

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА РЕАКТОРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Ю.А. Кураченко^{*}, А.В. Левченко^{**}, Е.С. Матусевич^{*}

^{*}Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск

^{**}Экспериментальный научно-исследовательский и
методический центр «Моделирующие системы», г. Обнинск

E-mail: modsys@ssl.obninsk.ru

Критерии качества для нейтронных пучков, предназначенных для нейтрон-захватной терапии, систематизированы и пополнены. Сопоставлены “in air” и “in phantom” критерии качества для эталонного пучка и пучков существующих и проектируемых реакторов ВВРц и «МАРС». Показана, на основании выполненных расчётов, конкурентоспособность проектируемых пучков для нейтрон-захватной терапии.

Критерии качества (КК) реакторных пучков для нейтрон-захватной терапии (НЗТ) естественным образом делятся на критерии “in phantom” и “in air”. Критерии “in phantom” характеризуют воздействие излучений пучка на орган или ткань. Это дозиметрические величины в облучаемой опухоли и ткани. Критерии “in air” определяются по физическим характеристикам поля излучения на выходе пучка. Эти характеристики локализуются в районе операционного поля, но в отсутствии облучаемого объекта.

Критерии качества пучка “in phantom”

Из простейших представлений о механизме НЗТ следует общее требование максимизировать дозу в опухоли и при этом минимизировать дозу в окружающей здоровой ткани. Кроме того, необходимо обеспечить приемлемое время экспозиции при минимальном общем облучении. В соответствии с этим выработаны следующие критерии, на которые необходимо ориентироваться при расчётном конструировании пучка.

Предельная глубина «выигрыша» AD^1 – глубина x в ткани, на которой доза в опухоли становится равной максимальной дозе в ткани: $D_{tumor}(x) = D_{tissue}^{max}$. Здесь мощность дозы в опухоли и ткани при НЗТ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} D_{tumor} &= CBЭ_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor} + ОБЭ_N \cdot D_N + ОБЭ_O \cdot D_O + ОБЭ_{fast} \cdot D_{fast} + ОБЭ_{\gamma} \cdot D_{\gamma} \\ D_{tissue} &= CBЭ_{B,tissue} \cdot D_{B,tissue} + ОБЭ_N \cdot D_N + ОБЭ_O \cdot D_O + ОБЭ_{fast} \cdot D_{fast} + ОБЭ_{\gamma} \cdot D_{\gamma}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $ОБЭ$ – относительная биологическая эффективность излучений, $CBЭ$ – составная (сочетанная) биологическая эффективность² реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, а D – мощность поглощённой дозы. Выражения (1) описывают основные компоненты дозы, формируемой выходящим пучком:

- $D_{B,tumor}$, $D_{B,tissue}$ – мощность поглощённой дозы в результате реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ в опухоли и ткани соответственно;
- D_N – компонента, обусловленная взаимодействиями нейтронов с ядрами азота;
- D_O – компонента, определяемая реакциями на изотопах кислорода;
- D_{fast} – компонента, обусловленная замедлением нейтронов на ядрах водорода;
- D_{γ} – мощность поглощённой дозы, формируемая гамма-квантами пучка, а также вторичными гамма-квантами, сопровождающими перенос нейтронов в ткани.

¹ Advantage Depth

² Compound Biological Effectiveness (CBE, [1], p. 34).

«Выигрыш» AR^3 – интеграл по глубине мозга или другого органа

$$AR = \int_0^{AD} \frac{D_{tumor}(x)}{D_{tissue}(x)} dx. \quad (2)$$

Мощность дозы в опухоли на предельной глубине «выигрыша» $ADDR^4$ – в обозначениях (1) это $D_{tumor}(AD)$.

