

**Исследования на новаторском ускорителе-тандеме
с вакуумной изоляцией**

В.И. Алейник¹, З.Ш. Аннаев², А.Г. Башкирцев³, А.В. Бурдаков^{1,3},
Н.В. Губанова⁴, В.В. Каныгин², Д.А. Касатов⁵, А.И. Кичигин²,
А.С. Кузнецов¹, А.Н. Макаров¹, Р.А. Морозов⁵, И.Н. Сорокин¹,
С.Ю. Таскаев¹, И.М. Шудло³

¹ *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск.*

² *Новосибирский государственный медицинский университет.*

³ *Новосибирский государственный технический университет.*

⁴ *Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск.*

⁵ *Новосибирский государственный университет.*

Перспективным подходом в лечении ряда злокачественных опухолей, в первую очередь, трудноизлечимых опухолей головного мозга и меланом, рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ). Метод основан на селективном накоплении нерадиоактивного нетоксичного изотопа ^{10}B в опухоли и последующем облучении надтепловыми нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ с большим выделением энергии именно в той клетке, которая содержала ядро бора, что приводит к ее гибели. Проведенные клинические испытания методики на ядерных реакторах продемонстрировали ее эффективность в лечении целого ряда опухолей, однако широкое внедрение методики в клиническую практику требует компактных безопасных относительно недорогих источников надтепловых нейтронов. Для таких генераторов нейтронов могут использоваться ускорители заряженных частиц. В Институте ядерной физики СО РАН был предложен [1] и сооружен [2] прототип источника эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и генерации нейтронов в результате реакции $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$.

В ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией электродов инжектируемые отрицательные ионы водорода ускоряются до 1 МэВ подаваемым на высоковольтный электрод потенциалом, превращаются в протоны в газовой обдирочной мишени, и затем протоны тем же потенциалом ускоряются до 2 МэВ. Потенциал на высоковольтный и промежуточные электроды подается от высоковольтного источника напряжения через проходной изолятор, в котором установлен омический делитель. В данном ускорителе ускорительные трубки как таковые отсутствуют – изолятор отнесен от тракта ускорения пучка на значительное расстояние, что вместе с реализацией откачки газа через

жалюзи электродов вне ускорительного промежутка позволяет надеяться на получение сильноточного протонного пучка.

Ускоритель характеризуется высоким темпом ускорения заряженных частиц, сильной входной линзой и большой запасенной энергией между электродами. В результате проведенных экспериментов выяснено, что запас энергии до 50 Дж не портит электрическую прочность 45 мм вакуумного зазора, и транспортировка, фокусировка и ускорение пучка осуществляется без значительных потерь [3]. Предложена и реализована методика определения толщины газовой обдирочной мишени и показано, что обдирка пучка отрицательных ионов водорода в протоны осуществляется в хорошем соответствии с расчетом [4]. В итоге на установке в течение длительного времени получается стабильный 2 МэВ пучок протонов с током 1–2 мА.

Наилучшей реакцией генерации эпитепловых нейтронов является бомбардирование протонов по литию: поток нейтронов большой и энергетический спектр сравнительно мягкий [5]. Однако механические, химические и тепловые свойства лития существенно хуже, чем у альтернативных мишеней из ^9Be и ^{13}C . Несмотря на это обстоятельство все проблемы литиевой мишени были решены, а именно: а) обеспечен эффективный теплоотвод, позволяющий поддерживать литиевый слой в твердом состоянии [6] и изготовлена легкоотъемная мишень [7]; б) осуществлено контролируемое напыление тонкого литиевого слоя на подложку мишени [8] и подтверждено поддержание чистоты слоя в течение длительного времени [9]; в) найден материал подложки, максимально стойкий к радиационным повреждениям [10]; г) разработан и смонтирован защитный заглубленный контейнер для выдержки и временного хранения активированных мишеней [11]. В результате оптимальная нейтроногенерирующая мишень была создана, осуществлена генерация нейтронов [2], проведены исследования их цитотоксического воздействия на культуру клеток глиобластомы ^{87}U [12].

