

## ПЕРСПЕКТИВЫ ТЯЖЕЛОВОДНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ

**Ю.А. Кураченко\***, **Ю.А. Казанский\***, **В.А. Левченко\*\***,  
**Е.С. Матусевич\***

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

*\*\* ООО «Моделирующие системы», г. Обнинск*



Рассмотрена возможность использования пучков нейтронов тяжеловодных реакторов для нейтронной терапии. Проведены варианты расчетные исследования, которые позволили найти оптимальную геометрию и фильтры для формирования пучка нейтронов с заданными свойствами. Показано, что при мощности реактора 50 МВт возможно получить пучок тепловых нейтронов, характеристики которого достаточны для проведения нейтронной терапии.

### ВВЕДЕНИЕ

Среди методов лучевой терапии злокачественных новообразований использование нейтронного излучения занимает особую нишу. Основные проблемы применения нейтронов для терапии злокачественных новообразований обсуждаются во многих работах, например, в [1–2], выводы которых суммированы во введении.

Применение излучений, создающих треки с большой плотностью ионизации, показано в случаях распространенных процессов злокачественного роста, прогностически неблагоприятных, радиорезистентных опухолей. Контингент больных с трудноизлечиваемыми новообразованиями, такими как опухоли головы и шеи, молочной железы, остеогенные саркомы и другие, составляет до 30% от всех пациентов, нуждающихся в лучевой терапии. Только по России число случаев, показанных для нейтронной терапии, варьирует в пределах 40000–50000 чел. в год. Мировой опыт использования нейтронного излучения насчитывает более 25000 клинических наблюдений. На сегодняшний день нейтронная терапия осуществляется более чем в 25 крупнейших мировых центрах; десятки стран вовлечены в работу по созданию необходимых условий для нейтронной и нейтрон-захватной терапии (НЗТ).

Для терапии злокачественных опухолей применяются как быстрые, так и тепловые и эпитепловые нейтроны. К числу преимуществ реакторных нейтронов для лучевой терапии по сравнению с другими источниками нейтронов можно отнести: энергетическую и пространственно-временную стабильность; большие геометрические сечения пучков и равномерность плотности потока по сечению пучка; малую угловую расходимость; большое значение относительной биологической эффективности.

---

© Ю.А. Кураченко, Ю.А. Казанский, В.А. Левченко, Е.С. Матусевич, 2005

## ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫВЕДЕННЫМ ПУЧКАМ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ

Эти требования выработаны международным сообществом и сформулированы в [3].

Главными физическими параметрами следует считать: *качество излучения, пространственно-временную и энергетическую стабильность, глубину проникновения в ткань, геометрическое сечение, отношение плотности тока нейтронов к плотности потока, мощность дозы.*

Более детально параметры пучков определяются планируемыми объектами воздействия: тип, локализация, стадия опухолевого процесса с учетом основной цели лучевой терапии – максимального поражения опухолевых клеток при минимальном повреждении здоровых тканей. Кроме того, длительность процедуры облучения пациента должна составлять не более 1 ч при максимальной дозе в опухоли за один сеанс до 8–10 Гр.

Для проведения лучевой терапии радиационное поле должно быть изменяемой конфигурации с сечением пучка около  $10^2$  см<sup>2</sup>. Желательные значения плотности потока нейтронов в выходном сечении пучка:  $(3-5) \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>с для лучевой терапии быстрыми нейтронами и порядка  $10^9$  н/см<sup>2</sup>с для НЗТ.

Проиллюстрируем обоснование требований к параметрам выведенного пучка нейтронов на примере НЗТ, привлекающей наибольшее внимание исследователей.

### Нейтрон-захватная терапия. Параметры нейтронных пучков для НЗТ

Нейтрон-захватная терапия была предложена для облучения опухоли ионизирующим излучением с большими линейными потерями энергии (ЛПЭ).

В этом новом методе лучевой терапии используется поглощение нейтронов в радиофармпрепарате, содержащем элемент с большим сечением захвата нейтронов и последующим испусканием ионизирующего излучения с малым пробегом и большими ЛПЭ, что позволяет уничтожать опухолевые клетки, в меньшей степени, чем обычно, затрагивая нормальные ткани.

