

## КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА НЕЙТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

**Ю.А. Кураченко, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич**

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*



Критерии качества (КК) для нейтронных пучков, предназначенных для нейтрон-захватной терапии (НЗТ), систематизированы и пополнены. Проведено разделение КК на первичные и вторичные. Сопоставлены первичные и вторичные КК для эталонного пучка и пучков существующих и проектируемых реакторов ВВРц, «МАРС» и ТВР-50. Сделан вывод о необходимости верификации вторичных КК первичными КК. Показана, на основании выполненных расчетов, конкурентоспособность проектируемых пучков для НЗТ и целесообразность усиления обычной нейтрон-соударной терапии посредством НЗТ для существующих пучков.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемам нейтрон-захватной терапии (НЗТ) на реакторных пучках посвящены многолетние усилия исследователей и практиков многих стран. В частности, выработаны определенные требования к радиационным характеристикам поля излучения пучка, степень выполнения которых характеризует качество данного пучка по отношению к НЗТ. Конкретные значения радиационных характеристик для пучка следует рассматривать как критерии качества этого пучка, позволяющие сравнение и ранжирование различных пучков (в том числе и нереакторных).

Критерии качества естественным образом делятся на первичные и вторичные<sup>1</sup>.

Первичные, обычно называемые в литературе критериями «в фантоме»<sup>2</sup> или «в ткани»<sup>3</sup>, характеризуют воздействие излучений пучка на орган или ткань. Это дозиметрические величины в облучаемой опухоли и ткани. Вторичные КК, называемые в литературе критериями «в воздухе»<sup>4</sup> или критериями «свободного пучка»<sup>5</sup>, относятся собственно к излучению пучка, предназначенного для НЗТ. Вторичные критерии определяются по физическим характеристикам поля излучения на выходе пучка. Эти характеристики локализуются в районе операционного поля, но в отсутствии облучаемого объекта.

В настоящей работе сделана попытка систематизировать КК и ответить на следующие вопросы:

- в какой степени первичные и вторичные КК являются непротиворечивыми?
- насколько категоричны требования к характеристикам пучка, соответствующие вторичным КК?

<sup>1</sup> Advantage Depth Dose Rate

<sup>2</sup> Therapeutic Ratio

<sup>3</sup> При «однолучевой» экспозиции, т. е. с одного направления

<sup>4</sup> Boron Fraction

<sup>5</sup> Background Dose

Ответы на эти два связанных вопроса позволят правильно ориентировать усилия расчетчиков, занятых проблемой формирования характеристик реакторного пучка для НЗТ. Дело в том, что зачастую качество пучков для НЗТ оценивается сопоставлением только вторичных критериев, без привлечения «тонких материй», связанных с первичными КК. При этом, видимо, неявно предполагается, что оценка вторичных КК – дело радиологов, а не расчетчиков. В данной работе с помощью КК сопоставлены характеристики применяемых для НЗТ пучков с характеристиками нескольких пучков для трех отечественных реакторов, один из которых является действующим, а два других проектируются.

### ПЕРВИЧНЫЕ КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ПУЧКА ДЛЯ НЗТ

Из простейших представлений о механизме НЗТ следует общее требование максимизировать дозу в опухоли и при этом минимизировать дозу в окружающей здоровой ткани непосредственно вблизи опухоли. Но этого требования совершенно недостаточно для формирования критерия по крайней мере по следующим основаниям.

1. Это «минимаксное» требование не учитывает **пространственный** фактор: глубину локализации опухоли. Например, при достаточно большой глубине локализации (4–6 см) можно обеспечить хорошее локальное отношение доз «опухоль-ткань», но при этом подведение терапевтической дозы к опухоли может сопровождаться большими дозовыми нагрузками на здоровую ткань на всем пути транспорта излучения.

2. В той же степени не учитывается **временной** фактор: приемлемое время необходимой экспозиции. В качестве примера можно предположить, что коллимационной системой удалось создать идеальное отношение доз «опухоль-ткань», но при этом мощность дозы столь мала, что времена экспозиции даже при фракционировании совершенно неприемлемы.

3. Наконец не учитывается **качественный** фактор: одна и та же поглощенная доза излучений различного типа сформирует различные последствия и для опухоли, и для ткани.

Еще один «естественный» для НЗТ кандидат в критерии – доля «борной» составляющей в дозе в опухоли также недостаточен: он также не учитывает и временной, и пространственный факторы.

Изложенное выше позволяет уяснить, почему мировое сообщество выработало несколько связанных взаимодополняющих критериев, ранжировать которые по степени важности не представляется возможным. Основными из них традиционно считаются критерии, предложенные сотрудниками Массачусетского технологического института (МТИ) около 30 лет назад [3]. На пучке FCB<sup>6</sup> реактора МТИ, сформированном конвертером тепловых нейтронов и коллимационной системой для НЗТ, были выполнены дозиметрические измерения. Эти измерения позволили получить характеристики пучка, признанные мировым сообществом как эталонные для НЗТ. Далее результаты этих измерений будут использоваться при сопоставлении характеристик пучков.

Итак, сотрудниками МТИ было предложено три основных критерия качества пучка.

