«АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ», Т. 45, ВЫП. 5, НОЯБРЬ 1978

УДК 621.039.58

Применение метода штрафных функций для профильной оптимизации радиационной защиты

ЖАРКОВ В. А., ПАДОРИН Г. В.

Вопросы минимизации массы защиты с помощью выбора оптимальной формы рассматривались в работах [1—3]. В этих работах предложены методы расчета оптимального профиля защиты для точечного источника излучения при условии, что ограничение по мощности дозы задано в одной точке. Во многих практических случаях источник излучения объемный, а ограничение по мощности дозы задается не в точке, а на некоторой поверхности. Так, согласно Правилам безопасной транспортировки радиоактивных веществ (ПБТРВ—73) радиационная защита должна обеспечивать снижение уровня излучения до значений, задаваемых на поверхности установки и на расстоянии 1 м от нее. В работе [4] предложен метод расчета оптимального профиля защиты объемного источника γ-излучения для случая, когда мощность дозы на поверхности защиты постоянна и равна требуемому значению.

В настоящей статье рассматривается общий случай, когда ограничение по мощности дозы задается на произвольной поверхности. Геометрия задачи, полагаемая азимутально-симметричной, представлена на рисунке, где для простоты изображены только источник излучения в ампуле и защита. Внутренние размеры последней считаются заданными. Наружная поверхность защиты аппроксимируется совокупностью конических поверхностей, задаваемых при помощи углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \ldots \alpha_m$ и соответствующих радиусов-векторов $r_1, r_2, r_3, \ldots r_m$.

Массу защиты можно записать в виде

$$G=\gamma\left[\frac{\pi}{3}\sum_{j=1}^{m-1} r_j r_{j+1}\sin(\alpha_{j+1}-\alpha_j)\times\right.$$
$$\left.\times(r_j\sin\alpha_j+r_{j+1}\sin\alpha_{j+1})-V_0\right],$$

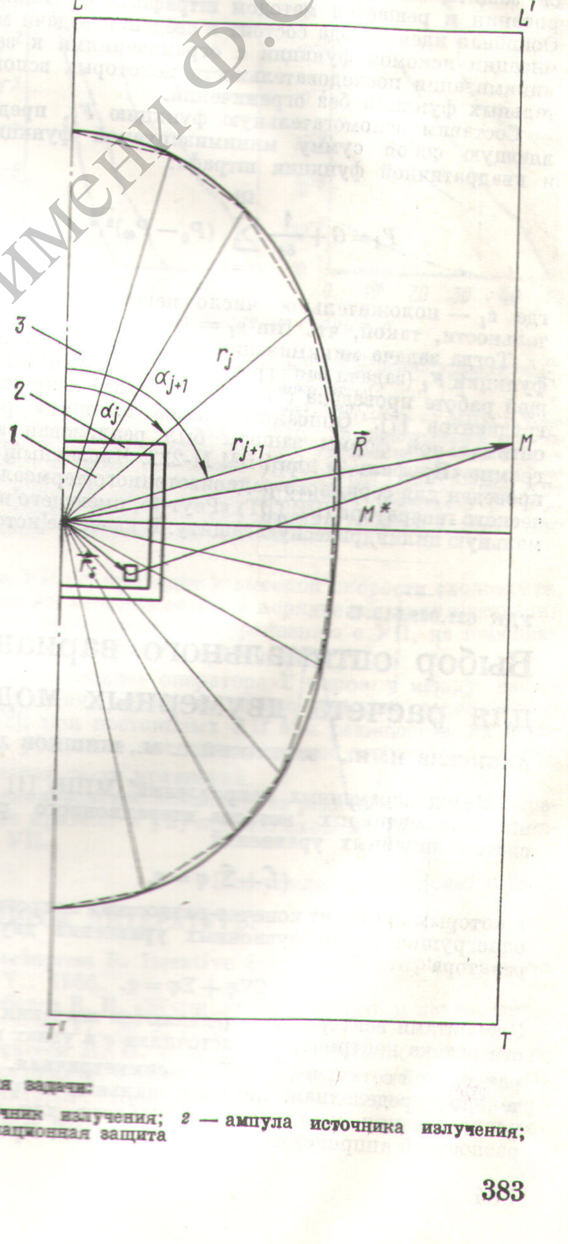
где γ — удельная масса материала защиты; V_0 — объем, ограниченный внутренней поверхностью защиты.

В силу азимутальной симметрии задачи ограничение по мощности дозы должно выполняться на контуре $LL'TT'$. С практической точки зрения достаточно потребовать, чтобы ограничения не нарушались в выбранной совокупности Ω-точек, лежащих на контуре. Тогда задача оптимизации защиты математически формулируется следующим образом: найти $r_1, r_2, \ldots r_m$ (профиль защиты), чтобы функция G была минимальной при ограничениях $P_0-P_\omega=0$ $(\omega=1, 2\ldots\Omega)$, где P_ω — мощность дозы в ω-й точке; P_0 — заданное значение мощности дозы.