В первую очередь, в этом методе используется радионуклид  $^{10}\text{B}$ . Пучок достигает опухоли, в которую предварительно введен фармпрепарат, содержащий бор. Сечение реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  для тепловых нейтронов велико –  $3,8 \cdot 10^3$  барн. Энергия реакции, большую часть которой получает альфа-частица, равна 2,8 МэВ. Альфа-частицы обладают высокой ионизирующей способностью и коротким пробегом. Длина свободного пробега альфа-частиц порядка диаметра клетки (10 мкм). Для полного разрушения клетки достаточно попадания в нее нескольких альфа-частиц. В последнее время получены новые боросодержащие соединения, обладающие повышенным сродством к опухолевой ткани, разработаны способы получения пучков надтепловых нейтронов, обеспечивающие возможность лечения глубокозалегающих опухолей.

Для лечения опухолей мозга может оказаться перспективным использование радионуклида  $^{157}\text{Gd}$ , для которого сечение захвата тепловых нейтронов аномально велико –  $2,4 \cdot 10^5$  барн. В результате радиационного захвата испускаются гамма-кванты, часть из которых обладает относительно небольшой энергией и электроны внутренней конверсии, создающие высокую локальную поглощенную дозу.

Если опухоль находится в глубине тела, то для создания максимальной дозы в опухоли наиболее подходят эпитепловые нейтроны, для поверхностно расположенных опухолей – тепловые.

При облучении тепловыми нейтронами максимум плотности потока реализуется на поверхности. Эпитепловые нейтроны создают максимум плотности потока тепловых нейтронов на глубине 2–3 см, а затем плотность потока падает приблизительно

по экспоненте. Глубина проникновения эпитепловых нейтронов в фантом зависит от их энергии – чем больше энергия, тем на большей глубине располагается максимум плотности потока тепловых нейтронов. Пучки нейтронов из каналов реакторов со средними энергиями около 1 МэВ обладают достаточной глубиной проникновения в тканеэквивалентную среду (50% изодоза на глубине 5–6 см).

На практике не существует чисто тепловых, эпитепловых или быстрых пучков нейтронов. В любом выведенном из активной зоны реактора пучке присутствуют и быстрые нейтроны, и гамма-излучение.

### **Плотность потока эпитепловых нейтронов**

Для анализа проблем, возникающих при разработке установок для НЗТ, принято считать эпитепловыми нейтроны, энергия которых находится в интервале от 0,5 эВ до 10 кэВ. Существующий опыт показывает, что желательная величина плотности потока эпитепловых нейтронов –  $10^9$  н/см<sup>2</sup>с, возможно использование и меньших значений, вплоть до  $10^8$  н/см<sup>2</sup>с, но при этом время облучения пациента затягивается и достигает предельного значения. Если доступны более высокие значения плотности потока ( $>10^9$  н/см<sup>2</sup>с), то коротким временем облучения можно пожертвовать для того, чтобы улучшить качество пучка. На длительность облучения непосредственно влияет концентрация бора в опухоли. Если концентрацию бора удастся поднять относительно достигнутых в настоящее время уровней, то соответственно снизятся и требования к плотности потока нейтронов.

### **Качество пучка**

Качество пучка определяется четырьмя основными факторами: долей быстрых нейтронов; долей гамма-излучения; соотношением между потоками эпитепловых и тепловых нейтронов; соотношением между плотностью тока и плотностью потока на выходе пучка.

### **Отношение плотностей потоков быстрых и эпитепловых нейтронов**

В НЗТ быстрыми принято считать нейтроны с энергией больше 10 кэВ. Они всегда присутствуют в выведенном пучке, но их доля зависит от конструкции реактора, системы коллимации и фильтрации пучка. Быстрые нейтроны для НЗТ нежелательны, поскольку они создают вторичные частицы (в основном протоны) с высокими ЛПЭ, что приводит к большим радиационным нагрузкам на окружающую опухоль здоровую ткань. Поэтому одно из основных требований к пучку нейтронов для НЗТ – минимальная доля быстрых нейтронов в нем. Желательно, чтобы это отношение не превосходило  $2 \cdot 10^{-13}$  Гр/н/см<sup>2</sup>.

