

го потока в реальном времени, а также обеспечивает сильную техническую поддержку для интеллектуальных систем мониторинга дорожного движения с помощью технических устройств и аппаратных средств, работающих на низких расстояниях от земли.

Список литературы

1. Redmon J., Divvala S., Girshick R., and Farhadi A., «You only look once: Unified, real-time object detection» in Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), Jun. 2016, pp. 779–788.
2. Ultralytics «Object Detection Models - YOLO11 Documentation». – URL: <https://docs.ultralytics.com/tasks/detect/#models/> (дата обращения: 05.03.2025)
3. Car Parking Lot Dataset (CARPK). – URL: <https://lafi.github.io/LPN/>

Ли Шухуэй (Китай)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Ремнев Геннадий Ефимович, д.т.н., профессор

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МИШЕНИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ПОТОКОВ

Аннотация: В статье рассматривается проблема оптимизации конструкции мишени для генерации импульсных нейтронных потоков, используемых в бор-нейтронозахватной терапии. Определены оптимальные толщины литиевой, фторид-литиевой и оксид-литиевой мишеней для импульсных протонных пучков 2,5 МэВ. Сделан вывод о том, что использование импульсных пучков требует учета их энергетического спектра. Полученные результаты важны для повышения эффективности генерации нейтронов в импульсных ускорительных системах для развития бор-нейтронозахватной терапии.

Ключевые слова: бор-нейтронозахватная терапия, импульсный пучок, мишень, нейтрон, моделирование

Введение

Нейтрон-захватная терапия и ее разновидность – бор-нейтронзахватная терапия (БНЗТ) – это технология таргетной лучевой терапии, реализуемая на клеточном уровне. Механизм БНЗТ заключается во введении целевых молекулярных препаратов, несущих стабильный изотоп бор-10 (^{10}B), специфически удерживающийся в опухолевых клетках, и облучении области опухоли потоком эпитепловых нейтронов, вызывающих ядерную реакцию с высвобождением ус-

коренных альфа-частиц для достижения локализованного уничтожения раковых клеток [1].

С быстрым развитием ускорительной технологии БНЗТ постепенно перешла от использования реакторных источников нейтронов к источникам нейтронов на основе ускорителей. БНЗТ установки на основе таких источников являются перспективными благодаря их высокой безопасности, относительно низкой стоимости, легкости широкомасштабного продвижения и пригодности для строительства в больницах в густонаселенных районах. В настоящее время для этих целей рассматривают электростатические ускорители (2–2,8 МэВ), радиочастотные линейные ускорители (2,5–10 МэВ) и циклотроны (до 30 МэВ). Сложность конструкции таких ускорителей и их дороговизна существенно сдерживают широкое распространение нейтрон-захватной терапии в России. В настоящее время данная технология на основе ускорителя ВИТА, разработанного в Институте ядерной физики им. Будкера совместно с ТАС Technologies (США), доступна только в НМИЦ им. Н.Н. Блохина (г. Москва) [2]. Перспективной альтернативой являются импульсные ускорители, которые имеют упрощенную конструкцию генератора импульсов и значительно улучшенные изоляционные характеристики в импульсном режиме, что делает их более компактными и дешевыми.

Ядерные реакции, используемые для генерации нейтронов в БНЗТ, в основном включают реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$. По сравнению с нейтронами, образующимися в ходе реакции (d, n) , нейтроны, полученные в ходе реакции (p, n) , имеют меньшую энергию и больше подходят для замедления до эпитепловых энергий, необходимых для лечения глубоко расположенных опухолей. Кроме того, в условиях пучка протонов низкой энергии выход нейтронов с литиевых мишеней значительно выше, чем с бериллиевых мишеней, поэтому литиевые мишени являются более предпочтительными [3].