1. Предельная глубина «выигрыша»  $AD^7$  – глубина  $x$  в ткани, на которой доза в опухоли становится равной максимальной дозе в ткани:  $D_{tumor}(x) = D_{tissue}^{max}$ . Здесь дозы в опухоли и ткани при НЗТ определяются следующим образом:

<sup>6</sup> Fission Converter Beam

<sup>7</sup> Advantage Depth

$$\begin{aligned} D_{tumor} &= CBB_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor} + OBE_N \cdot D_N + OBE_O \cdot D_O + OBE_{fast} \cdot D_{fast} + OBE_{\gamma} \cdot D_{\gamma} \\ D_{tissue} &= CBE_{B,tissue} \cdot D_{B,tissue} + OBE_N \cdot D_N + OBE_O \cdot D_O + OBE_{fast} \cdot D_{fast} + OBE_{\gamma} \cdot D_{\gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $OBE$  – относительная биологическая эффективность излучений,  $CBE$  – составная (сочетанная) биологическая эффективность<sup>8</sup> реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ , а  $D$  – поглощенная доза. Выражения (1) описывают основные компоненты дозы, формируемой выходящим пучком:

- $D_{B,tumor}$ ,  $D_{B,tissue}$  – поглощенная доза в результате реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  в опухоли и ткани соответственно;
- $D_N$  – поглощенная доза в результате взаимодействия нейтронов с ядрами азота (главным образом в результате реакции  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ );
- $D_O$  – поглощенная доза, обусловленная реакциями на изотопах кислорода (главным образом реакциями с выходом заряженных частиц);
- $D_{fast}$  – поглощенная доза, обусловленная замедлением нейтронов на ядрах водорода;
- $D_{\gamma}$  – поглощенная доза, формируемая гамма-квантами пучка, а также вторичными гамма-квантами, сопровождающими перенос нейтронов в ткани.

Эта величина характеризует проникающее качество нейтронов пучка. В частности, для эталонного пучка MIT величина  $AD = 9.7$  см.

2. «Выигрыш»  $AR^9$  – интеграл (обычно одномерный) по глубине мозга или другого органа

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

Этот критерий характеризует пучок относительно «повреждающей» дозы на здоровую ткань: чем больше величина  $AR$ , тем (при прочих равных) получит меньшую дозу здоровая ткань. Интегрирование выполняется по наиболее важному направлению, совпадающему с осью пучка. Для FCB MIT величина  $AR = 5.0$ .

3. Мощность дозы в опухоли на предельной глубине «выигрыша»  $ADDR^{10} = D_{tumor}(AD)$ . Это «клинический» критерий, определяющий время необходимой экспозиции. Чем больше  $ADDR$ , тем меньше это время. Для FCB MIT эта величина, благодаря конвертеру тепловых нейтронов, достаточно велика:  $D_{tumor}(AD) = 126 \div 172$  сГр-экв./мин, в зависимости от мощности реактора и содержания вводимого бора.

Но на практике дело не ограничилось этими критериями. Важными и используемыми являются следующие критерии.

4. Терапевтическое отношение  $TR^{11}$  – отношение «полезной» дозы в опухоли на глубине  $x$  к максимальной «вредной» дозе в ткани на оси пучка:

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

Это очевидная характеристика того, в какой степени пучок является эпитепловым. Терапевтическое отношение, в частности, позволяет определить максимальную величину терапевтической дозы, которая может быть подведена к опухоли на глубине  $x$ . Если принять, что максимальное значение дозы для здоровой ткани

$D_{tissue}^{toler}$  (обычно принимается  $\sim 12.6$  Гр-экв), то предельное значение терапевтичес-

<sup>8</sup> Compound Biological Effectiveness (CBE, [2], p. 34).

<sup>9</sup> Advantage Ratio

<sup>10</sup> Advantage Depth Dose Rate

<sup>11</sup> Therapeutic Ratio

кой дозы  $D_{tumor}^{max}(x) = D_{tissue}^{toler} \times TR(x)^{12}$ . Применение НЗТ для глубокозалегающих опухолей эффективно при  $TR > 1$ .

5. При расчетах характеристик нейтронных пучков нами был сформулирован и широко использовался близкий к  $TR$  по смыслу критерий, выделяющий эффект  $^{10}B$ : доля «борной» составляющей  $BF^{13}$  в полной мощности дозы в опухоли:

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

Чем ближе величина  $BF$  к единице, тем меньше влияние «не нейтрон-захватных» компонент дозы (прежде всего, протонной и гамма-компонент) и тем меньше облучение здоровой ткани.

6. Роль же «не нейтрон-захватных» компонент дозы может оттенить дополняющий  $BF$  критерий, встречающийся в литературе: мощность фоновой дозы в здоровой ткани на один нейтрон. Поскольку этот критерий не поименован, для краткости далее будем его называть «фоновой дозой»  $BD^{14}$ :

$$BD(x) = \frac{OB_{N}(x) \cdot D_N + OB_{O}(x) \cdot D_O(x) + OB_{fast}(x) \cdot D_{fast}(x) + OB_{\gamma}(x) \cdot D_{\gamma}(x)}{\Phi_{tot}(x)}, \quad (5)$$

где  $\Phi_{tot}(x)$  – плотность полного потока нейтронов. Чем меньше величина  $BD$ , тем меньше повреждается окружающая опухоль тканью. Для FCB MIT величина  $BD = 2.8 \cdot 10^{-12}$  сГр-экв. см<sup>2</sup>/нейтрон (к сожалению, глубина  $x$  не указана).

