

МАРС И ТАПИРО: РЕАКТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Ю.А. Кураченко, Д.Н. Моисеенко

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Рассмотрены достоинства и недостатки двух установок для нейтронозахватной терапии: реактора ТАПИРО (Италия) и проектируемого отечественного реактора МАРС. Сопоставление установок выполнено по совокупности характеристик: состав активных зон, максимальные и средние плотности потоков в зонах, спектры нейтронов на выходе из зоны и др. Особое внимание уделено сравнению двух установок по отношению к радиационной и ядерной безопасности. Показаны очевидные преимущества реактора МАРС. Вторую группу сопоставляемых характеристик составили рассчитанные характеристики качества выводимых пучков по отношению к нейтронозахватной терапии («in air» и «in phantom»). Кроме того выполнен расчетный анализ характеристик защиты пациента при проведении сеанса терапии. Сделан вывод, что с точки зрения радиационной и ядерной безопасности, габаритов и массы установки в целом и технологичности проектируемый реактор МАРС превосходит ТАПИРО, а по отношению к нейтронной терапии не уступает ему. Единственное неоспоримое преимущество ТАПИРО – реальное существование.

Ключевые слова: реакторы, пучки для нейтронозахватной терапии, малая мощность, безопасность.

Key words: nuclear reactor, beams for neutron capture therapy, small power, nuclear and radiation safety.

ВВЕДЕНИЕ

Реактор ТАПИРО (Италия, окрестности Рима) вышел на проектную мощность в 1971 г. [1]. В начале 90-х на реакторе установили **тепловую** колонну из блоков графита с небольшой камерой (полостью) в центре. Эту полость реактора почти десять лет использовали для предварительных экспериментов на малых лабораторных животных для решения задач нейтронозахватной терапии (НЗТ). Но для предклинических испытаний, а тем более для последующего возможного клинического применения спектр нейтронов и гамма-излучения в экспериментальной полости в целом непригоден. На характеристики излучений в реакторном пучке, предназначенном для НЗТ, налагаются достаточно специфические и противоречи-

вые требования, которые могут быть выполнены только при определенных конфигурации и составе материалов блока вывода [2]. Поэтому к концу 90-х было принято решение о реконструкции колонны. Действительной реконструкции предшествовал длительный этап расчетов и последующего конструирования. В эти работы были вовлечены лучшие силы мирового сообщества специалистов по расчету транспорта излучений реактора.

Кроме того, как для тепловой, так и для проекта эпитепловой колонн было выполнено большое количество экспериментальных работ. Среди нескольких сотен публикаций, содержащих расчетные и экспериментальные данные (иногда противоречивые), приходится выбирать вызывающие наибольшее доверие.

В результате исследований сложилась концепция оптимальной конструкции **эпитепловой** колонны (ЭТК), качество излучений на выходе из которой удовлетворяет требованиям к пучку для НЗТ. На рисунке 1 представлено горизонтальное сечение расчетной модели ЭТК, реконструированное при выполнении данной работы по литературным данным. Рисунок позволяет получить некоторое представление о конструктивных решениях, принятых для обеспечения необходимого качества пучка.

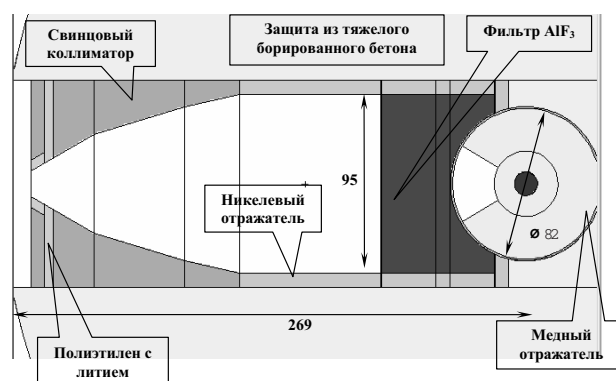


Рис. 1. Горизонтальное сечение расчетной модели, принятой для ЭТК реактора TAPIRO (получено с помощью визуализатора программы MCNP; размеры даны в см)

Основное принципиальное решение – активное применение «нейтронной оптики». Через окно в отражателе нейтроны попадают в «формирователь спектра» (фильтр) из фторида алюминия (AlF_3). Дальнейший транспорт нейтронов и гамма-излучения определяется полостью квадратного сечения $95 \times 95 \text{ см}^2$ с большой протяженностью и коллиматором. На выходе ЭТК доля нейтронов, пришедших непосредственно из окна, составляет всего 25%, остальные 75% формируются рассеянием в отражателе и в фильтре с последующим натеканием из коллиматора и защиты. Такое соотношение обусловлено спецификой транспорта нейтронов в никеле и, в особенности, в свинце.

