

МОДЕРНИЗАЦИЯ БЛОКА ВЫВОДА ПУЧКА №2 РЕАКТОРА МАРС ДЛЯ НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Ю.А. Кураченко¹, Н.К. Вознесенский¹, А.В. Левченко²

¹Обнинский институт атомной энергетики – филиал НИЯУ МИФИ

²Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр
«Моделирующие системы» (ЭНИМЦ МС), Обнинск

E-mail: ykurachenko@mail.ru

В докладе проанализированы возможности применения пучка медицинского реактора МАРС для нейтронозахватной терапии глубоко-расположенных новообразований. Рассмотрены условия реализации нового подхода, основанные на а) адресной доставке и удержании в мишени активного материала, содержащего бор или гадолиний, и б) применении высокоэнергетического пучка нейтронов большой интенсивности, обеспечивающего глубокое проникновение нейтронов. Приведены результаты численного эксперимента по доставке необходимой дозы в глубоко-расположенную мишень для сформированного пучка реактора МАРС, показано, что требуемое качество результатов вполне достижимо при приемлемом времени экспозиции.

Медицинский реактор МАРС, проект которого успешно развивается в течение десяти лет [1, 2] и находится в высокой степени готовности, предполагает использование двух каналов вывода нейтронных пучков. Один из этих каналов предназначен для проведения нейтронозахватной терапии (НЗТ), другой – для радиобиологических экспериментов и, возможно, для терапии на быстрых нейтронах, или нейтроноударной/дистанционной терапии (НСТ). Но со временем становится все более очевидным, что нейтронная лучевая терапия конкурентоспособна только как НЗТ.

Для реализации нового подхода к НЗТ (см. [3]) на пучке реактора МАРС необходимо создать в мишени заданную концентрацию активного материала, позволяющего использовать «терапевтические»¹ реакции захвата нейтронов, а также удерживать эту концентрацию в течение облучения; при подведении к мишени пучка нейтронов достаточно высокой интенсивности с оптимальным спектральным распределением.

В табл.1 сопоставлены характеристики “in air” (без фантома) для пучков существующих реакторов ТАПИРО [4] и ВВРц [5] и для двух пучков реактора МАРС (проектного и модифицированного, рис.1).

Для модифицированного пучка №2 выполнен численный эксперимент, условия которого состоят в следующем:

¹ Мировым сообществом рассматриваются для НЗТ только две значимые реакции: $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ и $\text{Gd}(n,\gamma)$

- в большом объеме мягкой ткани по оси пучка перемещается сферическая мишень (диаметр 3 см) из той же ткани, в которой равномерно по объёму распределён ^{157}Gd или ^{10}B ;
- для каждого положения мишени рассчитывается отношение средней поглощённой дозы в мишени к дозе в контрольной точке здоровой ткани («терапевтический эффект»);
- кроме того, для каждого положения мишени рассчитывается время экспозиции, при котором в мишени набирается доза 100 Гр.

Результаты расчётов представлены на рис. 2. Из этих результатов очевидны, в частности, преимущества Gd как материала для НЗТ.

Таблица 1

Характеристики “in air” пучков нейтронов, предназначенных для НЗТ

	$\Phi_{tot}, 10^9$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$E_{aver},$ МэВ	Доля нейтронов, %			
			Δ_{epi}	Δ_{th}	Δ_{fast}	
				$E < 0.4$ эВ	$E < 100$ кэВ	$E > 100$ кэВ
Парадигма НЗТ	≥ 1	-	~ 100	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$
ТАПИРО [4]	1.07	0.0085 8	73.8	20.0	5.49	0.666
МАРС, пучок №1	1.05	0.0446	81.8	3.39	10.0	4.81
ГК-1 ВВРЦ [5]	5.39	0.678	18.1	43.6	4.78	33.5
МАРС, пучок №2	0.481	0.991	26.7	5.07	10.3	57.9
Модифиц. п. №2	6.33	0.650	34.6	2.95	13.5	48.9

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Вынужденное использование немодифицируемых пучков неспециализированных исследовательских реакторов породило требования к спектральным характеристикам нейтронных пучков для НЗТ, которые ограничивают доступную для терапии глубину расположения мишени.
2. Пересмотр традиционных требований к пучкам для НЗТ, опирающийся на применение высокоэнергетических мощных нейтронных пучков в сочетании с развитыми средствами селективной доставки и фиксации активного материала, эффективно захватывающего нейтроны, позволяет существенно расширить возможности НЗТ.
3. Медицинский реактор МАРС с модифицируемым пучком дает возможность, при ревизии традиционных требований к пучку для НЗТ, обеспечить поражение глубокорасположенных мишеней за вполне приемлемое время экспозиции.
4. Новый подход в задачах терапии глубокозалегающих новообразований может быть реализован на пучке №2 установки МАРС без значительных изменений существующего Проекта (напр., посредством использования сменного – откатного блока вывода пучка).