Мишени для генерации нейтронов обычно состоят из многослойной структуры: подложка представляет собой слой меди с охлаждающими каналами, подслой выполнен из материалов с высоким коэффициентом поглощения водорода, таких как Та/Мо, для предотвращения водородного охрупчивания и блистеринга, тонкий слой лития используется для генерации нейтронов, его поверхность покрыта защитным слоем, таким как Li_2O , Li_3N , Ti и т.д., для предотвращения распыления и испарения лития при нагревании, загрязнения камеры ускорителя и окисления материала мишени во время транспортировки. При использовании импульсных ускорителей, поскольку энергетический спектр ускоряемых ионов в ионном пучке очень широк, ограничения, связанные с влиянием импульсного потока энергии, значительно выше, чем при использовании непрерывного ионного пучка, поэтому к характеристикам мишеней для генерации нейтронов предъявляются более высокие требования.

В данной работе рассматривается использование лития и его соединений (LiF и Li_2O) для получения импульсных мощных нейтронных пучков и оценивается оптимальная толщина таких слоев.

Основная часть

В работе для моделирования использовали программный комплекс SRIM-2013 [4]. SRIM – это инструмент моделирования, основанный на теории приближения бинарных столкновений. Он позволяет точно рассчитать пробеги ускоренных ионов в различные материалы и величину потерь энергии. Данный программный комплекс широко используется в материаловедении, ядерной физике и других областях. В исследовании в качестве материалов мишеней рассматривались литий (Li), фторид лития (LiF) и оксид лития (Li_2O).

Известно, что порог реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ составляет 1,882 МэВ, что означает, что только когда энергия падающего пучка протонов превышает 1,882 МэВ, могут образовываться нейтроны и осуществляться последующие реакции. Исходя из этого, в работе рассматривались импульсные протонные пучки с величиной ускоряющего напряжения 2 МВ и 2,5 МВ, и анализировались моноэнергетические протонные пучки.

На рисунке 1 показан пробег моноэнергетического протонного пучка, инжектированного в мишень, где длина ΔX_x обозначает эффективный пробег моноэнергетического протонного пучка, представляющего собой толщину, при которой энергия падающего протонного пучка замедляется до 1,88 МэВ. Результаты приведены в таблице 1. Из-за эффекта пика Брэгга (рис. 2) подавляющая часть энергии протонов высвобождается в конце диапазона, и избыточное локальное накопление тепла может привести к расплавлению литиевой мишени. При этом, при использовании моноэнергетического пучка, литиевая мишень с толщиной, превышающей эффективный пробег, не производит больше нейтронов. Наоборот, увеличение толщины приводит к уменьшению выхода нейтронов, повышению энергии нейтронов и генерации паразитного γ -излучения. По этим причинам использование тонкой литиевой мишени с эффективной толщиной является ключом к обеспечению выхода нейтронов во избежание вышеуказанных проблем.

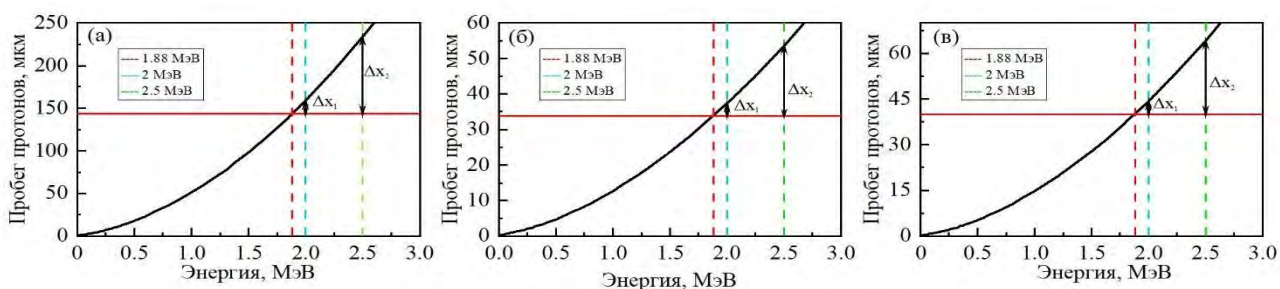


Рис. 1. Пробеги различных моноэнергетических энергий протонов (2, 2,5 МэВ) в мишени:
(а) Li , (б) LiF , (в) Li_2O

