

## ОПТИМИЗАЦИЯ БЛОКА ВЫВОДА РЕАКТОРНОГО ПУЧКА ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

**Ю.А. Кураченко**

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



Описаны существующий комплекс программ оптимизации защиты от излучений REMPI и вновь созданные оптимизационные комплексы OPT1D и OPT2D, позволяющие решать одномерные и двумерные оптимизационные задачи. Оптимизационные комплексы объединяют универсальный метод поиска экстремума функции при наличии произвольных ограничений и программы точного решения уравнений переноса Р03-6 (1D) и КАСКАД (2D). С помощью созданных оптимизационных комплексов решен ряд возрастающих по сложности задач для блока вывода нейтронного пучка медицинского реактора «МАРС».

### ВВЕДЕНИЕ

Расчет характеристик выводимых горизонтальных реакторных пучков требует в общем случае применения программы, позволяющей решать уравнение переноса в «реальной» трехмерной (3D) геометрии. Использование в данном случае программы, реализующей метод Монте-Карло (например, MCNP), малоэффективно. Как показывает многолетний опыт расчетов характеристик реакторных каналов, с помощью программы MCNP можно получить достаточно надежные результаты только непосредственно в канале и на его выходе. Результаты же в окрестности выхода пучка, в помещении вывода пучка, в фантоме и т.д. могут быть получены, в частности, по комбинированной методике [1, 2], включающей последовательно 3D расчет источника – в данном случае это активная зона (АЗ) и ее ближняя окрестность (используется программа MCNP) → 2D-транспорт в канале (КАСКАД [3], метод дискретных ординат) → 3D-расчет функционалов на выходе и в фантоме (MCNP). Альтернативой этой цепочке, как сказано выше, является применение 3D-программы, позволяющей выполнять расчет всей области от активной зоны до фантома и смежных с помещением вывода пучка служебных помещений. Такие программы существуют и активно развиваются. При их создании и адаптации к практическим задачам возникают достаточно серьезные (но, по-видимому, преодолимые со временем) проблемы [4].

Следовательно, рассчитывать на то, что в ближайшее время 3D-программа, реализующая метод дискретных ординат, сделается рутинным инструментом каждого расчетчика, не приходится.

Что же касается проблемы оптимизации характеристик пучка, предполагающей направленный «перебор» многочисленных вариантов конфигурации и материаль-

ного состава блока вывода пучка, то очевидно, что без существенного упрощения реальной трехмерной модели выполнить оптимизацию невозможно.

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ

В течение многих лет в оптимизационных задачах, возникающих при расчете защиты от излучений, применялся комплекс программ REMP1 [5], объединяющий алгоритм приближенного решения уравнения переноса [6] с оптимизационным алгоритмом метода «скользящего допуска» [7].

Этот комплекс программ претерпел значительную эволюцию со времени своего создания. На начальном этапе в алгоритмах программы была реализована методика «выведение +  $P_1$ »-приближение метода сферических гармоник (МСГ) применительно к прохождению как нейтронов, так и фотонов в трех одномерных композициях: плоской, цилиндрической и сферической. В дальнейшем программа была дополнена алгоритмами, позволяющими выполнять расчеты по комплексной методике, сочетающей МСГ с методом последовательных столкновений (МПС) в различных модификациях.

В алгоритмах методики «выведение +  $P_1$ » реализовано решение систем разностных аналогов для основной системы многогрупповых уравнений, которые запишем в общей геометрии:

$$\begin{aligned}\vec{\Omega}\nabla\varphi_{uns}^j(r,\vec{\Omega})+\Sigma_{rem}^j(r)\cdot\varphi_{uns}^j(r,\vec{\Omega})&=S^j(r,\vec{\Omega}), \\ \text{div}[\varphi_{scat1}^j(r)\cdot\vec{n}]+\Sigma_0^j(r)\cdot\varphi_{scat0}^j(r)&=Q_0^j(r), \\ \frac{1}{3}\text{grad}\varphi_{scat0}^j(r)\cdot\vec{n}+\Sigma_1^j(r)\cdot\varphi_{scat1}^j(r)&=Q_1^j(r).\end{aligned}\quad (1)$$