Особенности конструкции реакторной установки медицинского назначения МАРС достаточно подробно описаны в наших публикациях [3, 4], поэтому здесь приведем только сечение расчетной модели блока вывода пучка для НЗТ (рис. 2), дающее общее представление.

Для реактора МАРС в соответствии с целью создать малогабаритную установку для размещения непосредственно в клинике (или вблизи нее) принят другой принцип формирования пучка:

- максимально сократить размеры блока вывода пучка, особенно, вдоль оси канала пучка (приблизив источник к операционному полю);

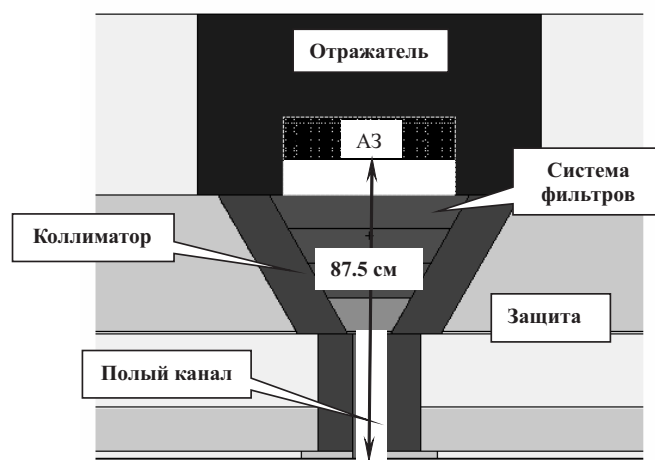


Рис. 2. Аксиальное сечение одного из вариантов блока вывода пучка НЗТ для реактора МАРС (фрагмент; получено с помощью визуализатора программы MCNP)

- применить (наряду с системой фильтров) составной свинцовый коллиматор, состоящий из конического и цилиндрического участков, для эффективного сбора нейтронов, рассеянных элементами блока вывода;

- минимизировать массу и габариты защиты от излучений, обеспечив приемлемый уровень дозы вблизи выхода пучка и в медицинском боксе в целом.

Один из вариантов многослойной защиты блока вывода представлен на рис. 2. При помощи оптимизационных расчетов получена такая последовательность слоев борированного полиэтилена (ПБ) и обедненного урана (У) в направлении от поверхности активной зоны (АЗ) к операционному полю:

У (10 см) + ПБ (30 см) + У (20 см) + ПБ (15 см) + У (3 см).

РАСЧЕТНЫЙ АППАРАТ

Малые габариты блока вывода пучка реактора МАРС позволяют выполнять его расчеты по программам, реализующим метод Монте-Карло. В данном случае применялась программа MCNP5 [5], которая использовалась и для расчетов транспорта излучений в ЭТК реактора TAPIRO. Большие размеры ЭТК реактора TAPIRO не являются в данном случае препятствием к применению программ расчета методом Монте-Карло: реальный вклад в функционалы потока излучений на выходе пучка и в его окрестностях вносит ограниченное окружение ЭТК. Метод Монте-Карло не имеет аналогов в расчетах транспорта излучений в областях с малыми размерами относительно длины свободного пробега ведущего излучения.

С целью повышения надежности результатов для блока вывода реактора МАРС были выполнены расчеты по отечественной программе КАСКАД [6] с применением одной из версий метода дискретных ординат [7] (отметим, что данная программа имеет большое количество расчетных методик). Основанием для расчетов по программе КАСКАД явилось то обстоятельство, что геометрия блока вывода для пучка НЗТ реактора МАРС достаточно близка к осесимметричной; программа же позволяет решать задачи для цилиндрических осесимметричных композиций. «Нецилиндричность» АЗ реактора МАРС (форма АЗ – прямая призма, большей гранью обращенная к блоку вывода), как показано в расчетах по программе MCNP5, не влияет на характеристики излучений на выходе из канала. Для расчетов по программе КАСКАД конический участок коллиматора аппроксимировался цилиндрическими «ступеньками» (кольцами) с достаточно малыми диаметрами и высотой.

Если расчеты по программе MCNP5 выполнялись по модели непрерывного замедления, то в расчетах по программе КАСКАД использовались различные библиотеки групповых констант (43 [8], 64 [9] и 314 [10] энергетических групп в сумме для нейтронов и гамма-излучения).

Расчет транспорта излучения в блоке вывода пучков производился при решении условно-критической задачи с итерированием источника деления. При этом АЗ для обеих установок моделировалась гомогенной. Для этого были соответствующие основания:

- достаточно «жесткий» спектр нейтронов при малых размерах АЗ (особенно это относится к реактору ТАПИРО);
- сопоставление характеристик выходящего из АЗ излучения, выполненное для установки МАРС при гомогенной и гетерогенной композициях АЗ (расчет методом Монте-Карло) показало практическое их совпадение.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Сопоставление характеристик активных зон

Приведенные далее результаты для реакторов МАРС и ТАПИРО получены при выполнении данной работы. В том случае, когда для реактора ТАПИРО имеются литературные данные, они также приводятся (в скобках) с соответствующей ссылкой.