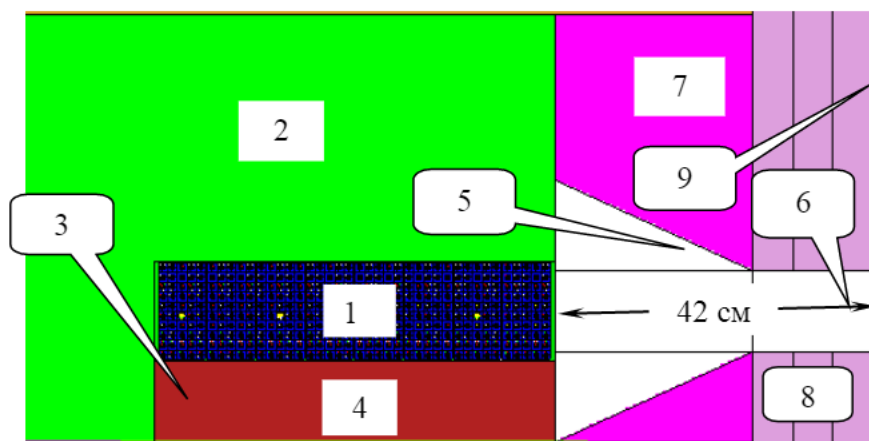


Рис. 1. Аксиальное сечение расчетной модели модифицированного блока вывода пучка №2 реактора МАРС (фрагмент, получено визуализатором входных данных для MCNP) 1 – активная зона; 2 – стальной отражатель; 3 – фрагмент блока вывода пучка №1 для НЗТ; 4 – модификатор спектра канала НЗТ; 5 – конический канал пучка №2; 6 – цилиндрический канал; 7 – свинцовый отражатель; 8 – защита из гидрида циркония; 9 – защита из обеднённого урана

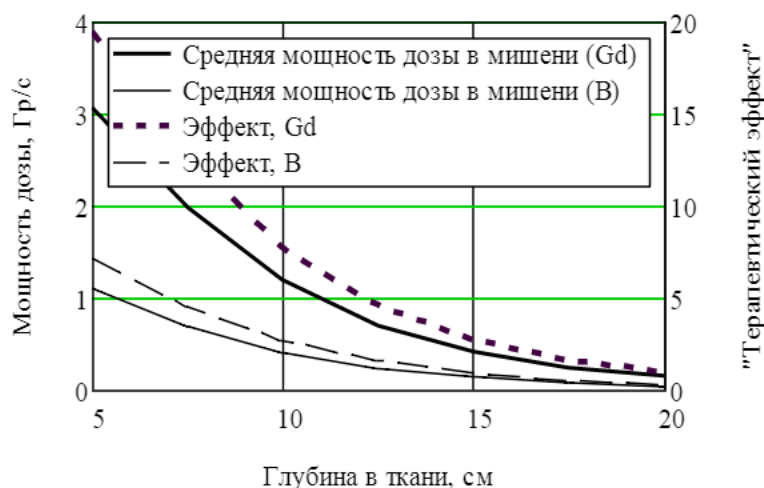


Рис. 2. Результаты численного эксперимента («терапевтический эффект» – отношение дозы в мишени к максимальной дозе в здоровой ткани)

Библиографический список

1. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С. Вывод нейтронных пучков и защита медицинского реактора «МАРС» // Ядерная энергетика, №4, 2006, с. 36 – 48
2. Кураченко Ю.А. Оптимизация блока вывода пучка медицинского реактора «МАРС» // Альманах клинической медицины, Т. XVII. Часть 1, М., 2008. – С. 334-337
3. Кураченко Ю.А., Вознесенский Н.К., Матусевич Е.С. и др. Нейтронозахватная терапия глубоко расположенных новообразований на модифицированном пучке проектируемого медицинского реактора МАРС // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2013, Т. 58, №6, с.36-43
4. Кураченко Ю.А., Моисеенко Д.Н. МАРС и ТАПИРО: реакторы малой мощности для нейтронозахватной терапии // Ядерная энергетика, №1, 2010, с. 153 – 163
5. Кураченко Ю.А. «Бустер-эффект» ^{10}B для пучка ГК-1 реактора ВВРц // Альманах клинической медицины, Т. XVII. Часть 1, М., 2008. – С. 342-345

Сведения об авторах

Кураченко Юрий Александрович – д.ф.-м.н., 1947 г.р.

Вознесенский Николай Константинович – д.м.н., профессор, 1949 г.р.

Левченко Александр Валерьевич – к.т.н., 1980 г.р.

Вид доклада: стендовый