## ВТОРИЧНЫЕ КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ПУЧКА ДЛЯ НЗТ

Целесообразность введения вторичных КК очевидна: они позволяют сравнивать качество выводимых пучков, не привлекая такие достаточно сложные материи, как значения  $CB$  и  $OB$  для данных условий облучения и т.п. При этом расчет транспорта излучений в фантоме не является необходимым, что во многих случаях существенно облегчает проведение серийных расчетов. Вторичные КК могут непосредственно фигурировать в качестве ограничений в задачах оптимизации характеристик выходящего пучка. Вторичные критерии получены явно или нет из первичных: предполагается, что пучок, имеющий лучшие характеристики по вторичным КК относительно НЗТ, будет иметь и лучшие характеристики по первичным дозиметрическим характеристикам. Разделение критериев на первичные и вторичные является мощным методологическим средством.

Однако в отличие от первичных, однозначно определяемых и легко сопоставимых, вторичные КК достаточно вариабельны и по номенклатуре, и по величинам составляющих функционалов. Эти функционалы могут различаться в два раза и более. Суммируя, можно принять за достаточно общепринятые значения основных вторичных критериев на выходе пучка следующие величины:

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

Следует отметить, что это именно **желательные** значения критериев: ни один существующий пучок в полной мере не удовлетворяет этим требованиям (кроме,

<sup>12</sup> При «однорулевой» экспозиции, т. е. с одного направления

<sup>13</sup> Boron Fraction

<sup>14</sup> Background Dose

естественно, эталонного пучка MIT, измерения на котором «в воздухе» послужили основой для последующего формирования значений вторичных критериев). Данные, содержащие сведения о проектируемых пучках, или не удовлетворяют полностью вторичным критериям, или удовлетворяют этим критериям в «абстрактной» ситуации: например, для коллимационной системы, «висящей в воздухе», без учета реального окружения блока вывода пучка, требований биологической защиты и т.п.

### СОПОСТАВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПУЧКОВ ПО ВТОРИЧНЫМ КК

В табл. 1 приведены характеристики существующих пучков (первые 4 столбца и последний столбец) и проектируемых. Среди представленных проектируемых пучков к пучкам для НЗТ относятся только пучки медицинского реактора «МАРС» [4] и ниши экспериментальных устройств (НЭУ) [5] реактора ВВРц. Что же касается пучков тяжеловодного реактора ТВР-50 [6] и пучка горизонтального канала-1 (ГК-1) реактора ВВРц [7], то эти пучки ориентированы на применение в нейтрон-соударной терапии (НСТ). Поэтому далее они будут рассмотрены с точки зрения возможности «усиления» («бустирования»<sup>15</sup>) НСТ посредством НЗТ.

Таблица 1

#### Характеристики некоторых существующих и проектируемых реакторов и пучков

| Реактор  | FCB MIT<br>США                    | Espoo<br>Финл.  | HFR <sup>1</sup><br>Нидерл. | TAP <sup>2</sup><br>Итал.          | «МАРС»                                     | ТВР-50<br>[6]     | НЭУ ВВРц<br>[5]  | ГК-1 ВВРц<br>[7]  |
|--|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------------|--|-------------------|--|-------------------|
| Мощность, МВт  | 5                                 | 0.25            | 45                          | 0.005                              | 0.010                                      | 50                | 10   | 10                |
| Материалы<br>коллимационной<br>системы                             | D <sub>2</sub> O<br>Al<br>S<br>Cd | Fl <sup>3</sup> | Al<br>S<br>Ti<br>Cd<br>Ar   | AlF <sub>3</sub><br>Pb<br>Ni и др. | Fl<br>MgF <sub>2</sub><br>LiF<br>PbF<br>Pb | Fl<br>Pb<br>и др. | Fl<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br><sup>6</sup> Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub><br>Pb<br>Bi<br>бораль | Fl<br>Pb<br>и др. |
| $\Phi_{epi}$ , 10 <sup>9</sup> см <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>    | 4.2                               | 1.1             | 0.33                        | 0.8                                | 0.9+1.5                                    | 2.9               | 2.4  | 5.0               |
| $D_x/\Phi_{epi}$ ,<br>сГр см <sup>2</sup> , 10 <sup>-11</sup>      | 1.3                               | 0.5             | 10                          | 4.1                                | 1.5+5.4                                    |                   | 0.46   |                   |
| $D_{fast}/\Phi_{epi}$ ,<br>сГр см <sup>2</sup> , 10 <sup>-11</sup> | 4.3                               | 2.0             | 8.6                         | 3.9                                | 12+33                                      |                   | 5.7  |                   |
| $J_{epi}/\Phi_{epi}$   | 0.84                              |                 |                             | 0.69                               | 0.75+0.77                                  | 0.96              | 0.70   | 0.97              |
| Обогащение<br>топлива по <sup>235</sup> U, %                       | ктн <sup>4</sup>                  | 20              | LEU <sup>5</sup>            | 93.5                               | 17   | –                 | 36   |                   |