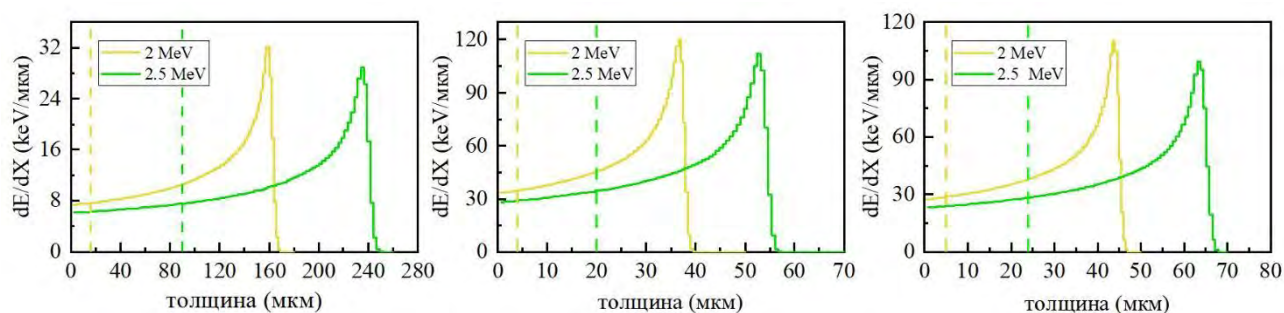


Рис. 2. Функции энерговыведения моноэнергетических пучков протонов и толщины слоев, в которых происходит (p, n) реакция в зависимости от начальной энергии протона:
(а) Li, (б) LiF, (в) Li₂O

В работе для расчетов также были выбраны два типичных энергетических спектра импульсных протонных пучков (рис. 3, а), которые содержат низкоэнергетические и высокоэнергетические хвосты, из-за того, что реальные импульсы ускоряющего напряжения характеризуются непрямоугольными передним и задним фронтами. Для более точного анализа энергетический спектр был разбит на конечные элементы по энергиям (рис. 3, б), где N0 обозначает общее количество протонов в импульсе, а Ni – количество протонов с определенной энергией. С помощью программы SRIM-2013 рассчитываются потери энергии протонов в мишени (Li, LiF и Li₂O) для заданного спектра пучка. Рассчитывается максимальное число протонов на см² (Np) до достижения порогов плавления, исходя из теплоемкости и теплоты фазовых переходов материала. Для каждого энергетического интервала в спектре пучка определяется выход нейтронов на один протон ($Y_n(E)$) по литературным данным [3]. Выход нейтронов интегрировался по всему спектру

$$Y_n^{total} = \sum (Y^n(E_i) \cdot N_p(E_i)) \quad Y_n^{total} = \sum (Y^n(E_i) \cdot N_p(E_i))$$

Была определена толщина, при которой Y_n^{total} максимален, но Np не превышает пределов термического разрушения материала мишени. Подробная информация приведена в таблице 1. Для импульсных пучков дополнительно учитывалось влияние низкоэнергетических “хвостов” спектра, снижающих эффективность генерации нейтронов.

Результаты показывают [5], что оптимальная толщина мишени зависит от энергетического спектра пучка и материала. Для импульсного пучка с энергией 2,5 МэВ оптимальная толщина составляет 80–100 мкм для Li, 15–25 мкм для LiF и 20–30 мкм для Li₂O. При энергии 2 МэВ оптимальные значения ниже. Установлено, что импульсные пучки могут обеспечивать выход нейтронов, сопоставимый с непрерывными пучками, особенно при уменьшении низкоэнергетического “хвоста” спектра.