Из данных табл. 1 видно радикальное различие установок. Прежде всего это различие в материальном составе. Применение высокообогащенного топлива в «старом» реакторе ТАПИРО противоречит современным тенденциям перехода на низкообогащенное топливо для исследовательских реакторов [11]. В соответствии со сказанным количество ^{235}U в АЗ реактора ТАПИРО вчетверо больше, чем в АЗ реактора МАРС. Отметим, что графа «энергонапряженность» приведена только для информации: энергонапряженность АЗ обеих установок невелика, а по сравнению с энергетическими реакторами просто ничтожна. Так, средняя энергонапря-

Таблица 1

Основные характеристики активных зон двух установок

	ТАПИРО	МАРС
Топливо	U (98.5%) + Mo	UO ₂
Обогащение по ^{235}U	93.5%	17 %
Загрузка	25.2 кг (U + Mo)	37.5 кг UO ₂
	~ 23 кг ^{235}U	5.62 кг ^{235}U
Габариты, см	$R \times H = 6.29 \times 10.95$	$50.4 \times 43.2 \times 12.4$
Объем, л	1.36	27.0
Номинальная мощность, кВт	5	10
Энергонапряженность, кВт/л	3.67	0.370
K_{eff} при стартовой загрузке	1.072	1.008
Теплоноситель	Гелий	Вода
Доля делений в энергетических диапазонах, %		
$E < 0.625$ эВ	0	77.0
0.625 эВ $< E < 100$ кэВ	10.8	19.0
$E > 100$ кэВ	89.2	4.0

женность АЗ реактора ВВЭР-1000 равна 111 кВт/л. Более серьезное значение носит расхождение в эффективном коэффициенте размножения. Его значение для реактора ТАПИРО слишком велико для исключения вероятности реактивной аварии. С другой стороны, старт-стопный режим работы реактора МАРС (400 ч/год, кампания 20 лет) позволяет иметь небольшой запас реактивности. Потеря реактивности на выгорание при принятом режиме работы ничтожна: $-0.17\% \Delta K/K$, при этом все температурные коэффициенты реактивности отрицательны [12].

Расчеты последствий гипотетической (запроектной) аварии, выполненные для эскизного проекта реактора МАРС, показали, что эти последствия могут быть локализованы в пределах помещения реактора. Работу по устранению последствий можно проводить во время протекания аварии, воздействие на население отсутствует [13].

Наконец, приведенное распределение делений по энергии нейтрона, вызывающего деление, свидетельствует о том, что ТАПИРО – «весьма быстрый» реактор, а МАРС – «слегка промежуточный».

Далее все данные по реакторам ТАПИРО и МАРС приводятся для номинальной мощности каждого из них (5 и 10 кВт соответственно). Статистическая погрешность рассчитанных характеристик для обеих установок по программе MCNP5 обычно 0.1–0.01%, поэтому она в таблицах не приводится. Погрешности литературных данных как экспериментальных, так и расчетных приводятся в случае их наличия в литературе.

Основные характеристики потока нейтронов в активных зонах двух установок помещены в табл. 2. Данные для ТАПИРО, полученные при выполнении работы, выделены полужирным шрифтом.

Таблица 2

Характеристики потока нейтронов в активных зонах двух установок

	ТАПИРО	МАРС
Максимальная плотность потока, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$3.15 \cdot 10^{12}$;	$3.22 \cdot 10^{11}$
Средняя плотность потока, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$(4 \cdot 10^{12}[14]; 2.2 \cdot 10^{12}[15]; 3 \cdot 10^{12}[16])$	
Средняя энергия нейтронов, МэВ	$2.22 \cdot 10^{11}$	$1.13 \cdot 10^{11}$
	1.41	0.774

Если максимальный поток реактора ТАПИРО отличается от среднего в 14 раз, то для реактора МАРС это отличие ~ в три раза. Это обусловлено малыми размерами АЗ реактора ТАПИРО, а также отсутствием в АЗ замедлителя.

Отметим, что данные работ [14], [15] опубликованы одновременно, в 1998 г., но данные [14] получены расчетом, а данные [15] – из эксперимента. Результаты [16] получены совместным расчетом и экспериментом в 2003 г., и эти данные вполне согласуются с полученными нами при выполнении настоящей работы.

Рисунок 3 дополняет данные табл. 1, 2. Применение программы КАСКАД для расчета ТАПИРО в данном случае не противоречит сказанному выше в разделе о расчетном аппарате: АЗ и отражатель реактора ТАПИРО (без ЭТК) вполне адекватно моделируются в цилиндрической геометрии.