Эти уравнения дополняются граничными условиями общего вида:

$$\begin{aligned}A_0\cdot\varphi_{scat1}^j(R_0)+B_0\cdot\varphi_{scat0}^j(R_0)&=0, \\ A_R\cdot\varphi_{scat1}^j(R)+B_R\cdot\varphi_{scat0}^j(R)&=0,\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\varphi_{uns}^j$  – плотность потока «нерассеянного»<sup>1</sup> излучения;  $\varphi_{scat0}^j, \varphi_{scat1}^j$  – нулевой и первый моменты разложения плотности потока рассеянного излучения в ряд по полиномам Лежандра, с точностью до нормировки равные плотности интегрального по углу потока и результирующего тока рассеянного излучения соответственно;  $\Sigma_{rem}^j$  – сечение выведения, которое в принятой модификации метода определяется разностью группового полного сечения и второго момента разложения внутригруппового сечения рассеяния по полиномам Лежандра:

$$\Sigma_{rem}^j(r)=\Sigma_{tot}^j(r)-\Sigma_{s2}^{j\rightarrow j}(r), \quad (3)$$

$S^j$  – групповой источник, который может быть внешним, поверхностным и объемным;  $Q_{0/1}^j$  – нулевой и первый моменты источника, учитывающие поправку на «нерассеянную» компоненту.

В результате решения соответствующей системы разностных уравнений может быть получено пространственно-энергетическое распределение плотности полного потока и тока излучения:

$$\begin{aligned}\varphi_0^j(r)&=\varphi_{uns0}^j(r)+\varphi_{scat0}^j(r); \\ \varphi_1^j(r)&=\varphi_{uns1}^j(r)+\varphi_{scat1}^j(r).\end{aligned}\quad (4)$$

<sup>1</sup> В действительности это нерассеянное+рассеянное на малые углы.

Недостатки методики «выведение +  $P_1$ », которые сводятся в конце концов к относительно низкому качеству результатов при расчете гетерогенных композиций большой оптической толщины (особенно это относится к задачам о прохождении фотонов), создали стимул к развитию комплексных методик, сочетающих простоту приближенных методов с более высокой гарантированной точностью.

Принцип построения алгоритмов комплексных методик достаточно прост: проникающая компонента излучения, для которой необходимо корректно учесть существенную анизотропию распределения по углу и для которой оптическая толщина преграды много меньше оптической толщины для низкоэнергетической замедленной компоненты, рассчитывается отдельно. Низкоэнергетическая компонента, в частности, эпитепловые и тепловые нейтроны, получается по простым методикам – например, в диффузионном приближении. В таком понимании методика «выведение +  $P_1$ » также является комплексной: «нерассеянное» излучение отвечает за проникающую компоненту, а  $P_1$ -приближение метода сферических гармоник учитывает многократно рассеянное излучение, для которого направленный перенос выражен слабее.

Проиллюстрируем сказанное примером одного из подходов построения комплексной методики. Для системы групповых уравнений переноса:

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \phi^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) \cdot \phi^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \sum_{i=1}^j \int \Sigma_s^{i \rightarrow j}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \cdot \phi^i(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + q^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (5)$$

представим решение в виде ряда по столкновениям:

$$\phi^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \sum_{n=1}^N \phi_n^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \sum_{n=N+1}^{\infty} \phi_n^j(\vec{r}, \vec{\Omega}). \quad (6)$$

Сумма (6) означает, что решение в каждой точке образуется из плотностей потоков частиц, претерпевших одно, два и т.д. столкновений. Предлагается вклад первых  $N$  столкновений в плотность потока рассчитывать с использованием метода последовательных столкновений (МПС<sub>N</sub>), а сумму остальных членов ряда (6) получать сразу, посредством решения задачи переноса частиц от источников такого вида:

$$q^j(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \sum_{i=1}^j \int \Sigma_s^{i \rightarrow j}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \cdot \phi_{n=N}^i(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \quad (7)$$

по одной из приближенных методик, например, по методике «выведение +  $P_1$ » или даже просто в  $P_1$ -приближении МСГ.