<sup>1</sup>высокопоточный реактор (Петтен, Нидерланды);

<sup>2</sup>реактор на быстрых нейтронах TAPIRO;

<sup>3</sup>Fluental (состав 56% F, 43% Al, 1% LiF);

<sup>4</sup>конвертер тепловых нейтронов;

<sup>5</sup>Low Enriched Uranium, < 20 %

Из данных табл. 1 видно, что характеристики пучков реактора «МАРС» и НЭУ ВВРц, ориентированные на НЗТ, удовлетворяют вторичным КК. Они вполне конкурентоспособны, особенно по представительной совокупности характеристик установки в целом, по отношению к пучкам существующих реакторов. Для реактора «МАРС» в расчетах было получено несколько вариантов коллимационных систем, поэтому в таблице приведены диапазоны КК, соответствующих различным вариантам. Из этих характеристик пучка реактора «МАРС» несколько выделяется отно-

<sup>15</sup> booster – усилитель

шение  $D_{fast}/\Phi_{epi}$  превосходящее по величине соответствующие отношения для всех остальных пучков. Это должно насторожить расчетчика, если он в выборе композиции и конфигурации блока вывода пучка ориентируется исключительно на вторичные критерии.

В оптимизационных расчетах для пучка реактора «МАРС» предпринимались попытки уменьшить отношение  $D_{fast}/\Phi_{epi}$ , сохраняя при этом «хорошие» значения остальных вторичных КК. Но специфика реактора «МАРС» не позволила существенно уменьшить относительную долю быстрых нейтронов, приблизив ее к эталонному значению. К особенностям реактора «МАРС», отличающим его от всех представленных в табл. 1 реакторов и ограничивающим возможности уменьшения отношения  $D_{fast}/\Phi_{epi}$ , относятся малые габариты активной зоны (АЗ) и канала вывода. Попытка увеличить габариты фильтра (см. [4]) приводит к довольно резкому уменьшению плотности эпитеплового потока из-за геометрической расходимости пучка. При этом ухудшается и отношение «ток к потоку»  $J_{epi}/\Phi_{epi}$  из-за приближения рассеивающего фильтра к выходу пучка. Сказанное не противоречит тому, что реактор ТАПИРО, имеющий даже меньшие габариты АЗ, имеет, тем не менее, и меньшее значение отношения  $D_{fast}/\Phi_{epi}$ . Данное обстоятельство объясняется, во-первых, тем, что максимальный поток в центре АЗ реактора «МАРС» почти в 4 раза меньше, чем эта величина для ТАПИРО ( $1.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  и  $4.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) и, во-вторых, выходящие из АЗ реактора ТАПИРО нейтроны имеют распределение практически по спектру деления. Из малой АЗ реактора ТАПИРО, состоящей из почти чистого  $^{235}\text{U}$ , не выходят промежуточные и, тем более, тепловые нейтроны. Для реактора «МАРС» доля нейтронов с энергией  $< 10 \text{ кэВ}$ , покидающих поверхность АЗ  $\sim 25\%$ . Все это обеспечивает большую проникающую способность нейтронов из АЗ реактора ТАПИРО. Эти нейтроны, покинувшие с большой энергией поверхность АЗ, эффективно замедляются до эпитепловых в коллимационной системе, габариты которой на много ( $\sim$  в 2.5 раза) превышают габариты коллимационной системы для реактора «МАРС». В коллимационной системе реактора «МАРС» нейтроны «не успевают» полностью перейти в эпитепловую область энергии.

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ПУЧКОВ ПО ПЕРВИЧНЫМ КК

В табл. 2 представлены значения первичных КК для нейтронных пучков, ориентированных на НЗТ и рассмотренных выше. Представленные величины получены для одинаковых концентраций  $^{10}\text{B}$  в опухоли и ткани, принятых обычно при сопоставлении характеристик пучков (65 и 18 мкг/г соответственно).

Таблица 2

### Первичные КК некоторых существующих и проектируемых реакторов и пучков

| Реактор  | FCB MIT<br>США | Esproo<br>Финл. | HFR<br>Нидерл. | ТАПИРО<br>Итал. | «МАРС»  | НЭУ ВВРц |
|--|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------|----------|
| Глубина «выигрыша» $AD$ , см                                 | 9.3            | 9.0             | 9.7            | 9.7             | 7.9+8.8 | 8.9      |
| «Выигрыш» $AR$   | 6              | 5.8             | 5.4            |                 | 5.2+5.5 | 5.5      |
| Мощность дозы на глубине<br>«выигрыша» $ADDR$ , сГр-экв./мин | 172            | 45              | 19             | 25              | 33+35   | 76       |