### **Вклад гамма-излучения в поглощенную дозу**

Из-за большого пробега гамма-излучения в ткани невозможно создать условия, при которых поглощенная доза гамма-излучения в опухоли была бы существенно больше, чем доза в окружающих опухоль здоровых тканях. Поэтому необходимо уменьшать плотность потока гамма-квантов в выведенном пучке. Желательно, чтобы доза гамма-излучения на выходе пучка была бы не больше  $2 \cdot 10^{-13}$  Гр на эпитепловой нейтрон.

### **Соотношение между плотностями потоков тепловых и эпитепловых нейтронов**

Для уменьшения повреждения кожных покровов плотность потока тепловых нейтронов должна быть минимальна. Желательно, чтобы на выходе пучка отношение

плотности потока тепловых к плотности потока эпитепловых нейтронов не превосходило 0,05.

### **Отношение полной (проинтегрированной по энергии) плотности тока нейтронов к плотности потока нейтронов**

Это отношение характеризует долю нейтронов, распространяющихся в направлении оси пучка. Чем оно больше, тем меньше нежелательное облучение здоровых тканей. Кроме того, при большой величине этого отношения увеличивается эффективная глубина проникновения нейтронов в ткань, что чрезвычайно существенно при облучении глубоко расположенных опухолей. Желательно, чтобы отношение плотности тока к плотности потока было не менее 0,7.

### **Форма пучка**

Большое сечение пучка позволяет с помощью дополнительной системы коллимации, индивидуальной для каждого пациента, сформировать нужную конфигурацию поля облучения.

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА НЕЙТРОНОВ ТЯЖЕЛОВОДНОГО РЕАКТОРА**

В СССР была сооружена серия промышленных тяжеловодных реакторов типа ОК-180 и ОК-190, служащих для производства радионуклидов различного назначения. По истечении ресурса они выведены из эксплуатации. В настоящее время на комбинате «Маяк» эксплуатируется тяжеловодный реактор Л-2, обеспечивающий основные потребности России в реакторных изотопах. Специалисты ОКБМ, ГНЦ РФ-ИТЭФ и ПО «Маяк» разработали концепцию тяжеловодного реактора следующего поколения многоцелевого назначения ТР-1000ПБ предельной безопасности. Ожидается, что может быть достигнута максимальная плотность потока тепловых нейтронов в активной зоне равная  $(4-8) \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>с [4].

Тяжеловодный реактор имеет особенный спектр нейтронов и в первом приближении кажется малоприспособленным для создания пучка нейтронов для нейтронной терапии.

Представляется целесообразным рассмотреть возможности, которые может представить для нейтронной терапии тяжеловодный реактор относительно небольшой мощности, характерной для исследовательских реакторов.

В настоящей статье изложены результаты исследования характеристик предназначенного для НЗТ нейтронного пучка, выводимого из тяжеловодного реактора мощностью 50 МВт.

В дальнейшем предполагается опубликовать детальное описание использованных в данной работе методов расчета, их верификацию, а также методов оптимизации пучка [5].

### **Реактор как источник нейтронов**

Для анализа возможности создания медицинского пучка на тяжеловодном реакторе был выбран гипотетический реактор на естественном уране с топливом в форме  $UO_2$ . Было принято, что твэлы и тепловыделяющие сборки (ТВС) полностью аналогичны по конструкции и составу (за исключением обогащения и длины ТВС) с ТВС и твэлам реактора РБМК. Такой выбор позволил провести детальные расчеты параметров активной зоны и выведенного пучка нейтронов.

Основные характеристики реактора представлены в табл.1, а расчетная модель – на рис. 1. Активная зона с размерами  $D_{\text{экв}} = H = 320$  см окружена отражателями из  $D_2O$ : боковым толщиной 40 см и торцевым – 30 см. В активной зоне расположены

Таблица 1

**Основные характеристики активной зоны реактора**

ТВС	
Шаг гексагональной решетки	25 см
Количество в АЗ	151
Внешний диаметр	8,2 см
Материал оболочки	Zr + Nb (2,5%)
Толщина оболочки	0,1 см
ТВЭЛ	
Количество в ТВС	18
Длина активной части	320 см
Внешний диаметр	1,363 см
Диаметр топливной таблетки	1,148 см
Толщина газового зазора	0,015 см
Толщина оболочки	0,0925 см
Материал топливной таблетки	UO <sub>2</sub>
Плотность топливной таблетки	10,1 г/см <sup>3</sup>
Материал оболочки	Zr + Nb (1%)

151 тепловыделяющая сборка (ТВС), каждая из которых содержит 18 тепловыделяющих элементов (ТВЭлов).