Оптимизационные вычисления с помощью программного комплекса REMP1 могут выполняться как посредством многократных запусков программы расчета прохождения излучений с самостоятельным выбором структуры и материалов защитной композиции (перебор вариантов), так и «автоматически», в соответствии с оптимизационным алгоритмом «метода скользящего допуска».

Этот метод относится к оптимизационным методам нулевого порядка, позволяющим обходиться без вычисления производных минимизируемой функции. Метод достаточно универсален: с его помощью можно решать оптимизационные задачи в самой общей постановке: найти  $\min F_0(\vec{X})$ ,  $\vec{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ , при выполнении в точке минимума  $\vec{X}^* = \operatorname{argmin} F_0(\vec{X})$  условий

$$\begin{aligned} F_i &\geq 0, \quad i = 1, \dots, I_1 \\ F_i &= 0, \quad i = I_1 + 1, \dots, K, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $F_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, K$  – функционалы поля излучения, фигурирующие в задаче оптимизации:

$$F_i = \int_{\Delta V} d\vec{r} \int_{\Delta \Omega} d\vec{\Omega} \int_{\Delta E} dE \varphi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) \cdot \delta_i(\vec{r}, \vec{\Omega}, E). \quad (9)$$

В (9)  $\delta_i(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  – функции, задающие правила образования функционалов  $F_i$ .

В постановке задачи  $\vec{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$  – набор переменных задачи оптимизации, которыми могут быть, например, толщины/массы варьируемых защитных слоев, их комбинаций и сочетаний, параметры расчетной модели прохождения излучений или другие варьируемые характеристики. В качестве ограничений (8) могут фигурировать габариты/массы всей защитной композиции или ее частей, радиационное энерговыделение (плотность и/или интеграл) и др.

С помощью МСД был решен широкий круг разнообразных оптимизационных задач, возникающих при расчете характеристик полей излучений.

Быстрый рост производительности и доступности вычислительной техники сделал возможным использование при решении задач оптимизации не приближенные методики, а программы точного решения уравнения переноса, реализующие метод дискретных ординат, в данном случае 1D-программу P03-6 [8] и 2D-программу КАСКАД. Эти программы имеют единообразную структуру блоков начальных данных, входных и выходных файлов. Язык ввода, как и файл групповых констант, необходимых для расчета, одинаков для обеих программ. Численный подход к решению уравнения переноса основан на использовании схем 2–4 порядка точности, которые реализованы для обеих программ. Программы обладают дружественным интерфейсом и имеют развитую сервисную систему, в том числе систему обработки результатов.

Программы P03-6 и КАСКАД предназначены для решения систем многогрупповых уравнений переноса нейтронов и фотонов. Анизотропия рассеяния в этих программах учитывается в  $P_L$ -приближении. В программах реализована возможность решения задач с делением – и расчет  $k_{eff}$  и решение подкритической задачи с источником. В решаемых задачах возможен широкий круг источников, граничных и внутренних, изотропных и анизотропных. Конкретный тип задаваемого источника коррелирует с геометрической моделью расчета.

Программа P03-6 позволяет выполнять расчеты для трех одномерных геометрических моделей: плоской, цилиндрической и сферической. Программа КАСКАД предназначена для расчетов в трех двумерных геометриях:  $(x, z)$ ;  $(r, z)$  и  $(r, \theta)$ . Обе указанные программы в течение многих лет широко применяются для решения разнообразных задач, связанных с переносом излучений.

Объединением каждой из программ с программой «метода скользящего допуска» было реализовано два оптимизационных комплекса OPT1D и OPT2D соответственно. Что касается комплекса OPT1D, использующего 1D-программу P03-6, то он, не расширяя круг задач сравнительно с комплексом REMP1, существенно увеличивает надежность получаемых результатов. Скорость счета с помощью комплекса OPT1D ( $1 \div 100$  функционалов в секунду<sup>2</sup>) позволяет выполнять расчет на достаточно густых сетках по пространственным и угловым переменным для композиций значительной оптической толщины. Решение оптимизационных задач проходит в режиме «on-line», что дает возможность оперативно корректировать характеристики композиции и параметры поиска. Результаты решения одномерных задач оптимизации проверяются на 2D-модели (КАСКАД) или на 3D-модели (МСНР) – в тех случаях, когда расчетная область имеет относительно малую оптическую толщину.