Данные табл. 2 подтверждают выводы о конкурентоспособности проектируемых пучков на действующем и разрабатываемом отечественных реакторах ВВРц и «МАРС». Для пучка реактора «МАРС» недостаток во вторичных качествах по отношению к другим пучкам, указанный выше, не отразился на «потребительских» пер-



вичных КК. Большой, чем для остальных пучков относительный вклад дозы быстрых нейтронов вполне скомпенсировался гораздо меньшей относительной долей гамма-излучения (см. (1)). Меньшая доля гамма-излучения в пучке реактора «МАРС» объясняется несколькими обстоятельствами, главные из которых:

- относительно высокая средняя плотность материала АЗ сравнительно с плотностями АЗ тепловых реакторов таблицы: подавление гамма-излучения АЗ реактора «МАРС» преобладает над генерацией вторичного гамма-излучения нейтронами в АЗ;

- высокой плотностью материала отражателя (сталь) и особенно материала защиты (обедненный уран);

- старт-стопный режим работы реактора «МАРС», при котором наработка продуктов деления соответствует не рабочей мощности реактора 10 кВт, а средней (2 ч работы в сутки)/(24 ч–2 ч)×10 кВт ~ 1 кВт, что в 5 раз меньше, чем даже «рекордно» малая мощность реактора TAPIRO;

- относительно большая толщина собственно фильтра (~ 50 см) пучка реактора «МАРС», подавляющего как излучение АЗ, так и вторичные гамма-кванты из фильтра и коллиматора (ср. толщину фильтра пучка реактора TAPIRO, которая равна 31 см).

Следует отметить, что по столь важному первичному КК, как мощность дозы на глубине «выигрыша» *ADDR*, который определяет время экспозиции, пучок реактора «МАРС» значительно превосходит пучок реактора HFR и даже пучок реактора TAPIRO, что является прямым следствием большей относительной доли быстрых нейтронов «в воздухе».

Что касается первичных КК для НЭУ ВВРц, то они также вполне конкурентоспособны. По критерию *ADDR*, в частности, НЭУ ВВРц уступает только эталонному FCB MIT.

В табл. 3 представлены характеристики проектируемых для НЗТ пучков относительно такого первичного КК, как мощность фоновой дозы в здоровой ткани на один нейтрон *BD*. Эта величина представлена в литературе только для эталонного пучка FCB MIT. Из данных таблицы видно, что и по этому КК проектируемые пучки не уступают эталонному.

Таблица 3

**Отношение фоновой мощности дозы в ткани к плотности потока нейтронов (*BD*, Гр-экв. см<sup>2</sup>/нейтрон)**

|          | Глубина в ткани, см                        |                        |                        |                        |
|----------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
|          | 2  | 4                      | 6                      | 8                      |
| FCB MIT  | 2.8·10 <sup>-12</sup> , глубина не указана |                        |                        |                        |
| «МАРС»   | 1.54·10 <sup>-12</sup>                     | 1.51·10 <sup>-12</sup> | 1.89·10 <sup>-12</sup> | 2.48·10 <sup>-12</sup> |
| НЭУ ВВРц | 1.37·10 <sup>-12</sup>                     | 1.70·10 <sup>-12</sup> | 2.19·10 <sup>-12</sup> | 2.97·10 <sup>-12</sup> |

На рис. 1 представлено типичное распределение доз в опухоли и ткани, полученное для одного из вариантов вывода пучка НЭУ ВВРц. Это распределение наглядно иллюстрирует «избирательный» эффект НЗТ, состоящий в резком различии «полезной» дозы, подведенной к опухоли, и «вредной» дозы в здоровой ткани.

Весьма важный первичный КК: терапевтическое отношение *TR* для проектируемых пучков представлен на рис. 2 в сопоставлении с эталонным значением. Для этого критерия данные для пучка НЭУ ВВРц несколько ближе к эталону, чем для пучка реактора «МАРС». Это также является следствием большей «примеси» быст-