Параметры выведенного пучка нейтронов определяются системой коллимации нейтронов, оптимизации которой было уделено основное внимание в данной работе.

Расчет реактора выполнен по программе MCNP [6], [7]. В этом расчете в качестве промежуточных результатов получены энергоугловые характеристики поля излучения (как для нейтронов, так и для гамма-квантов) на цилиндрической поверхности в боковом отражателе, которые использовались в расчетах выведения пучка. Расчет реактора был выполнен также по программе КАСКАД [8]. В качестве константного обеспечения использовались системы БНАБ [9–12] и BUGLE-96 [13].

Дальнейший расчет переноса излучений в блоке вывода пучка выполнялся по программам MCNP и КАСКАД.

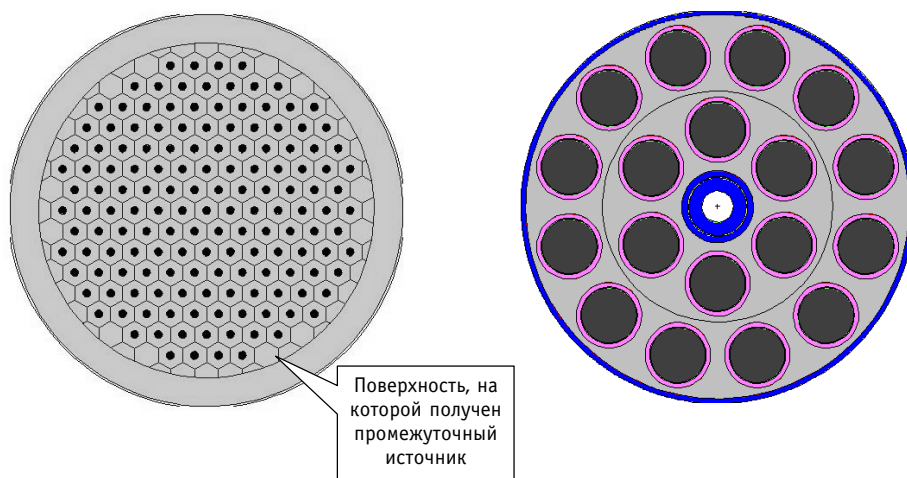


Рис. 1. Радиальные сечения АЗ с отражателем (слева) и ТВС (справа)

### Блок вывода пучка

Каналы вывода пучков для нейтронной терапии обычно оборудованы коллимационной системой и системой фильтров. В данном случае коллимационная система имеет более простую конфигурацию в виде коаксиальных цилиндров (обычно двух) различного диаметра. При такой конфигурации канала цилиндр большего диаметра обращен к АЗ. Подобная конфигурация канала вывода (коллимационная система) целесообразна по крайней мере в силу двух обстоятельств. Во-первых, она обеспечивает большую «поверхность сбора» нейтронов на входе канала и, во-вторых, уменьшает дозу излучений на выходе в окрестности пучка.

Помимо основной коллимационной системы, в практике обычно применяются еще и оконечные сменные коллиматоры, расположенные на выходе пучка. Эти коллиматоры предназначены для формирования конкретной формы операционного поля и снижения дозовой нагрузки на области вне этого поля.