<sup>2</sup> Далее для краткости решение для одного варианта композиции будем называть «точкой».

Оптимизационный комплекс OPT2D позволил, в частности, корректно учесть геометрию блока вывода пучка которая даже при высокой степени осевой симметрии блока принципиально двумерна. При создании и применении комплекса OPT2D возник ряд дополнительных, сравнительно с OPT1D проблем, из которых укажем главные.

**Скорость счета.** Задачи оптимизации композиций малой оптической толщины зачастую имеют достаточно очевидное или легко получаемое посредством многовариантных расчетов решение. С другой стороны, блоки вывода реакторных пучков обычно имеют значительную оптическую толщину. В частности, канал ГК-1 реактора ВВРц, на котором возводится медицинский комплекс [9], имеет протяженность 365 см. Даже при грубых расчетных сетках их размерность не позволяет получить скорость вычисления функционалов настолько малую, чтобы можно было решать действительно содержательные задачи оптимизации. Типичная задача оптимизации блока вывода пучка имеет  $5\div 10$  переменных (например, толщин слоев защиты),  $3\div 6$  и более ограничений (обычно функционалы потока на выходе/в фантоме, масса и/или габариты блока и т. д.). Для решения подобной задачи при разумных затратах времени скорость вычисления должна быть не менее 2–3 «точек» в 1 мин. Данное требование ограничивает (по-видимому, временно) круг решаемых задач: для протяженных каналов реально могут быть решены более простые оптимизационные задачи, т.е. меньшей размерности и с меньшим количеством ограничений, чем для каналов малой протяженности. В реальных расчетах приходится искать компромисс между информативностью задачи оптимизации и ее трудоемкостью.

**Настройка расчетных сеток.** Эта проблема напрямую связана с предыдущей: в ходе решения задачи поиска структура расчетной композиции обычно претерпевает существенную трансформацию. Если используются сетки постоянной размерности, для трансформирующейся композиции они могут оказаться неудовлетворительными. Для указанной проблемы есть несколько решений: а) использовать сетки большой размерности, гарантирующие качество результата при любой трансформации расчетной области; б) автоматически пересчитывать пространственную и угловую сетки в каждой «точке», исходя из новых оптических размеров композиции; в) по ходу решения задачи время от времени «вручную» корректировать сетки. Первое решение непригодно для задач оптимизации двумерных композиций, второе, как показал опыт расчетов, не гарантирует требуемую точность функционалов, фигурирующих в задаче оптимизации. Работоспособным оказалось только последнее решение. В соответствии с ним на старте каждой оптимизационной задачи для начальной «точки» решалась задача на достаточно густых сетках, обеспечивающих сходимость решения («точное решение»). Затем уменьшением густоты сеток в серии задач определялась минимальная сетка для «аппроксимирующей» задачи. Для этой сетки отклонение функционалов потока, фигурирующих в задаче оптимизации, не должно было превышать  $\sim 5\div 10\%$ . С найденными минимальными сетками запускалась программа поиска. В ходе поиска время от времени текущая композиция проверялась на сетках, обеспечивающих сходимость, и в случае выхода функционалов «аппроксимирующей» задачи из допустимого коридора отклонения ( $\sim 5\div 10\%$ ) выполнялась коррекция сеток, после чего поиск возобновлялся.