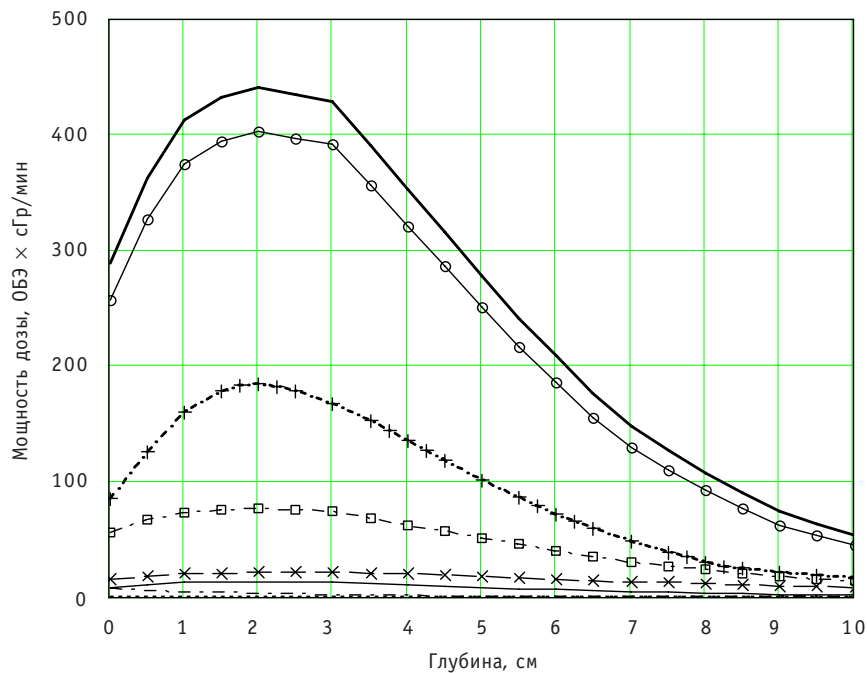


Рис. 1. Мощности доз в опухоли и ткани и их компоненты для НЭУ ВВРц. Для сопоставления представлено распределение дозы в опухоли для пучка реактора «МАРС»: —  $D_{tumor}$ ;  $\circ-\circ-\circ$  —  $СБЭ_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}$ ;  $\square-\square-\square$  —  $D_{tissue}$ ;  $-\cdot-\cdot-\cdot-$  —  $ОБЭ_{fast} \cdot D_{fast}$ ; — — — — —  $ОБЭ_N \cdot D_N$ ;  $\cdots$  —  $ОБЭ_0 \cdot D_0$ ;  $-x-x-x-$  —  $ОБЭ_\gamma \cdot D_\gamma$ ;  $+--+--+$  —  $D_{tumor}$  для пучка реактора «МАРС»

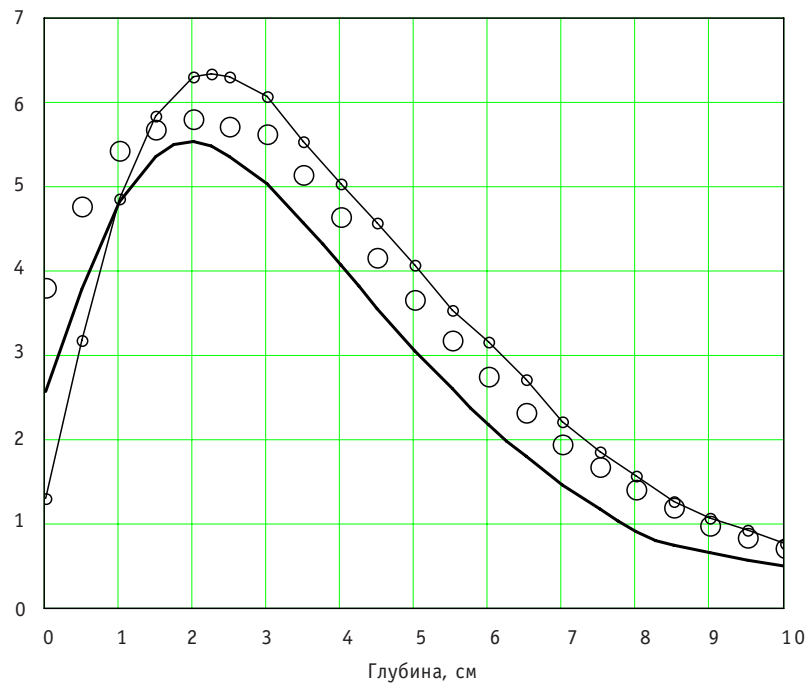


Рис. 2. Терапевтическое отношение в зависимости от глубины в ткани: — — — — — пучок реактора «МАРС»;  $\circ \circ \circ$  — пучок НЭУ реактора ВВРц;  $\circ-\circ-\circ$  — эталонный пучок реактора FCB MIT

рых нейтронов в «свободном» пучке (и, следовательно, «в фантоме») для реактора «МАРС», что непосредственно следует из (1).



### «УСИЛЕНИЕ» НСТ ПОСРЕДСТВОМ НЗТ

Пучок тяжеловодного реактора ТВР-50 не может быть полностью адаптирован к задачам НЗТ в силу особенностей спектра утечки из АЗ этого реактора (см. [6]). Подобным же образом пучок ГК-1 реактора ВВРц не может быть радикально «переделан» в пучок для НЗТ: конфигурация канала вывода пучка фиксирована, и какая-либо существенная модификация этой конфигурации, возможная только вблизи выхода канала пучка, приведет к резкому уменьшению (в  $10^3$  и более раз) интенсивности излучения пучка. В этих условиях можно говорить только об «усилении» нейтрон-соударной терапии посредством использования борсодержащих соединений (так называемая «бустовая» терапия).

В расчетах для пучка реактора ТВР-50 исследовано несколько вариантов канала вывода пучка (см. [6]):

- а) цилиндрический постоянного сечения;
- б) оптимизированный по конфигурации: составленный из конической и цилиндрической частей и снабженный коллиматором;
- с) оптимизированный в соответствии с б) и дополненный гамма-фильтром;
- д) оптимизированный в соответствии с с) и дополненный модификатором спектра.