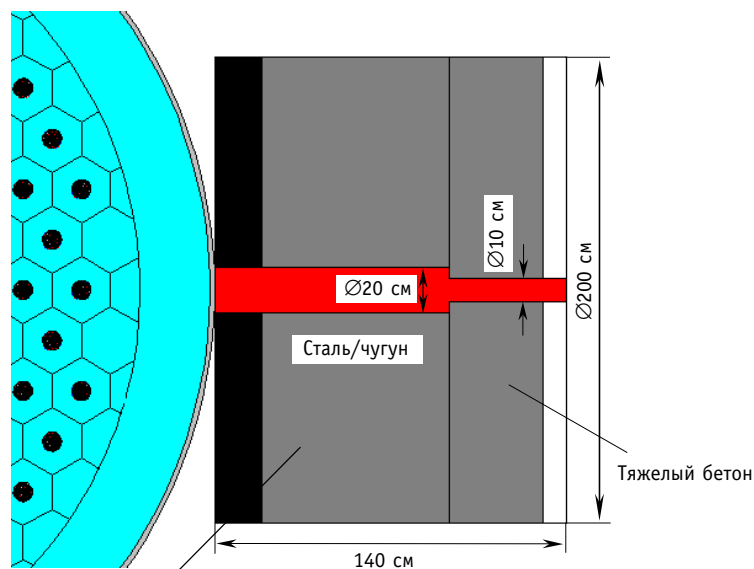
Выбранный конкретный тип реактора предопределяет особенности организации вывода пучка. Тяжеловодный реактор относительно малой мощности на естественном уране имеет довольно большие габариты АЗ, относительно малую плотность потока и чрезвычайно «мягкий» спектр нейтронов. Так, доля «подкадмиевых» ( $E < 0,4$  эВ) нейтронов в токе утечки на внешней поверхности отражателя достигает 99%. Очевидно, что использование фильтров для ужесточения спектра при таком исходном содержании тепловых нейтронов невозможно: выделение нетепловых нейтронов, исходная доля которых меньше 1% (их количество еще уменьшится фильтром), приведет к потере интенсивности в пучке более чем на два порядка.

Выполненные расчетные исследования различной конфигурации канала вывода пучка позволили обосновать априорные решения, принятые в соответствии с указанными выше особенностями реактора и с учетом необходимых условий облучения на выходе пучка. Так, для получения приемлемой плотности потока нейтронов на выходе при относительно небольших значениях на входе в канал следует максимально приблизить выход пучка к источнику. Поэтому, во-первых, блок вывода пучка размещен непосредственно вблизи корпуса реактора в монтажном пространстве. Во-вторых, этот блок состоит из материалов, обеспечивающих эффективную защиту от излучений, что необходимо для обеспечения приемлемого уровня дозовой нагрузки в окрестности вывода пучка.

При компактных размерах блока вывода пучка применение конического коллиматора нецелесообразно. Конический коллиматор должен быть достаточно протяженным, а его высота примерно равна диаметру основания (лучше быть больше этого диаметра). Только при такой форме можно обеспечить эффективный «сбор» нейтронов за счет их «канализации» посредством рассеяния коллиматором.

Сечение цилиндрического блока вывода пучка представлено на рис. 2. Этот блок диаметром 200 см является также и фрагментом защиты. Он состоит из слоя стали толщиной 20 см и слоя тяжелого бетона толщиной 120 см. Слой металла предназначен для эффективного подавления гамма-излучения АЗ, а также для сброса энергии той незначительной доли нетепловых нейтронов, остающихся в выходящем из АЗ пучке. Их последующее замедление и захват в бетоне переносит области генерации вторичных гамма-квантов в глубину защиты. Тяжелый бетон состоит из компонент обычного бетона с добавлением стальной/чугунной дробы (– 76% по массе), его плотность составляет  $5,0 \text{ г/см}^3$ . Для снижения выхода жесткого гамма-излучения при захвате тепловых нейтронов в тяжелый бетон добавлен карбид бора с концентрацией  $45 \text{ кг/м}^3$ .

Ступенчатый канал для вывода пучка расположен коаксиально в блоке вывода. Длина канала пучка  $\varnothing 20$  см равна 80 см, длина канала  $\varnothing 10$  – 40 см.



Поверхность, на которой получен промежуточный источник для КАСКАД

Рис. 2. Сечение защитного блока для вывода пучка

### Оптимизация характеристик на выходе пучка

Задача оптимизации характеристик пучка нейтронов на выходе может быть сформулирована следующим образом:

При сохранении требуемой плотности потока нейтронов в пучке  $\Phi \geq 1 \cdot 10^9 / \text{см}^2 \text{с}$  минимизировать

- мощность дозы гамма-излучения в пучке;
- «полутень», т. е. обеспечить максимальный радиальный градиент полей излучений на границе пучка;
- мощность дозы гамма-излучения и нейтронов в окрестности пучка.