Сопоставление характеристик пучков для НЗТ

Критерии качества пучков для НЗТ разделяются на критерии «in air», характеризующие поле нейтронов на выходе без облучаемого фантома, и критерии «in phantom», определяющие дозовые характеристики в ткани [17].

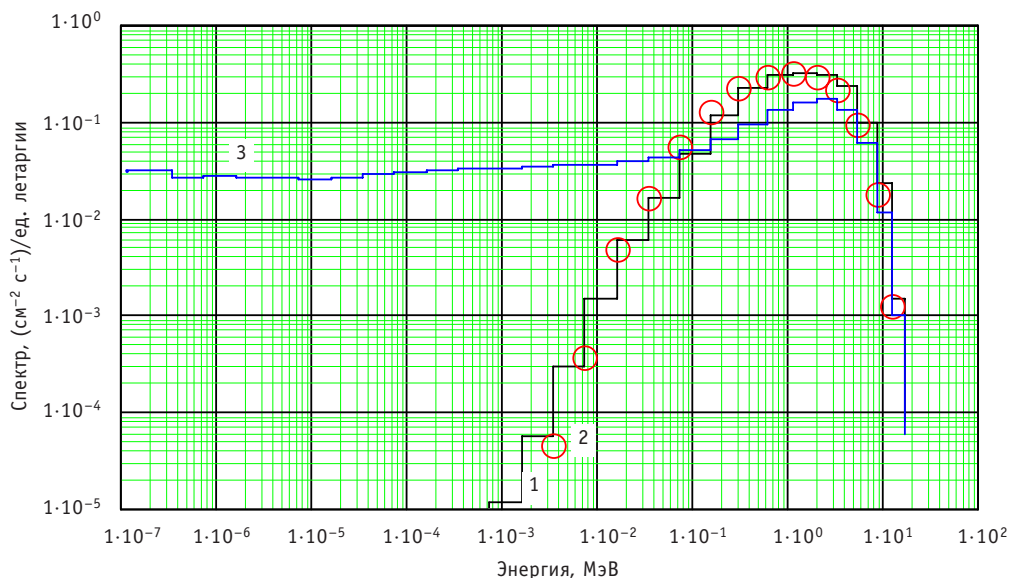


Рис. 3. Спектр нейтронов в центре АЗ (каждый из спектров нормирован на свой флюенс, равный единице): 1 – TAPIRO (MCNP); 2 – TAPIRO (КАСКАД); 3 – МАРС (MCNP)

Характеристики «in air». В таблице 3 сопоставлены характеристики пучков двух реакторов и критерии «in air» (плотность полного, эпитеплового и теплового потоков, направленность пучков, средняя энергия нейтронов и относительные величины доз быстрых нейтронов и гамма-излучения).

Представленные в табл. 3 данные свидетельствуют о вполне удовлетворительном качестве пучков обеих установок относительно НЗТ. Расхождение в значениях относительных доз, рассчитанных в работе, с литературными данными для TAPIRO, нуждается в объяснении. Если для исследуемых пучков величина D_{fast} рассчитана для ткани, то данные [19] представлены для воды («Neutron dose in water

Таблица 3

Критерии «in air» и соответствующие характеристики пучков

	Критерий	TAPIRO	МАРС
$\Phi_{tot}, \text{см}^{-1}\text{с}^{-1}$	–	$1.07 \cdot 10^9$; (1.15·10 ⁹ [17])	1.05·10 ⁹
$\Phi_{epi} (0.5 \text{ эВ} < E < 10 \text{ кэВ}), \text{см}^{-1}\text{с}^{-1}$	$\geq 10^9$	$0.788 \cdot 10^9$; (0.80·10 ⁹ [19]); (9.61 ± 0.07) · 10 ⁸ [16]; (7.45 ± 0.15) · 10 ⁸ [16] [*]	0.859·10 ⁹
$(\Phi_{therm} / \Phi_{tot}) \times 100, \%$	≤ 5	20.0 ; (3.4[16]); (1.9[16]) [*]	3.39
Отношение J_{epi} / Φ_{epi}	≥ 0.7	0.78 (0.73 [19])	0.73
Средняя энергия нейтронов, МэВ	–	0.00857	0.0446
$D_{fast} / \Phi_{epi}, 10^{11} \text{ сГр} \times \text{см}^2$	2 – 5	8.49 ; 3.4[19]; (5.38 ± 0.07)[16]; (5.06 ± 0.76)[16] [*]	27.6
$D_{\gamma} / \Phi_{epi}, 10^{11} \text{ сГр} \times \text{см}^2$	2 – 5	6.77 ; 4.1[19]; (3.74 ± 0.13)[16]; (6.90 ± 1.00)[16] [*]	4.82

^{*}Данные из эксперимента

$> 10 \text{ keV} / \Phi_{n \text{ epith}}$). Далее, данные [19] по D_γ также снабжены не совсем ясным комментарием: «g whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$ ». В этом отношении следует отметить, что полученные нами расчетные значения «вредных» доз более удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Расхождение в значениях вклада тепловых нейтронов требует дальнейшего исследования (возможно уточнение конструкции, условий измерения и т.д.)