**Сквозные расчетные зоны.** Программы, использующие разностную аппроксимацию, обычно построены на «сквозных» расчетных сетках, поскольку использование локальных сеток усложняет алгоритм и снижает эффективность программ. Расчетная область при этом, разумеется, строится из «сквозных» же геометрических

ких зон. В частности, для цилиндрической  $(r, z)$ -геометрии, принятой в программе КАСКАД, структура геометрических слоев по каждой из координат не зависит от значения другой координаты и эта структура одна и та же для всей композиции. Данное обстоятельство заставляет «отслеживать» изменения сквозной структуры геометрических зон в том случае, когда переменными задачи оптимизации являются толщины геометрических зон. Так, при изменении, произведенном алгоритмом поиска, например, варьируемой толщины геометрической зоны по оси  $z$  необходимо соответствующим образом изменить толщины всех соседних по радиусу геометрических зон. Это неявное ограничение в задаче поиска, разумеется, уменьшает возможности комплекса OPT2D.

Наиболее эффективным комплекс OPT2D оказался при решении оптимизационных задач для биологической защиты и блока вывода пучка малогабаритного медицинского реактора «МАРС» [1]. Это объясняется особенностями данного реактора, прежде всего, малыми размерами активной зоны и блока вывода. Данная особенность имеет следствием то, что проблемы формирования оптимального для нейтрон-захватной терапии (НЗТ) пучка тесно связаны с проблемой организации защиты от излучений персонала и пациента. Из-за малых размеров коллимационная система<sup>3</sup> блока вывода несет и функцию защиты от излучений, а слои защиты блока вывода влияют на характеристики функционалов на выходе пучка и в его окрестности. При решении серии оптимизационных задач для реактора «МАРС» возникла дополнительная проблема: **конический канал блока вывода** установки (рис. 1), моделируемый для программы КАСКАД ступенчатыми зонами с размерами по  $(r, z)$   $0.5 \div 1$  см, не мог быть отображен в задаче оптимизации «напрямую». Это привело бы к росту размерности задачи (до нескольких десятков переменных-

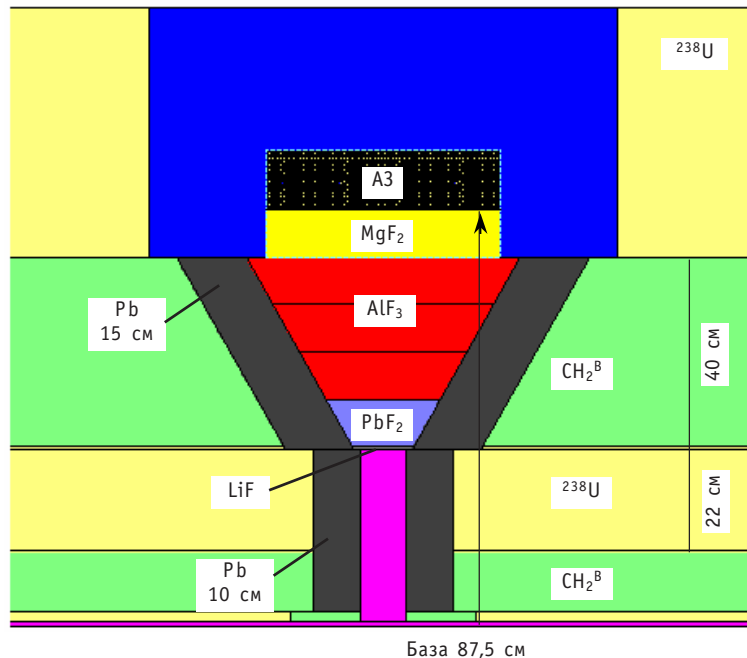


Рис. 1. Аксиальное сечение одного из вариантов блока вывода пучка НЗТ для реактора «МАРС», полученного перебором вариантов, без применения комплексов OPT1D и OPT2D (фрагмент; получено плоттером программы MCNP)

<sup>3</sup> В широком смысле коллимационная система (КС) это целиком блок вывода пучка, в узком смысле КС составляют модификатор спектра, коллиматор и гамма-фильтр.



толщин слоев) и к громоздкому алгоритму восстановления сквозной структуры геометрических зон. Решение подобной оптимизационной задачи с помощью комплекса OPT2D в его данной версии и при современных вычислительных средствах не представляется возможным.