Терапевтическое отношение TR^5 – отношение «полезной» дозы в опухоли на глубине x к максимальной «вредной» дозе в ткани на оси пучка:

$$TR(x) = \frac{D_{tumor}(x)}{D_{tissue}^{max}}. \quad (3)$$

Доля «борной» составляющей BF^6 в полной мощности дозы в опухоли:

$$BF(x) = \frac{CBЭ_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}(x)}{D_{tumor}(x)}. \quad (4)$$

Мощность фоновой дозы в здоровой ткани на один нейтрон BD^7 :

$$BD(x) = \frac{ОБЭ_N(x) \cdot D_N + ОБЭ_O \cdot D_O(x) + ОБЭ_{fast} \cdot D_{fast}(x) + ОБЭ_\gamma \cdot D_\gamma(x)}{\Phi_{tot}(x)}, \quad (5)$$

где $\Phi_{tot}(x)$ – плотность полного потока нейтронов.

Набор этих взаимодополняющих дозиметрических критериев исчерпывающим образом характеризует терапевтическое качество пучка. Конкретные значения соответствующих величин для критериев взяты из измерений на «эталонном» пучке FCB⁸ реактора MIT⁹. Но на практике при конструировании пучков широко используются производные от этих критериев характеристики пучка “in air”.

Критерии качества пучка “in air”

В основе критериев “in air” лежат также измерения на FCB MIT. Тем самым, эти критерии являются зависимыми от характеристик хотя и «эталонной», но всё же конкретной конструкции блока вывода пучка. По причине этой зависимости критерии “in air” не могут быть категорическими, однозначными и исчерпывающими. Но эти критерии позволяют существенно упростить задачу расчётного конструирования пучка, исключив из рассмотрения сложные проблемы транспорта излучения “in phantom”. В отличие от критериев “in phantom”, однозначно определяемых и легко сопоставимых, критерии “in air” достаточно вариабельны и по номенклатуре, и по своим значениям. Можно считать, что общепринятыми значениями основных критериев “in air” являются

- плотность потока эпитепловых ($0.4 \text{ эВ} < E < 10 \text{ кэВ}$) нейтронов $\Phi_{epi} \geq 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$;
- отношение мощности поглощённой дозы гамма-излучения к плотности потока эпитепловых нейтронов $D_\gamma / \Phi_{epi} < (2 \div 5) 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$;
- отношение мощности поглощённой дозы быстрых ($E > 10 \text{ кэВ}$) нейтронов к плотности потока эпитепловых нейтронов $D_{fast} / \Phi_{epi} < (2 \div 5) 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$;
- доля тепловых нейтронов ($E < 0.4 \text{ эВ}$) $\Phi_{therm} / \Phi_{epi} < 0.05$;
- отношение аксиального тока эпитепловых нейтронов к потоку $J_{epi} / \Phi_{epi} > 0.7$.

³ Advantage Ratio

⁴ Advantage Depth Dose Rate

⁵ Therapeutic Ratio

⁶ Boron Fraction

⁷ Background Dose

⁸ Fission Converter Beam

⁹ Massachusetts Institute of Technology

В отличие от непререкаемых критериев “*in phantom*” любой из приведенных критериев “*in air*” может быть подвергнут критике. Так, требование $\Phi_{epi} \geq 1 \cdot 10^9$ неоднозначно: широкий диапазон энергии эпитепловых нейтронов $0.4 \text{ эВ} < E < 10 \text{ кэВ}$ не позволяет решить, какой пучок при одной и той же плотности эпитеплового потока имеет лучшее качество в данных конкретных условиях (глубины залегания опухоли и пр.).

В табл. 1 сопоставлены “*in air*” и “*in phantom*” критерии для некоторых существующих и проектируемых пучков для НЗТ. Из представленных данных видно, что характеристики пучков реактора «МАРС» и «ниши экспериментальных устройств» (НЭУ) реактора ВВРц, ориентированных на НЗТ, вполне конкурентоспособны, особенно по представительной совокупности характеристик установки в целом. Для пучка реактора «МАРС» недостаток в “*in air*”-качествах (относительно большое значение D_{fast}/Φ_{epi}), не отразился на «потребительских» “*in phantom*”-качествах. Бóльший, чем для остальных пучков относительный вклад дозы быстрых нейтронов вполне скомпенсировался гораздо меньшей относительной долей гамма-излучения. Меньшая доля гамма-излучения в пучке реактора «МАРС» объясняется несколькими обстоятельствами, главными из которых являются высокие плотности материала активной зоны, отражателя (сталь) и защиты (уран), а также старт-стопный режим работы практически без накопления продуктов деления.