Относительно большая доза быстрых нейтронов для пучка реактора МАРС не является критической: в отличие от гамма-излучения, быстрые нейтроны замедляются в ближайшей ко входу пучка области фантома и поэтому их негативное влияние сравнительно невелико.

Характеристики «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 критерии «in phantom» [17], на которые необходимо ориентироваться при анализе окончательной конфигурации блока вывода пучка. Кратко напомним основные из этих критериев.

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

$$\begin{aligned} D_{\text{tumor}} &= \text{СБЭ}_{B,\text{tumor}} \cdot D_{B,\text{tumor}} + \text{ОБЭ}_N \cdot D_N + \text{ОБЭ}_0 \cdot D_0 + \text{ОБЭ}_{\text{fast}} \cdot D_{\text{fast}} + \text{ОБЭ}_\gamma \cdot D_\gamma, \\ D_{\text{tissue}} &= \text{СБЭ}_{B,\text{tissue}} \cdot D_{B,\text{tissue}} + \text{ОБЭ}_N \cdot D_N + \text{ОБЭ}_0 \cdot D_0 + \text{ОБЭ}_{\text{fast}} \cdot D_{\text{fast}} + \text{ОБЭ}_\gamma \cdot D_\gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

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

– $D_{B,\text{tumor}}, D_{B,\text{tissue}}$ – мощность поглощенной 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_0 – компонента, определяемая реакциями на изотопах кислорода;

– D_{fast} – компонента, обусловленная замедлением нейтронов на ядрах водорода;

– D_γ – мощность поглощенной дозы, формируемая гамма-квантами пучка, а также вторичными гамма-квантами, сопровождающими перенос нейтронов в ткани.

«Выигрыш» AR^3 – отношение интегралов по глубине мозга или другого органа:

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

Величина AR характеризует меру воздействия на здоровую ткань: чем меньше величина AR , тем большую дозу получит ткань.

Мощность дозы в опухоли на предельной глубине «выигрыша» $ADDR^4$ – в обозначениях (1) это $D_{\text{tumor}}(AD)$. Величина $ADDR$ характеризует, вообще говоря, необходимое время экспозиции.

¹ Advantage Depth

² Compound Biological Effectiveness (CBE, [20], p. 34).

³ Advantage Ratio

⁴ Advantage Depth Dose Rate

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

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

В таблице 4 представлены три описанные характеристики «in phantom», а в качестве критериев приведены данные для *Fission Converter Beam of Massachusetts Institute of Technology* [21, 22], которые приняты мировым сообществом как эталонные. Далее все данные по характеристикам «in phantom» приведены к одинаковому содержанию ^{10}B в опухоли и ткани, соответственно 65 и 18 ppm. В качестве фантома был выбран цилиндр $R \times H = 15 \times 20 \text{ см}^2$ простейшего состава: четырехкомпонентная ткань ICRU [23]. Ось фантома совпадала с осью пучка, фантом размещался вплотную к выходу пучка.

Таблица 4

**Критерии «in phantom»
и соответствующие характеристики пучков**

	FCB MIT	TAPIRO	МАРС
AD , см	9.7*	9.5 (9.4*)	8.8
AR	5.0*	5.2	5.5
$ADDR$, сГр/мин	172*	33.9 (32*)	33.3

*Данные [24]

Из данных табл. 4 видно, что характеристики «in phantom» для обоих исследуемых пучков близки к эталонным. Большое значение $ADDR$ для *FCB MIT* обусловлено относительно большой мощностью этого реактора (5–6 МВт; данные представлены для 6 МВт) и, в основном, применением конвертера тепловых нейтронов. Очевидно, что такое значение $ADDR$ недостижимо для принятых конструкций рассматриваемых реакторов малой мощности.

В дополнение к данным табл. 4 на рис. 4 представлено терапевтическое отношение для исследуемых пучков в сопоставлении с эталонным TR и пучком протонного ускорителя (расчет; экстраполяция). Для данной характеристики следует признать некоторое преимущество пучка TAPIRO над пучком реактора МАРС.