Поэтому перед решением оптимизационных задач для блока вывода пучка НЗТ реактора «МАРС» были выполнены расчеты, в которых конический канал блока вывода заменялся цилиндрическим. При этом габариты фильтра по оси, как и свинцового коллиматора по радиусу, сохранялись равными тем, которые были в исходной композиции. Радиус фильтра по всей высоте был равен максимальному радиусу для исходной задачи. Оказалось, что поверхности уровня основных функционалов задачи оптимизации практически подобны, т. е. функционалы упрощенной задачи могут быть получены «сдвигом» функционалов основной задачи. Исключением является только доза излучений за защитой непосредственно вблизи выхода канала, что объясняется существенным ослаблением защиты при замене конической конфигурации КС на цилиндрическую. Поэтому дополнительными расчетами в реперных «точках» были получены коэффициенты корреляции для пересчета доз за защитой от упрощенной задачи в дозы для исходной задачи.

### РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ РЕАКТОРА «МАРС»

Для реактора «МАРС» и собственно блока вывода пучка был решен ряд двумерных оптимизационных задач (по возрастающей сложности) в следующих основных формулировках:

- 1) определить конфигурацию и материальный состав боковой и тыловой (т.е. вне каналов вывода пучков) защиты реактора «МАРС»: при фиксированных габаритах и уровне доз за защитой минимизировать ее массу посредством варьирования слоев защиты;
- 2) определить конфигурацию и материальный состав собственно фильтра для НЗТ посредством варьирования толщин слоев применяемых в НЗТ материалов ( $\text{Fluental}^4$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbF}_2$ ,  $\text{LiF}$  и других) при максимуме потока эпитепловых нейтронов и при выполнении ограничений на «вредные» примеси быстрых нейтронов и гамма-излучения на выходе;
- 3) скорректировать конфигурацию и, возможно, материальный состав фильтра при включении дополнительных переменных – слоев защиты от излучений и дополнительного ограничения на фиксированный уровень дозы за защитой;
- 4) провести дальнейшую коррекцию фильтра и окружающей защиты, введя в качестве функционалов задачи оптимизации характеристики поля излучения в фантоме при применении НЗТ, т.е. максимизировать терапевтическое качество выводимого пучка.

Данные формулировки видоизменялись в пределах этих четырех групп задач. Так, в задачах группы 2 конфигурация и состав фильтра определялись для ограничения на плотность эпитеплового потока в виде неравенства ( $\geq 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , см. [1]) и при минимальной примеси быстрых нейтронов и гамма-излучения на выходе.

Для всех этих задач получены решения, часть из которых можно считать окончательными, для оставшейся части требуются дальнейшие расчетные исследования. В частности, конфигурация и материальный состав боковой и тыловой защиты реактора «МАРС» остались практически неизменными (см. [1]). Данный результат обусловлен простотой выбранной трехслойной композиции защиты и является положительным по крайней мере в двух аспектах:

<sup>4</sup> Состав 56% F, 43% Al, 1% LiF

- он свидетельствует, что прежняя композиция защиты от излучений, полученная с помощью комплекса REMPI и вариантных расчетов по программам P03-6 и КАСКАД, уже была достаточно оптимальной;

- он же свидетельствует, что и комплекс OPT2D, опирающийся на точное решение уравнения переноса, и примененная расчетная технология в данном случае вполне адекватны.

Для второй задачи получены решения, проливающие свет на спорную в известном смысле проблему нескольких последних лет, связанную с «открытием» для НЗТ такого материала, как  $MgF_2$  (см., например, [10]): какой фторсодержащий материал лучше (относительно формирования пучка для НЗТ) – Fluental или  $MgF_2$ ? В свете выполненных расчетов, а также анализа сечений фигурирующих элементов этот спор представляется беспредметным. Он должен разрешаться в каждом случае для конкретного исходного спектра нейтронов пучка (и примеси гамма-излучения) и конкретных условий формирования пучка, в том числе габаритов и формы блока вывода, материала, размеров и формы коллиматора и даже, как в случае малогабаритного реактора «МАРС», для окружающей коллимационную систему защиты. В известном смысле наилучшим являлся бы чистый фтор с плотностью не менее  $\sim 3.0 \text{ г/см}^3$ , поскольку все остальные элементы, входящие в рассматриваемые материалы, практически никак не улучшают качество пучка, сформированного только фтором.