Таблица 1

Характеристики некоторых существующих и проектируемых реакторов и пучков

Реактор	FCB MIT США	Espoo Финлд.	HFR ¹⁰ Нидерл.	TAP ¹¹ Итал.	«МАРС» [2]	НЭУ ВВРц [3, 4]
Мощность, MB m	5	0.25	45	0.005	0.010	10
Обогащение, %	ктн ¹²	20	LEU ¹³	93.5	17	36
$\Phi_{epi}, 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	4.2	1.1	0.33	0.8	0.9÷1.5	2.4
D_{γ}/Φ_{epi} $\text{сГр} \cdot \text{см}^2, 10^{-11}$	1.3	0.5	10	4.1	1.5÷5.4	0.46
D_{fast}/Φ_{epi} $\text{сГр} \cdot \text{см}^2, 10^{-11}$	4.3	2.0	8.6	3.9	12÷33	5.7
J_{epi}/Φ_{epi}	0.84			0.69	0.75÷0.7 7	0.70
$AD, \text{ см}$	9.3	9.0	9.7	9.7	7.9÷8.8	8.9
AR	6	5.8	5.4		5.2÷5.5	5.5
$ADDR,$ $\text{сГр}./\text{мин}$	172	45	19	25	33÷35	76

На рис. 1 представлено терапевтическое отношение для проектируемых пучков в сопоставлении с данной характеристикой для эталонного пучка.

¹⁰ высокопоточный реактор (Петтен, Нидерланды)

¹¹ реактор на быстрых нейтронах TAPIRO

¹² конвертер тепловых нейтронов

¹³ Low Enriched Uranium, обогащение < 20 %

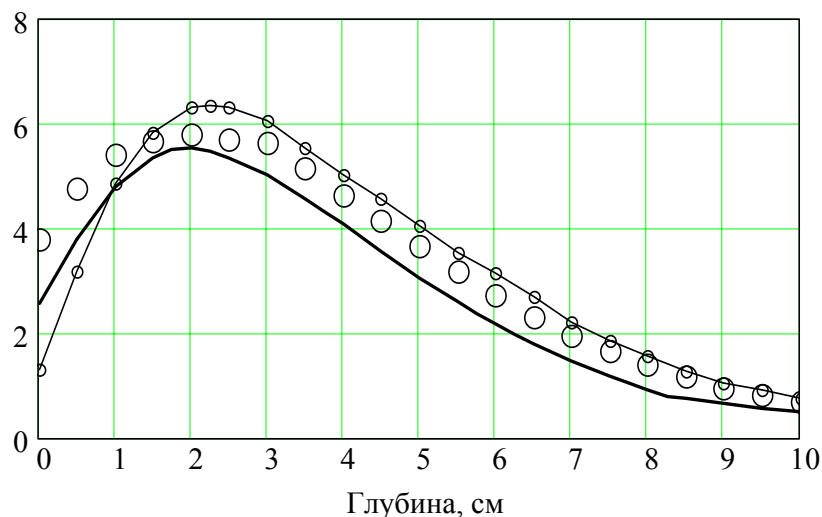


Рис. 1. Терапевтическое отношение в зависимости от глубины в ткани:
 — пучок реактора «МАРС»; ○ ○ ○ пучок НЭУ реактора ВВРц;
 ○—○—○ эталонный пучок реактора FCB MIT

Что касается “*in phantom*”-критериев для НЭУ ВВРц в целом, то они также вполне конкурентоспособны: так, по критерию *ADDR* НЭУ ВВРц уступает только эталонному FCB MIT. На рис. 2 представлено типичное распределение доз в опухоли и ткани, полученное для одного из вариантов вывода пучка НЭУ ВВРц. Это распределение наглядно иллюстрирует избирательный эффект НЗТ.