Характеристики защиты от излучений. Для пучка реактора МАРС были выполнены расчеты по максимизации радиального градиента поля излучения для снижения дозовой нагрузки как на пациента в течение сеанса терапии, так и на персонал при остановленном реакторе [2]. Выход пучка ЭТК реактора TAPIRO также защищен слоем полиэтилена с литием. Но в многочисленной библиографии по TAPIRO нет работы, посвященной конкретной задаче минимизации дозовых нагрузок. В этом отношении представляет интерес сопоставление радиальных дозных полей на выходе пучков для обеих установок.

На рисунке 5 представлены радиальные распределения мощностей доз в сопоставлении с уровнем двух детерминированных эффектов облучения после часа экспозиции (лучевой ожог с образованием эритемы, т.е. покраснения кожи, и возникновение катаракты). По отношению к этим эффектам защита обоих пучков вполне удовлетворительна, тем более что в распоряжении медиков есть дополнительные средства снижения дозовых нагрузок при лучевой терапии (медикаментозные средства, болюсы и пр.). Но на периферии ($R \sim 50 \text{ см}$) различие доз для

⁵ Therapeutic Ratio

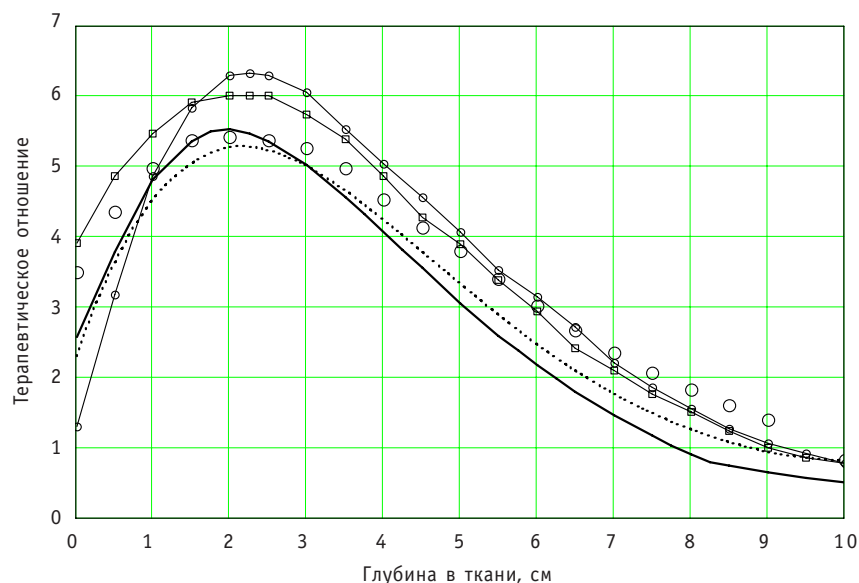


Рис. 4. Терапевтическое отношение для пучков исследуемых реакторов в сопоставлении с эталонным пучком FCB MIT и пучком, генерируемым ускорителем: — — — — — MARC (KASKAD); — MARC (MCNP); ○ — пучок FCB MIT (эталон); □ — протонный ускоритель [25]; ○ — TAPIRO

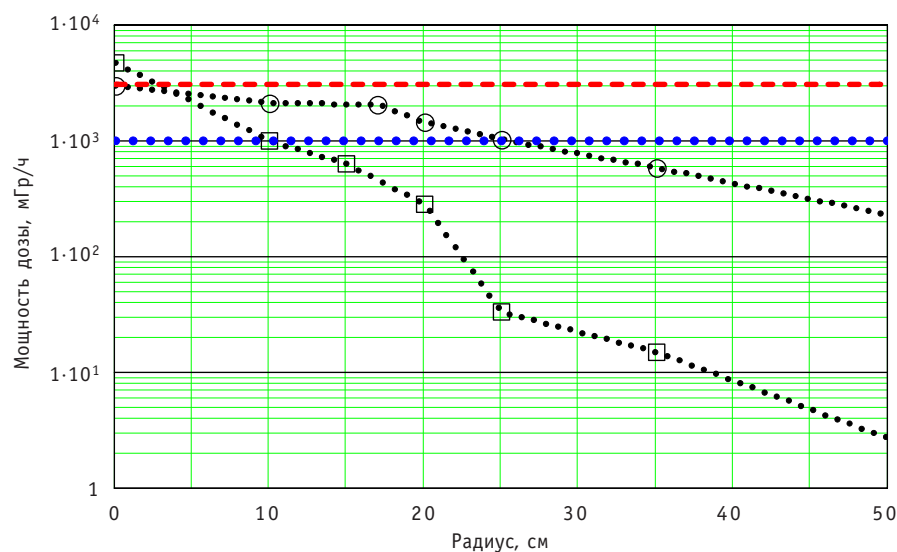


Рис. 5. Радиальное распределение мощности поглощенной дозы на выходе пучков: □ — MARC; ○ — TAPIRO; — — — — — эритема после часа экспозиции (проявление через две недели); — катаракта после часа экспозиции (проявление через две недели)

двух пучков достигает двух порядков. При положении пациента, подобном применяемому при исследованиях доз в антропоморфном фантоме (перпендикулярно оси пучка, см. [19] и др.), расхождения в эффективных дозах могут быть достаточно велики (не в пользу TAPIRO). Соответствующие расчеты предполагается провести в ближайшее время, после завершения вычислительной модели воксельного антропоморфного фантома.