Приведем примеры постановки и решения двух оптимизационных задач группы 2.

**Задача 1.** Посредством варьирования толщин слоев материалов фильтра без ограничения массы и габаритов блока вывода максимизировать отношение плотности эпитеплового потока к плотности полного потока  $\Phi_{epi}/\Phi_{tot}$  при требуемых<sup>5</sup> значениях критериев:

для плотности эпитеплового потока  $\Phi_{epi} \geq 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ,  
 примеси доз «вредных» излучений  $D_{fast}/\Phi_{epi} \leq 5 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$ ,  
 $D_\gamma/\Phi_{epi} \leq 5 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$ ,

а также примеси «вредных» тепловых нейтронов  $\Phi_{therm}/\Phi_{epi} \leq 0.04$ .

Старт поиска осуществлялся из точки, в которой для «состоятельности» были заданы слои материалов, являющихся главными «конкурентами» в фильтрах для НЗТ. Материалы располагались последовательно от АЗ в следующем порядке: Fluental (толщина слоя 10 см) +  $MgF_2$  (10 см) +  $Al_2O_3$  (10 см). Эта композиция является недопустимой, в ней

$\Phi_{epi} = 19 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ,  $D_{fast}/\Phi_{epi} = 67 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$ ,  $D_\gamma/\Phi_{epi} = 18 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$ ,  
 $\Phi_{therm}/\Phi_{epi} = 0.12$ , а целевая функция  $\Phi_{epi}/\Phi_{tot} = 0.68$ .

В результате решения задачи оптимизации получено решение, которое комплекс OPT2D «объявил» окончательным: алгоритм поиска оставил только слой Fluental толщиной 88 см, который заполнил весь канал вывода пучка (см. рис. 1). При этом

$\Phi_{epi} = 1.0 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ,  $D_{fast}/\Phi_{epi} = 1.90 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$ ,  $D_\gamma/\Phi_{epi} = 4.65 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2$ ,  
 $\Phi_{therm}/\Phi_{epi} = 0.037$ , а целевая функция  $\Phi_{epi}/\Phi_{tot} = 0.95$ .

**Задача 2.** При усложнении оптимизационной задачи для четырехслойной стартовой композиции  $MgF_2$  (10 см) + Fluental (30 см) +  $PbF_2$  (10 см) + LiF (0.5 см)<sup>6</sup> добавлено ограничение: суммарная толщина варьируемых слоев должна быть  $\leq 50.5 \text{ см}$  (это оставляет фильтр в пределах конической части коллиматора, рис. 1), а

<sup>5</sup> См. [1].

<sup>6</sup> Композиция, полученная ранее перебором вариантов, [1]. Ее в данном контексте можно называть субоптимальной.



ограничения на дозы ослаблены до  $20 \cdot 10^{-11}$  сГр·см<sup>2</sup>. В стартовой точке значения участвующих функционалов вполне удовлетворительны:

$$\Phi_{epi} = 5.2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}, D_{fast} / \Phi_{epi} = 19 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2, D_{\gamma} / \Phi_{epi} = 0.96 \cdot 10^{-11} \text{ сГр} \cdot \text{см}^2, \\ \Phi_{therm} / \Phi_{epi} = 0.009, \text{ а целевая функция } \Phi_{epi} / \Phi_{tot} = 0.88,$$

тем не менее, в результате поиска их удалось немного «поправить»: предлагаемая комплексом OPT2D в качестве решения двухслойная композиция  $\text{MgF}_2$  (24.2 см) + Flualent (26.3 см), будучи более простой, практически не ухудшает характеристики:

$$\Phi_{epi} = 5.1 \cdot 10^9, D_{fast} / \Phi_{epi} = 15 \cdot 10^{-11}, D_{\gamma} / \Phi_{epi} = 6.3 \cdot 10^{-11}, \\ \Phi_{therm} / \Phi_{epi} = 0.010, \text{ а целевая функция } \Phi_{epi} / \Phi_{tot} = 0.90.$$