Первая из сформулированных задач представляется наиболее сложной, поскольку подавление гамма-излучения в пучке с помощью любых фильтров приведет к уменьшению потока нейтронов. Материал, рассматриваемый в качестве фильтра, подавляющего гамма-излучение в пучке, должен обладать следующей совокупностью свойств: иметь минимальное сечение для тепловых нейтронов (как поглощения, так и рассеяния); иметь достаточно большую плотность для эффективного подавления гамма-излучения; генерировать минимум захватного гамма-излучения.

Наиболее реальными «кандидатами» на роль гамма-фильтров могут рассматриваться свинец, висмут и обедненный уран. Основные свойства указанных материалов по отношению к рассматриваемой задаче представлены в табл. 2. Следует напомнить, что наиболее жесткое гамма-излучение захвата у свинца: почти все гамма-

Таблица 2

### Свойства материалов для гамма-фильтров

	Сечение захвата тепловых нейтронов $\Sigma_c$ , $\text{см}^{-1}$	Сечение рассеяния тепловых нейтронов $\Sigma_s$ , $\text{см}^{-1}$	Суммарная энергия гамма-квантов $Q_\gamma$ , МэВ/захват	Плотность материала $\gamma$ , $\text{г/см}^3$
Pb	0,00561	0,363	5,5	11,3
Bi	0,000955	0,244	4,6	9,75
$^{238}\text{U}$	0,367	0,397	4,8	19,0

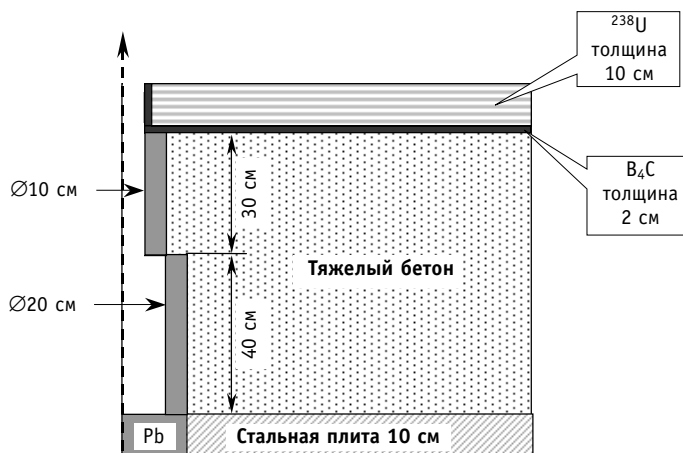


Рис. 3. Оптимальный вариант вывода пучка (аксиальное сечение)

кванты имеют энергию  $\sim 7$  МэВ; средняя энергия гамма-квантов захвата на  $^{238}\text{U}$   $\sim 1,1$  МэВ, гамма-кванты захвата на висмуте имеют энергию  $\sim 4$  МэВ. С использованием указанных материалов было исследовано большое количество конфигураций защиты в окрестности канала и получено несколько альтернативных вариантов, в той или иной степени оптимальных относительно сформулированной выше задачи, наиболее предпочтительный из них рассмотрен на рис. 3.

В качестве гамма-фильтра наиболее эффективными оказались свинец и висмут. Уран в данном случае используется в качестве эффективной основной защиты. Слой U защищен от нейтронов пучка слоем карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  для предотвращения генерации вторичного гамма-излучения в этом слое. Применение карбида бора обеспечило большой радиальный градиент потока нейтронов на выходе, а сочетание гамма-фильтра данной конфигурации с высокой плотностью материала внешнего слоя защиты ( $^{238}\text{U}$ ) позволило, наряду с достаточной величиной радиального градиента гамма-излучения, получить «изодозность» по сечению пучка. Применение столь эффективного материала как уран, дало возможность уменьшить толщину стальной плиты вдвое без компенсирующего увеличения аксиальных габаритов защитного блока.