Для всех вариантов канала вывода получен вклад «борной» составляющей дозы, усиливающий терапевтический эффект. Доля этой составляющей дозы на глубине в фантоме, где эта доза максимальна, в известной степени характеризует эффект усиления. Она изменяется вполне закономерно от ~ 38% (а)), затем ~ 47% (б)), далее ~ 61% (с)) и, наконец, ~ 79% (д)). Естественно, в этой последовательности монотонно (и существенно) уменьшается и «полезная» терапевтическая доза и, соответственно, растет время необходимой экспозиции. Но эффект «борной» добавки не зависит от мощности терапевтической дозы (соответственно от времени экспозиции). Он определяется различием в концентрации  $^{10}\text{B}$  в опухоли и в ткани. Если для пучков, ориентированных полностью на НЗТ, этот эффект может достигать в максимуме ~ 6 (рис. 1), то в условиях «усиления» этот эффект пропорционален доле борной составляющей.

Для канала ГК-1 реактора ВВРц были выполнены оптимизационные расчеты, определившие целесообразность установки на выходе пучка, в так называемой экспериментальной камере, блока с модификатором спектра и гамма-фильтром. Для различной конфигурации и материального состава блока получены характеристики «борного» усиления. На рис. 3 в качестве иллюстрации представлено распределение доз в фантоме для блока вывода конической конфигурации с гамма-фильтром (Pb, толщина 7 см) и модификатором спектра (Al, толщина 27.5 см). Сопоставив значения доз в опухоли  $D_{\text{tumor}}(x)$  на рис. 3 и 1, можно оценить, к каким потерям в интенсивности приводит модификация канала пучка на выходе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное комплексное расчетное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- первичные и вторичные критерии качества пучка для НЗТ в целом являются непротиворечивыми для «традиционных» реакторных установок и вполне согласуются: лучшие характеристики относительно вторичных КК, т. е. для пучка «в воздухе» обычно обеспечивают и лучшие характеристики первичных КК, т. е. для пучка «в фантоме»;
- однако для «нестандартных» реакторных установок (например, для стартового медицинского реактора малой мощности «МАРС») это соответствие не

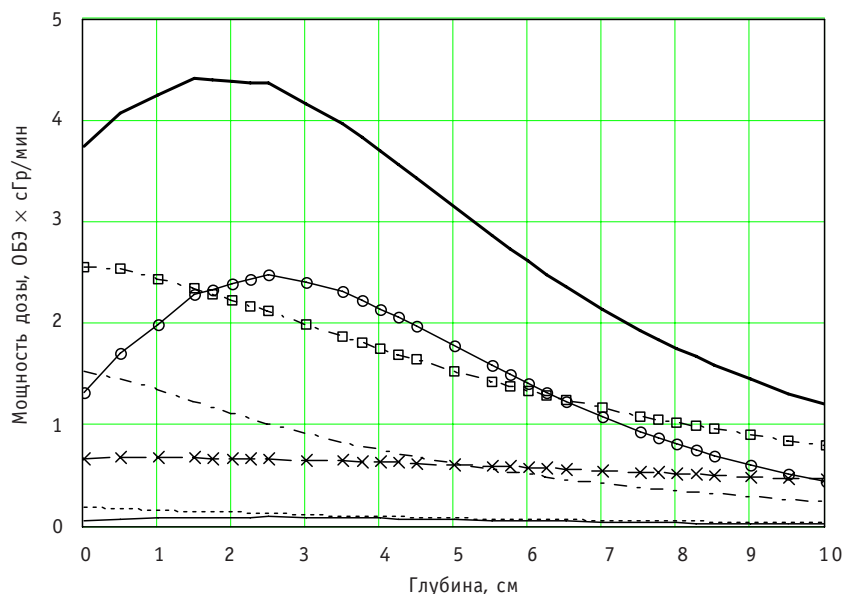


Рис. 3. Мощности доз в опухоли и ткани и их компоненты для пучка ГК-1 ВВРц: —  $D_{\text{tumor}}$ ; —  $CB_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}$ ; —  $D_{\text{tissue}}$ ; —  $CB_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}$ ; —  $CB_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}$ ; —  $CB_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}$ ; —  $CB_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}$ ; —  $CB_{B,tumor} \cdot D_{B,tumor}$ .

столь однозначно: в «игру» могут вмешаться характеристики (функционалы), не учитываемые в принятой номенклатуре критериев;

- для пучков, ориентированных на применение нейтрон-соударной терапии, может быть сделан общий вывод о безусловной целесообразности усиления терапевтического воздействия посредством бор-нейтрон-захватной терапии;

- «расплывчатость», неполнота и известная неоднозначность вторичных КК вполне объяснима: если первичные КК характеризуют результат, т.е. дозиметрические величины в опухоли и в ткани, то вторичные КК отражают, причем достаточно грубо, «предварительное» состояние пучка;

- в частности, следует отметить, что согласно вторичным КК необходимо сформировать эпителиевой поток плотностью  $\Phi_{epi} \geq 1 \cdot 10^9 \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  в диапазоне  $0.4 \text{ эВ} < E < 10 \text{ кэВ}$ ; в свете выполненных расчетных исследований такое требование кажется достаточно абстрактным, поскольку различный спектр эпителиевых нейтронов в интервале энергии, охватывающем три порядка, определит достаточно различающиеся величины первичных КК, т.е. различные поля в фантоме;

- из сказанного следует очевидный вывод: при расчетном конструировании блока вывода пучка, на стадии серийных и оптимизационных расчетов вполне разумно ориентироваться на вторичные КК, но полученные варианты конфигурации и материального состава блока вывода пучка необходимо тестировать расчетами «в фантоме» для определения значений первичных КК.