Причины, по которым во второй задаче алгоритм поиска сохраняет слой  $\text{MgF}_2$ , полностью удаляя его в первой задаче, достаточно ясны:

- в задаче 1 гамма-излучение АЗ и, что важнее, вторичное гамма-излучение, генерируемое КС, успешно подавлялось большой толщиной фильтра, свободного от габаритных ограничений;
- в задаче 2 толщины фильтра даже равной 50.5 см недостаточно для подавления гамма-излучения только однородным слоем Flualent, и в ход идет несколько более плотный материал  $\text{MgF}_2$  (3.13 г/см<sup>3</sup> против 3.0 г/см<sup>3</sup>);
- этот материал в задаче 2 расположен ближе к АЗ (в области более жесткого спектра нейтронов), что сближает ситуацию с описанной в [10] для ускорительных нейтронов, где  $\text{MgF}_2$  оказался вне конкуренции.

Особенности решения задачи 2 еще и в том, что

- разрешенной толщины достаточно, чтобы «главные игроки» Flualent и  $\text{MgF}_2$  не допускали в игру более эффективный для подавления гамма-излучения материал  $\text{PbF}_2$ ;
- последний материал не допускается еще и потому, что содержание F в нем меньше, чем у его соперников, и он в отличие от них менее «прозрачен» для нейтронов; будучи расположен вблизи выхода пучка,  $\text{PbF}_2$  эффективно «выбрасывает» из него нейтроны неупругим (до ~ 200 кэВ) и упругим (особенно для энергий менее ~ 200 кэВ) рассеянием;
- хороший поглотитель тепловых нейтронов LiF (в нем к тому же и максимальное содержание F), тем не менее, «не выдержал» конкуренции с Flualent, который, во-первых, также содержит поглотитель тепловых нейтронов (Li), но, во-вторых, лучше поглощает гамма-излучение на выходе пучка (3.0 г/см<sup>3</sup> против 2.6 г/см<sup>3</sup>).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Относительно результатов данной работы можно сделать следующие выводы:

- на основе объединения программ решения уравнения переноса P03-6 и КАС-КАД с оптимизационным алгоритмом «метода скользящего допуска» созданы оптимизационные комплексы OPT1D и OPT2D соответственно;
- эти комплексы позволяют решать задачи оптимизации характеристик защиты от излучений в самой общей постановке для одно- и двумерных защитных композиций;
- оптимизационные комплексы успешно применены для оптимизации блока вывода реакторных пучков для лучевой терапии.

### Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Волощенко А.М. Вычислительные проблемы расчета радиационных защит методом дискретных ординат в трехмерной геометрии ЯЭУ / Доклад на IX Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» / В кн.: Тезисы докладов. – Обнинск, 2006. – С. 24-27.
5. Дубинин А.А., Кураченко Ю.А. Решение общей задачи оптимизации защиты по составу и форме – задачи профилирования гетерогенной композиции / Доклад на Третьей всесоюзной научной конференции по защите от излучений ядерно-технических установок: Сб. докладов. – Тбилиси: ИПМ ТГУ, 1981. – С. 52-60.
6. 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. – С. 225-227.
7. Химмельблауд. Прикладное нелинейное программирование. – М.: МИР, 1975.
8. Averin A. V., Voloschenko A.M., Kondratenko E.P., Dubinin A.A. "The ROZ-6.4 One-Dimensional Discrete Ordinates Neutrons, Gamma-Rays and Charged Particles 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 5-1.
9. Проект медицинского комплекса на реакторе ВВР-ц / В кн.: А.Ф. Цыб, С.Е. Ульяненко, Ю.С. Мардынский. Нейтроны в лечении злокачественных новообразований. – Обнинск: БИСТ, 2003. – С. 75 – 87.
10. Kononov O.E. et al. Optimization of an accelerator-based epithermal neutron source for neutron capture therapy // Applied Radiation and Isotopes 61 (2004) 1009-1013.

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.