Следует отметить, что оптимизационные расчеты всей защиты от излучений, выполненные для реактора MARC, позволили получить минимальные габариты и массу установки в целом (~ 70 т, [3]). Для сравнения укажем, что масса только

защиты от излучений даже малогабаритных реакторных установок достигает нескольких сотен тонн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Литературные данные по реактору TAPIRO являются достаточными для адекватной расчетной реконструкции эпитепловой колонны; рассчитанные характеристики пучка для НЗТ соответствуют полученным ранее расчетным и экспериментальным данным.

2. С точки зрения ядерной и радиационной безопасности, компактности и технологичности проектируемый реактор MAPC превосходит существующий реактор TAPIRO.

3. Характеристики пучка реактора MAPC по отношению к задачам нейтронозахватной терапии не уступают характеристикам пучка реактора TAPIRO.

4. Единственное действительное преимущество реактора TAPIRO состоит в его реальном существовании. Но это существование не может быть продолжительным: в литературе есть упоминание о предполагаемой дате остановки TAPIRO (2011 г.); опровержения этой информации найти не удалось.

Литература

1. Reattore TAPIRO: ENEA Internal Document, DISP/TAP/85-1, 1985. In: *Design of neutron beams for boron neutron capture therapy in a fast reactor/Current status of neutron capture therapy*, IAEA-TECDOC-1223, 2001.
2. Кураченко Ю.А. Реакторные пучки для лучевой терапии: критерии качества и расчетные технологии // Медицинская физика. – 2008. – №2 (38). – С.20-28.
3. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Левченко А.В., Матусевич Е.С. Вывод нейтронных пучков и защита медицинского реактора MAPC // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №4. – С. 36-48.
4. Кураченко Ю.А. Оптимизация блока вывода пучка медицинского реактора MAPC // Альманах клинической медицины. Т. XVII. Ч. 1. – М., 2008. – С. 334-337.
5. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. Authors: X-5 Monte Carlo Team // LA-UR-03-1987. April 24, 2003.
6. Voloschenko A.M., Shwetsov A.V. The KASKAD-1 Two-Dimensional Discrete Ordinates Nodal Transport Code // Proceedings of International Topical Meeting on Advances in Mathematics, Computations and Reactor Physics. Pittsburgh, USA, April 28 – May 2, vol. 5, p. 30.3 4-1. 1991.
7. Carlson B.G. Solution of the transport equation S_n -approximations. Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-1891, 1955.
8. Абагян Л.П., Базаянц Н.О., Николаев М.Н. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты: Справочник – М.: Энергоиздат, 1981.
9. Дубинин А.А., Колесов В.Е., Кривцов А.С. и др. Библиотека групповых констант для расчета источников фотонов в ядерно-технических установках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерные константы». – 1986. – Вып. 2.
10. ABBN-90: Multigroup Constant Set for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields and Functionals, Including the CONSYST2 Program / ORNL, RSICC DATA LIBRARY COLLECTION DLC-182, September 1995.
11. NUCLEAR TECHNOLOGY REVIEW 2006 / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA/NTR/2006VIENNA, 2006.
12. Левченко В.А., Казанский Ю.А., Кураченко Ю.А. и др. Источник нейтронов для нейтронозахватной терапии // Альманах клинической медицины. Том XII. – М., 2006. – С. 87.
13. Казанский Ю.А., Кураченко Ю.А., Матусевич Е.С. и др. Ядерная и радиационная безопасность реакторной установки MAPC / Тез. докл. X Международн. конф. «Безопасность АЭС и подготовка кадров». – Обнинск, 2007. – С. 46.