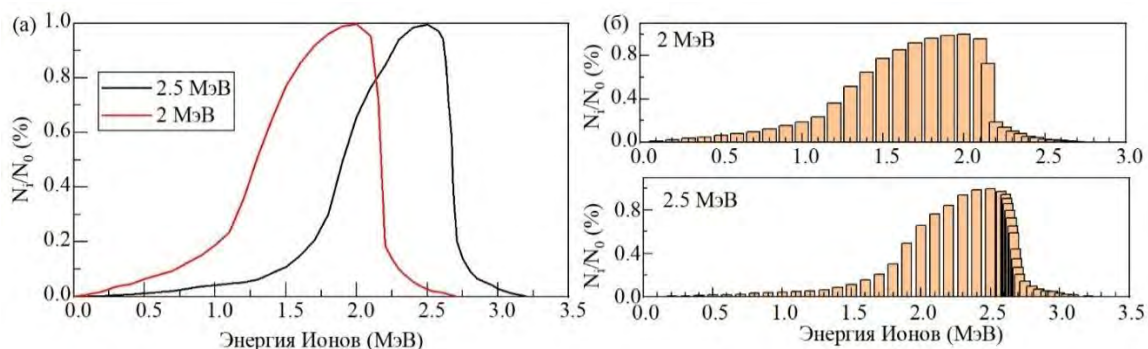


Рис. 3. Типичные энергетические спектры импульсных протонных пучков (а).
Разделение на конечные элементы спектров импульсной энергии с различными
доминирующими энергиями (б)

Таблица 1

Расчетные значения общего выхода нейтронов Y_n для различных протонных пучков
и мишеней

	Энергия	Общий выход нейтронов $Y_n, \times 10^9$			Толщина мишени, мкм		
		Li	LiF	Li ₂ O	Li	LiF	Li ₂ O
Моноэнергетический пучок	2 МэВ	0,57	0,59	2,04	16	4	5
	2,5 МэВ	1,2	1,24	4,3	90	20	24
Импульсный пучок	2 МэВ	0,28	0,24	0,71	35-40	10-15	10-15
	2,5 МэВ	2,99	2,32	7,15	80-100	15-25	20-30

Заключение

При сравнении импульсных и непрерывных протонных пучков выяснилось, что импульсный пучок с энергией 2,5 МэВ превышает выход нейтронов непрерывного пучка той же энергии за счет значительного вклада высокоэнергетического хвоста, а импульсный пучок с энергией 2,0 МэВ имеет низкий выход из-за высокой доли низкоэнергетических хвостов. Результаты исследования показывают, что толщина мишени должна быть сбалансирована между максимальным выходом нейтронов и термической стабильностью: чистый Li подходит для коротких импульсов высокоэнергетических пучков, для увеличения переходного выхода, в то время как LiF и Li₂O подходят для долгосрочной стабильной работы из-за их лучшей термической стойкости. Полученные результаты важны для разработки компактных ускорительных источников нейтронов для лечения опухолей.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00614.

Список литературы

1. Barth R.F., Coderne J.A., Vicente M.G.H., Blue T.E. Boron neutron capture therapy of cancer: current status and future prospects // Clinical Cancer Research. – 2005. – Vol. 11, №. 11. – P. 3987– 4003.
2. Jin W.H., Seldon C., Butkus M., et al. A review of boron neutron capture therapy: its history and current challenges // International journal of particle therapy. – 2022. – Vol. 9, №. 1. – P. 71–82.
3. Lee C.L., Zhou X.L. Thick target neutron yields for the ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ reaction near threshold // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1999. – Vol. 152, № 1. – P. 1–11.
4. Ziegler J.F. SRIM–The stopping and range of ions in matter (2010) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – Vol. 268, № 11–12. – P. 1818–1823.
5. Li S.H., Pavlov S., Cherepennikov Y. et al. Estimation of the neutron yield generated by neutron source based on pulsed power proton accelerator in ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ reaction // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2025. – Vol. 1075. – P. 170442.

Линь Ян (Китай), Станько А.Ю. (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Станько Анна Юрьевна, к. т. н., доцент

СЕДИМЕНТАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ В СИНТЕТИЧЕСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Аннотация: Цель работы – оценка влияния состава биологической жидкости на скорость и степень осаждения промышленных наночастиц SiO_2 . Показано, что наночастицы SiO_2 с размером 11 нм образуют неустойчивые суспензии в воде, в синтетической легочной жидкости, слюне и неорганическом поте стабильность суспензий увеличивается, и более 80 % частиц остается во взвешенном состоянии. В органическом поте частицы всплывают, и кривая седиментации не описывается кинетическим уравнением первого порядка.

Ключевые слова: наночастицы SiO_2 , суспензия, седиментация, синтетические биологические жидкости, спектрофотометрия.

Введение

Наночастицы SiO_2 имеют широкие перспективы применения в биомедицинской сфере, включая доставку лекарств и биосенсорную диагностику [1].