Характеристики пучка на выходе оптимизированного по составу и геометрии канала даны в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

#### Характеристики оптимальной композиции для гамма-фильтра из свинца

	Плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-1}\text{с}^{-1}$	Доля тепловых нейтронов, %	Отношение «ток к потоку»	Мощность дозы гамма-излучения, мкЗв/ч	Отношение дозы гамма-излучения к потоку нейтронов, $\text{сЗв см}^2$
Ось пучка	$1,8 \cdot 10^9$	99,7	0,99	$9,2 \cdot 10^6$	$26 \cdot 10^{-11}$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизацией системы коллимации и ее состава возможно достичь приемлемых для нейтронной терапии параметров пучка практически чисто тепловых нейтронов из тяжеловодного реактора мощностью 50 МВт: плотности потока в пучке  $\Phi \geq 1 \cdot 10^9/\text{см}^2\text{с}$ , малым (по дозе) вкладом гамма-излучения в пучке, предельно высоким отношением



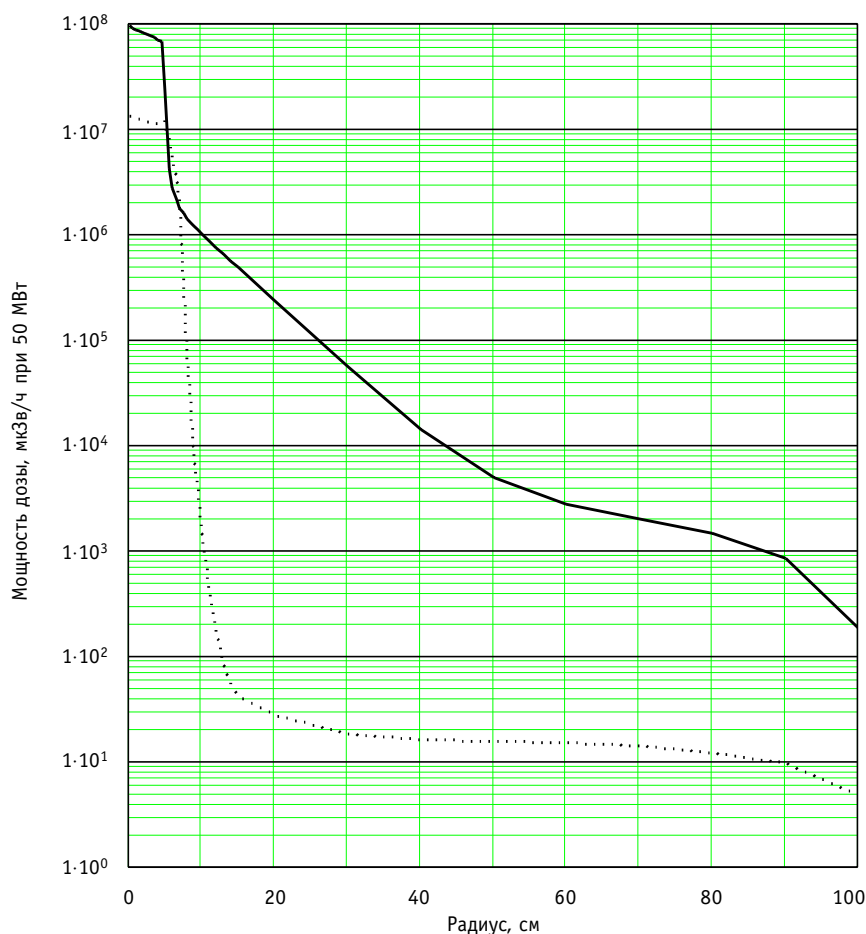


Рис. 4. Дозы на выходе пучка: ——— доза нейтронов; - - - суммарная доза гамма-излучения

тока к потоку на выходе пучка. Малая доля быстрых и эпитепловых нейтронов за отражателем активной зоны не позволяет сформировать приемлемые по плотности потока для нейтронной терапии пучки быстрых и эпитепловых нейтронов. Возможной перспективой использования выведенного нейтронного пучка тяжеловодного реактора для нейтронной терапии является применение конвертора тепловых нейтронов в быстрые из урана высокого обогащения.

### Литература

1. Ульяновко С.Е. Перспективы и особенности использования нейтронного излучения ядерных реакторов в биомедицинских исследованиях//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – № 4. – С. 86-92.
2. Цыб А.Ф., Ульяновко С.Е., Мардынский Ю.С. Нейтроны в лечении злокачественных заболеваний. – Обнинск: МРНЦ РАМН, 2003.
3. Current status of neutron capture therapy. IAEA, Vienna, 2001, IAEA -TECDOC -1223, ISSN 1011-4289.
4. Шведов О.В. и др. Тяжеловодные установки в России//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 1. – С. 29-39.
5. Кураченко Ю.А. и др. Математическое моделирование в медицине. – Обнинск: ИАТЭ, 2005 (в печати).