14. *Burn K.W. et al.*, Results of Monte Carlo neutronic calculations on the TAPIRO core for the reevaluation of the operating reactor power, Technical Report ENEA TLE TAPIRO 98/A – 005, December 1998.
15. *Angelone M. et al.* Neutron flux Measurement at Tapiro fast reactor for APDs Irradiation fluence evaluation//CMS NOTE 1998/060CERN, CH-1211 GENEVA 23, Switzerland. October 14, 1998.
16. *Rosi G. et al.* ROLE OF THE TAPIRO FAST RESEARCH REACTOR IN NEUTRON CAPTURE THERAPY IN ITALY. Calculations and measurements//IAEA-CN-100/97. In: Research Reactor Utilization, Safety, Decommissioning, Fuel and Waste Management Proceedings of an international conference 10-14 November 2003 Santiago, Chile. pp. 325-338.
17. *Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Критерии качества нейтронных пучков для лучевой терапии//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №1. – С. 139-149.
18. *Manfredotti C. et al.* Fabrication and characterization of wide area SiC detectors for neutron monitoring / Solid State Physics Group. Experimental Physics Department, University of Turin (Italy). CERN, 4th RD50 Workshop, May 5-7, 2004 <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>
19. *Burn K.W. et al.* The The Epithermal Neutron Beam for BNCT under Construction at TAPIRO: Physics / NPDC19 Pavia 5-9 September 2005 / EPS Euroconference XIX Nuclear Physics Divisional Conference. Journal of Physics: Conference Series 41 (2006) 187-194.
20. Current status of neutron capture therapy / Report of International Atomic Energy Agency № 1223. – Vienna, 2001. – 289 p.
21. *Binns P.J., Riley K.J., Harling O.K.* Dosimetric comparison of six epithermal neutron beams using an ellipsoidal water phantom. Research and development in neutron capture therapy, 405-409. Monduzzi Editore, 2002.
22. *Harling O.K., Riley K.J.* A critical assessment of NCT beams from fission reactors. Research and development in neutron capture therapy, 159-162. Monduzzi Editore, 2002.
23. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46; 1992
24. *Rosa R.* THE ENEA-CASACCIA RESEARCH REACTORS CURRENT STATUS// September 12-16, 2005 TRT-IGORR Joint Meeting – Gaithersburg, MD http://www.fz-juelich.de/iff/wms_lab05
25. *Kononov O.E., Kononov V.N. et al.* Accelerator based neutron sources for neutron and neutron capture therapy/Preprint IPPE-2985. – Obninsk, 2003.

Поступила в редакцию 09.03.2010

There are represented the results of calculation and experimental research of hydrodynamics in a contour of repeated compulsory circulation RBMK and behaviour of impurity during a stop of the block (decrease in power). Recommendations for an effective using of the given processes to decrease a concentration of impurity in volume of contour of repeated compulsory circulation, to lower a dose of radiation during repair work is developed.

УДК 621.039.534

Control of Flow Rate in Fuel Channel RBMK-type Reactor from Information about Coolant Activity \ A.M. Zagrebayev, S.V. Kostanbayev, N.V. Ovsyannikova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 3 titles.

The paper presents the computational and measuring system for control of coolant flow rate in technological channels of RBMK-type reactors from experimental data about intensity of gamma-radiation emitted by ^{16}N isotope in light-water coolant. Also, the paper presents the following aspects of computational and measuring system: mathematical model of coolant activation process, numerical algorithm for determination of coolant flow rate in technological channels, structure and operation of the computational and measuring system, the results obtained in trial operation of the computational and measuring system at Kursk NPP Unit 1, applicability area and typical errors in determination of coolant flow rate.

УДК 621.039.548

Measurement of Thermal Properties of the Fuel Rods Power Nuclear Reactors by Method of Pulse Heating \ V.B. Kruglov, A.B. Kruglov, I.G. Pozdeeva, V.S. Kharitonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 illustrations. – References, 8 titles.

In the work the method of definition of thermophysical properties of the fuel elements of power nuclear reactors such as heat conductivity, a thermal capacity of fuel and heat transfer factor between fuel and rod cover is offered. Results of check of a method of definition of a thermophysical capacity of the fuel rod elements reactor VVER are shown.

УДК 621.039.52:615.849.1

The MARS and TAPIRO Small Capacity Reactors for BNCT Applications \ Yu.A. Kurachenko, D.N. Moiseenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 25 titles.

The advantages and disadvantages of two small capacity reactors: TAPIRO (Italy, existing now) and MARS (Russia, projectible) are analyzed for boron neutron capture therapy (BNCT) applications. Comparison of the installations is done for a set of characteristics, namely, core composition, maximal & average flux in a core, leakage spectrum etc. Special attention is focused on a comparison of the installations with respect to radiation and nuclear safety. The advantages of the MARS reactor are apparent here. The next batch of comparing characteristics was the beam quality rating relative to BNCT (accordingly to «in air» and «in phantom» criteria). Besides, patient protection at therapy session was analyzed by computation. A conclusion is drawn that relative to radiation & nuclear safety, overall dimensions & total mass and manufacturability as well, the projectible MARS reactor exceeds the existing TAPIRO one. As for BNCT applications, the MARS reactor is highly competitive with the TAPIRO. The sole (but indisputable) advantage of the TAPIRO facility is its real existence.

УДК 621.039.51

Updating of Procedure of Calculation of the Reactor-Converter Multicell Thermionic Fuel Element output Characteristics \ M.A. Polous; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 11 titles.