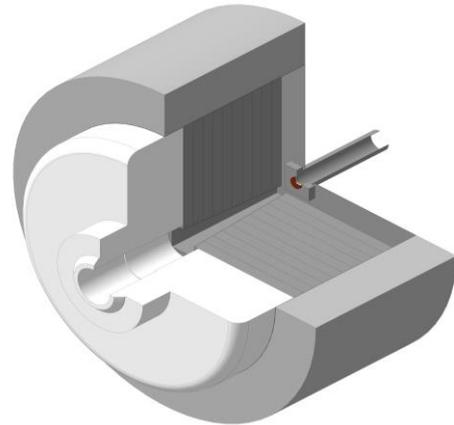


Рис. 1. 4-й канал циклического ускорителя P7-M

В качестве детекторов были выбраны образцы из индия и никеля, это объясняется их наличием, доступностью, а также удобными для данного эксперимента значениями периода полураспада. Облучение образцов проводилось на токе пучка дейтронов 35 мкА в течении 60 минут.

Измерение активности облученных образцов проводилось на многоканальном гамма-спектрометре для измерения рентгеновского и гамма-излучения «Canberra» (УРС-06/07).

Далее были рассчитаны абсолютные значения плотности потока быстрых нейтронов в экспериментальном канале ускорителя P-7M. Результаты измерений и расчетов детекторов из индия и никеля представлены в таблице 1.

Далее был проведен математический расчет в программном комплексе PHITS.

В таблице 2 представлены расчетные значения плотности потока быстрых нейтронов из программного комплекса PHITS.

На рис. 2 приведены сравнения экспериментально полученных результатов

Табл. 1. Абсолютные значения плотности потока быстрых нейтронов в экспериментальном канале ускорителя Р-7М

	$\Phi, \text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
In	$1.84\cdot 10^8$
	$1.82\cdot 10^8$
Ni	$9.08\cdot 10^7$
	$9.12\cdot 10^8$

Табл. 2. Расчетные плотности потока быстрых нейтронов в программном комплексе RHITS

Пороговая энергия, МэВ	Тип реакции	Расчетные значения, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
1.2	$\text{In}^{115}(n,n)\text{In}^{115m}$	$(9.78\pm 2.44)\cdot 10^7$
2.3	$\text{Ni}^{58}(n,p)\text{Co}^{58}$	$(8.43\pm 2.10)\cdot 10^7$

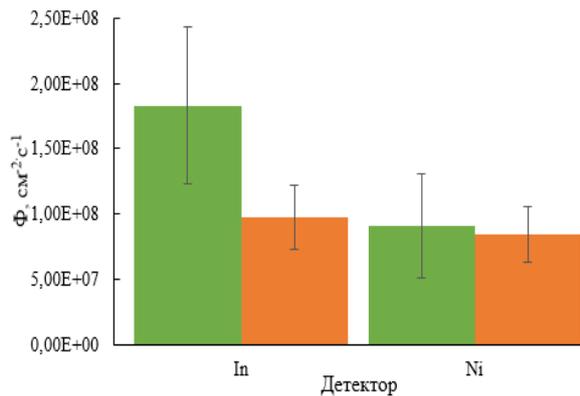


Рис. 2. Результаты экспериментальных и расчетных значений плотности потока быстрых нейтронов

плотности потока быстрых нейтронов с расчетными из программного комплекса RHITS.

### Заключение

В результате проведения расчетно-экспериментального определения параметров нейтронных полей в экспериментальном канале были получены значения, плотности потока нейтронов в диапазоне от 1.2 МэВ до 13 МэВ составило  $1.83\cdot 10^8 \text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , расчетное значение составило  $9.78\cdot 10^7 \text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  для индиевых фольг, относительная погрешность составила 87 %, что говорит, что никелевые фольги более точных в данной методике.

Результаты по никелевым фольгам экспериментальных и расчетных значений плотности потока быстрых нейтронов составили  $9.08\cdot 10^7 \text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  и  $8.43\cdot 10^7 \text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Их степени сходимости достаточны, чтобы утверждать, что данные, получаемые в актуализированной модели программного обеспечения RHITS, можно использовать с целью последующего использования для проведения радиометрических испытаний.

### Библиографические ссылки

- Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России в 2019 году (заболеваемость и смертность), 2017. 131 с.
- Sauerwein W.A.G. et al. (ed.). Neutron capture therapy: principles and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
- Sakurai Y., Kobayashi T. The medical-irradiation characteristics for neutron capture therapy at the Heavy Water Neutron Irradiation Facility of Kyoto University Research Reactor. *Medical physics* 2002; 29(10): 2328-2337.