6. *Lux Ivan and Koblinger Laszlo* Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations, CRC Press, Boca Ration (1991).
7. *Briesmeister Judith F.* MCNP (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code) User's Manual, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13709-M, Version 4C UC 700 (April 10, 2000).
8. *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, 1991). – V. 5. – P. 30.3 4-1.
9. *Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н. и др.* Групповые константы для расчета реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1981.
10. *Voronkov A.V., Gayfulin S.A., Zhuravlev V.I. et. al.* GNDL – Program System of Group Constants to Provide Calculations of Neutron and Photon Fields//Proceedings of International Topical Meeting on Advances in Mathematics, Computations and Reactor Physics (Pittsburgh, USA, April 28 – May 2, 1991). – V. 5. – P. 30.5 2-1.
11. *Вырский М.Ю. и др.* Арамако-2F – версия системы константного обеспечения расчетов переноса высокоэнергетических нейтронов/Препринт ФЭИ. – Обнинск, 1979.
12. *Абагян А.А. и др.* Арамако-G – система обеспечения многогрупповыми константами расчетов полей гамма-излучения в реакторах и защите/Препринт ИПМ АН СССР. – М., 1978.
13. BUGLE-96: Coupled 47 Neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Application / ORNL, RSICC DATA LIBRARY COLLECTION DLC-185, July 1999.

Поступила в редакцию 14.02.2005

in waste store. According to the accepted concept of the First NPP decommissioning waste store will localize for a long time - term conservation under monitoring.

#### **УДК 621.039.564**

*To a Question of Metrological Ensuring of Determination of Burnup of the Irradiated Nuclear Fuel an Overload* \S.G. Oleynik O. V. Maslov, L.L. Kalnev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 5 pages. – References, 13 titles.

Questions of metrological ensuring of a procedure of the determination of burnup of the irradiated nuclear fuel in real time an overload are considered. Feature of a procedure consists in that, that for account of burnup is not required preliminary knowledge of initial enrichment and cooling time. Determined sources of inaccuracy, stages of information handling, which can bring about the appearance of additional inaccuracy. The carried out analysis has allowed to estimate inaccuracy value of determination of burnup and to offer ways of decrease of a inaccuracy.

#### **УДК 621.039.52**

*Closed and Insulated (on site) Fuel Cycle of Nonconventional Fast Reactor* \G.B. Usynin, A.A. Kravchenko, S.G. Usynina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 6 pages, 4 illustrations, 2 tables. – References, 7 titles.

The analysis of fuel cycle closed on site for pebbly bed fast reactor is carried out. The opportunities of deep burnout of slag-heap uranium are discussed. Two variants are considered: with the mixed U-Pu fuel composition and with separate accommodation of plutonium and uranium nitrides in different fuel elements. Conditions of achievement in the closed fuel cycle of zero balance of plutonium are shown.

#### **УДК 621.039.5**

*Experimental Investigations in the Substantiation of Application of Eutectic Li (17) Pb (83) in Blanket of Tokamak* \A.V. Beznosov, A.V. Semyonov, V.L. Constantinov, O.V. Baranova, S.A. Cuzminich; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 8 pages, 8 illustrations, 2 tables. – Reference, 2 titles.

The experimental data received at a substantiation of application of eutectic Li (17) Pb (83) in power contour of system of transformation by thermal energy blanket tokamak presented. Dependences of the electrophysical characteristic –  $\rho\delta$  electroinsulating coating from regime and other parameters are determined. Probes carried out on samples from an austenitic steel, over the range temperatures up to 500°C, the contents of an impurity of oxygen in coolant on a saturation line etc.

#### **УДК 621.039.52:615.849.1**

*Heavy Water Reactor Abilities in Neutron Therapy of Malignant Tumors* \Yu.A. Kurachenko, Yu.A. Kazansky, V.A. Levchenko, Eu.S. Matusevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 10 pages, 4 illustrations, 3 tables. – References, 13 titles.

Utilization possibility of the HWR neutron beams in neutron therapy was analyzed. Calculation series were performed in order to provide optimal beam channel arrangement and filter materials for desired beam output quality. It was stated that the HWR capacity of 50 MW is enough to ensure thermal neutron beam, suitable for neutron therapy.