В заключение отметим, что все расчеты, результаты которых использованы в данной работе, выполнены с помощью программных комплексов REMP1 [8], KAC-КАД [9] и MCNP [10].

### Литература

1. Rolf F. Barth, Jeffrey A. Coderre, M. Graza H. Vicente, and Thomas E Blue. Boron Neutron Capture Therapy of Cancer: Current Status and Future Prospects // Clin. Cancer Res. – 2005. – № 11(11). – June 1. – P. 3897-4002.

2. Current status of neutron capture therapy / Report of International Atomic Energy Agency No. 1223. Vienna, 2001, 289 p.
3. *Zamenhof R.G., Murray B.W., Brownell G.L., Wellum G.R., and Tolpin E.I.* Boron Neutron Capture Therapy for the Treatment of Cerebral Gliomas. 1: Theoretical Evaluation of the efficacy of Various neutron Beams, *Med. Phys.*, 2: 47-60, (1975).
4. 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.
5. Клепов 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.
6. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Левченко В.А. Матусевич Е.С. Перспективы тяжеловодного реактора для нейтронной терапии злокачественных новообразований // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – №1. – С. 116 – 125.
7. Проект медицинского комплекса на реакторе ВВРц / В кн.: А.Ф. Цыб, С.Е. Ульяненко, Ю.С. Мардынский. Нейтроны в лечении злокачественных новообразований. – Обнинск: БИСТ, 2003. – С. 75 – 87.
8. Кураченко Ю.А. REMP1 – система программ для оперативного расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов и гамма-излучения в одномерных защитных композициях / В кн.: Численное решение уравнения переноса в одномерных задачах. Сборник научн. трудов / Под ред. д.ф.-м.н. Т.А. Гермогеновой. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 1981.
9. *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.
10. *Judith F. Briesmeister* MCNP (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code) Users Manual, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13709-M, Version 4C UC 700 (April 10, 2000).

Поступила в редакцию 18.12.2007

*energetica» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 4 illustrations. – References – 15 titles.*

Analytical relationships were obtained for estimating how the distribution of temperature and heat flux vary along a steam-generating tube and how the steam generator power output reduces due to formation and accumulation of deposits.

#### **УДК 621.039.532.21**

*Analytical Scheme of Defects Evolution in the Crystal Lattice of Graphite at the Reactors Irradiation* \V.N. Nesterov, I.V. Shamanin, E.G. Emets, A.A. Tsyganov, S.G. Kotlyarevsky, A.O. Pavlyuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 9 pages, 1 table, 7 illustrations. – References – 3 titles.

The article is devoted to the analytical description of the damage and restoration process in the crystal structure of reactors graphite. The basic criterion of graphite serviceability is the degree of achievement critical fluence of damaging neutrons. The defects formation process analytical scheme describing the change of atoms number of crystal lattice, simple and complex defects was developed. On the basis of the scheme the system of the differential equations is made. The analysis of the solving of equations system and experimental data on the accumulating energy (Wigners energy) for industrial uranium – graphite reactors has allowed determining the dependence of a recombination constant for dot defects from temperature of an irradiation. Comparison of calculated and experimental dependences of the critical fluence from temperature of an irradiation, and also calculated and experimental asymptotes dependences of Wigners energy on time of an irradiation of graphite is carried out.

#### **УДК 621.039.52:615.849.1**

*Reactor Beam Removal Unit Optimization for Neutron Therapy* \Yu.A. Kurachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 illustration. – References – 10 titles.

The REMP1 routine shielding optimization code is described as well as new OPT1D & OPT2D codes are introduced. These newly developed program systems are based on integration of the universal nonlinear programming search technique and well-known transport ROZ-6 (1D) and KASKAD (2D) codes. New software is tested for efficiency on a series of optimization problems of increasing complexity arisen in beam removal unit calculation for the “MARS” neutron therapy reactor facility.

#### **УДК 621.039.52:615.849.1**

*Neutron Therapy Beams Performance Criteria* \Yu.A. Kurachenko, Yu.A. Kazansky, A.V. Eu.S. Matusevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 3 tables, 3 illustrations. – References – 10 titles.

The performance criteria (PCRs) for neutron beams designed for neutron capture therapy (NCT) are classified and replenished. The PCRs differentiation is made to distinct clearly the primary (“in phantom”) & secondary (“in air”) of them. Both kinds of PCRs are tested for existing and designed NPPs, namely, the VVRc, “MARS” and HWR-50 reactors. The PCRs comparison is made with the FCBeam MIT which is stated overall as a reference one for the NCT. A conclusion of the secondary criteria necessary verification by the primary ones is drawn. The designed NCT beams competitiveness, based on calculation performed, is proved. Furthermore, reasonability of the fast neutron therapy enhancement by the NCT is validated.