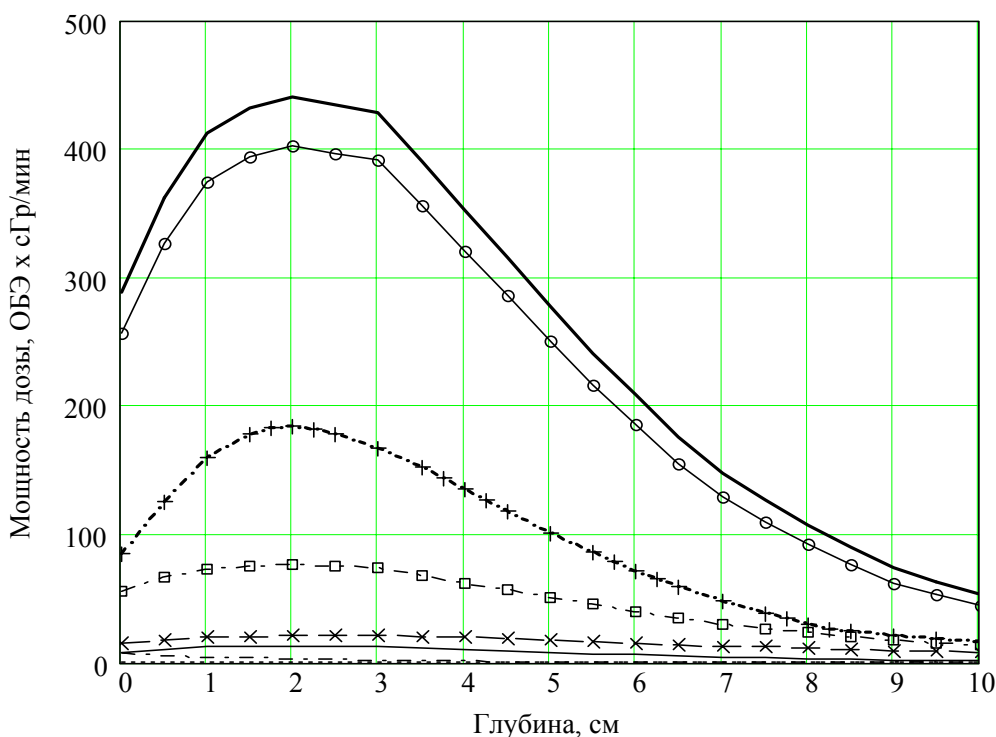


Рис. 2. Мощности доз в опухоли и ткани и их компоненты для НЭУ ВВРц.
 Для сопоставления представлено распределение дозы в опухоли
 для пучка реактора «МАРС»:
 — D_{tumor} ; ○—○—○ $СБЭ_{B,tumor} \times D_{B,tumor}$; □—□—□ D_{tissue} ; $ОБЭ_{fast} \times D_{fast}$;
 — $ОБЭ_N \times D_N$; $ОБЭ_O \times D_O$; -x-x-x-x- $ОБЭ_{\gamma} \times D_{\gamma}$;
 +-+-+ D_{tumor} для пучка реактора «МАРС»

- Current status of neutron capture therapy / Report of International Atomic Energy Agency No. 1223. Vienna, 2001, 289 p.
- *Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Левченко А. В., Матусевич Е.С.* Вывод нейтронных пучков и защита медицинского реактора «МАРС» // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №4. – С. 36-48.
- *Кураченко Ю.А., Матусевич Е.С., Ульяненко С.Е.* Перспективы реактора ВВРц (ГНЦ ФХИ) для нейтронной терапии. Доклад на II Евразийском конгрессе по медицинской физике и инженерии. Медицинская физика, 21 – 25 июня 2005. В кн.: «II Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии. Медицинская физика», М., 2005, с. 157-158.
- *Клёнов А.Н., Кураченко Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С.* Применение методов математического моделирования в ядерной медицине / Под ред. д.ф.-м.н. Е.С. Матусевича – Обнинск: СОЦ- ИН, 2006. – 204 с.

REACTOR BEAM PERFORMANCE CRITERIA FOR NEUTRON CAPTURE THERAPY

Yu.A. Kurachenko, A.V. Levchenko, Eu.S. Matusevich

The reactor beam performance criteria for neutron capture therapy are classified and replenished. The reference beam “in air” and “in phantom” criteria are compared with these ones of existing and designing beams of the “MARS” and “VVRc” reactors. Based on calculation performed, competitiveness of these beams is confirmed.