На установке ведутся исследования по оперативному обнаружению взрывчатых и наркотических веществ методом резонансного поглощения генерируемых монохроматических γ -квантов [13], датированию горных пород по индуцированному спонтанному делению ядер урана, изучению безнейтронной термоядерной реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$ и формированию пучка моноэнергетических нейтронов для калибровки детектора темной материи [14]. Исследования проводятся при участии студентов, магистрантов, аспирантов, ординаторов новосибирских университетов, и таким образом, на базе созданного и функционирующего ускорителя сформирован центр коллективного пользования, в котором совмещены научная и педагогическая деятельность.

Литература

1. *Bayanov B., Belov V., Bender E. et al.* Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital. NIM A 413/2–3. 1998. P. 397–426.
2. *Кузнецов А.С., Мальшикин Г.Н., Макаров А.Н., Сорокин И.Н., Суляев Ю.С., Таскаев С.Ю.* Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 8. С. 1–6.
3. *Алейник В.И., Башкирцев А.Г., Кузнецов А.С. и др.* Оптимизация транспортировки пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией // ДАН. 2013. № 1 (20). С. 47–55.
4. *Kuznetsov A., Aleynik V., Shchudlo I. et al.* Calibration Testing of the Stripping Target of the Vacuum Insulated Tandem Accelerator // Proc. of XXIII Russian Particle Accelerator Conference RUPAC 2012, September, 24–28. Saint-Petersburg. 2012. P. 560–562.
5. *Blue T., Yanch J.* Accelerator-based epithermal neutron sources for boron neutron capture therapy of brain tumors // J. of Neuro-Oncology. 2003. V. 62. P. 19–31.
6. *Bayanov B., Belov V., Kindyuk V., Oparin E., Taskaev S.* Lithium neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source // Applied Radiation and Isotopes. 2004. V. 61. P. 817–821.
7. *Bayanov B., Belov V., Taskaev S.* Neutron producing target for accelerator based neutron capture therapy // J. of Physics. 2006. V. 41. P. 460–465.
8. *Баянов Б.Ф., Журов Е.В., Таскаев С.Ю.* Измерение толщины литиевого слоя // Приборы и техника эксперимента. 2008. Т. 1. С. 160–162.
9. *Баянов Б.Ф., Таскаев С.Ю., Ободников В.И., Тишковский Е.Г.* Влияние остаточного газа на литиевый слой нейтроногенерирующей мишени // Приборы и техника эксперимента. 2008. Т. 3. С. 119–124.
10. *Astrelin V., Burdakov A., Vykov P. et al.* Blistering of the selected materials irradiated by intense 200 keV proton beam // J. of Nuclear Materials. 2010. V. 396. P. 43–48.
11. *Баянов Б.Ф., Кандиев Я.З., Кашаева Е.А., Мальшикин Г.Н., Таскаев С.Ю., Чудаев В.Я.* Защитный заглубленный контейнер для выдержки и временного хранения активированных мишеней // Приборы и техника эксперимента. 2010. Т. 6. С. 117–120.
12. *Мостович Л.А., Губанова Н.В., Куценко О.С. и др.* Влияние эпитепловых нейтронов на жизнеспособность опухолевых клеток глиобластомы *in vitro* // Бюлл. экспериментальной биологии и медицины. 2011. Т. 151, № 2. С. 229–235.

13. *Kuznetsov A., Belchenko Yu., Burdakov A. et al.* The detection of nitrogen using nuclear resonance absorption of mono-energetic gamma rays // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2009. A 606. P. 238–242.

14. *Макаров А.Н., Таскаев С.Ю.* Пучок моноэнергетических нейтронов для калибровки детектора темной материи // *Письма в ЖЭТФ*. 2013. Т. 97 (принято в печать, планируемый выпуск № 12 от 26 июня 2013 г.).