Для расчета мощности дозы используется метод точечного ядра. Мощность дозы P в некоторой точке M (см. рисунок) равна

$$P(M)=\sum_k\sum_s\frac{Qk_\gamma(E_k)}{W\,|\mathrm{R}-\mathrm{r}_s|^2}\times$$
$$\times\exp\left[-\sum_{l=1}^{N}\mu_l(E_k)\,d_{sl}\right]B_s(E_k),$$

где Q — активность источника; W — число точечных источников; $k_\gamma(E_k)$ — γ-постоянная для γ-квантов энергии E_k; R, r_s — радиусы-векторы точки M и s-го точечного источника соответственно; $\mu_l(E_k)$ — коэффициент ослабления γ-квантов с энергией E_k в l-зоне; d_{sl} — длина хорды в l-й зоне в направлении $(\mathrm{R}-\mathrm{r}_s)$; $B_s(E_k)$ — дозовый фактор накопления точечного источника γ-квантов с энергией E_k в точке M для многозон-



Геометрия задачи:

1 — источник излучения; *2* — ампула источника излучения; *3* — радиационная защита ной среды, описываемой совокупностью хорд d_{sl} $(1 \leqslant l \leqslant N)$.

Суммирование проводится по всем линиям спектра γ-излучения (индекс k), по всем точечным источникам (индекс s) и по всем зонам (индекс l).

В работе [5] показано, что для криволинейной защиты, выполненной из тяжелого материала, фактор накопления слабо меняется по мере удаления от поверхности защиты. Поэтому полагается, что фактор накопления в точке M приближенно равен фактору накопления в соответствующей точке M^* на поверхности защиты. Фактор накопления в точке М* вычисляется для материала защиты по суммарной длине хорд с использованием тейлоровской аппроксимации. Обоснование применимости этой формулы для геометрии рассматриваемой задачи приведено в работе [4].

Сформулированная выше задача минимизации массы защиты является задачей нелинейного программирования и решается методом штрафных функций [6]. Основная идея метода состоит в сведении задачи минимизации искомой функции с ограничениями к задаче минимизации последовательности некоторых вспомогательных функций без ограничений.

Составим вспомогательную функцию F_i, представляющую собой сумму минимизируемой функции G и квадратичной функции штрафа:

$$F_i = G + \frac{1}{\varepsilon_i} \sum_{\omega=1}^{\Omega} (P_0 - P_\omega)^2,$$

где ε_i — положительное число некоторой последовательности, такой, что $\lim \varepsilon_i = 0$ при $i \to \infty$.

Тогда задача минимизации сводится к минимизации функций F_i (задача без ограничений), которая в настоящей работе проведена с помощью метода сопряженных градиентов [7]. Описанный выше алгоритм расчета оптимальной формы защиты был реализован в программе «Профиль-2» для ЭВМ М-222. Численный расчет проведен для серийного радиоизотопного термоэлектрического генератора (РИТЭГ) «Реут-1», имеющего неоптимальную цилиндрическую защиту. В качестве источника тепловой энергии в РИТЭГ используется изотопный блок из титаната ^{90}Sr. Результаты расчета показали, что по сравнению с неоптимизированной защитой профильная оптимизация позволяет уменьшить массу на 30% (с 850 до 650 кг). Поскольку РИТЭГ в основном эксплуатируются в удаленных, труднодоступных районах, где наиболее ярко проявляются их преимущества перед энергоустановками других типов, снижение массы установки за счет оптимизации не только сокращает расход защитных материалов, иногда весьма дорогих и дефицитных, но и существенно облегчает и удешевляет доставку РИТЭГ к месту эксплуатации.

Разработанный метод расчета может быть использован также для минимизации массы контейнеров при перевозке радиоактивных источников и других радиационных установок. С помощью этого метода можно также рассчитывать оптимальную защиту от нейтронного излучения, если в вычислительной программе использовать точечное ядро, описывающее ослабление дозы нейтронов.

Поступило в Редакцию 3.III.78
В окончательной редакции 18.V.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токарев В. В., Цветков В. М. «Журн. прикл. механики и техн. физики», 1964, № 1, с. 90.
2. Петров Э. Е. В кн.: Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 3. М., Атомиздат, 1969, с. 24.
3. Петров Э. Е., Шеметенко Б. П. В кн.: Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 5. М., Атомиздат, 1972, с. 196.
4. Жарков В. А. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 3, с. 207.
5. Жарков В. А., Чудотворов А. А., Колесников А. Ф. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 2, с. 128.
6. Полак Э. Численные методы оптимизации. М., «Мир», 1974.
7. Fletcher R., Reeves C. «Computer J.», 1964, v. 7, N 2, p. 149.

УДК 621.039.512.45

Выбор оптимального варианта метода переменных направлений для расчета двумерных моделей реакторов

АЛЕКСЕЕВ П. Н., ЗАРИЦКИЙ С. М., ШИШКОВ Л. К.

Метод переменных направлений (МПН) [1] — один из перспективных методов итерационного решения систем линейных уравнений

$$(\hat{L} + \hat{\Sigma})\,\varphi = \mathbf{q}, \tag{1}$$

к которым приводит конечно-разностная аппроксимация одногрупповых диффузионных уравнений двумерного реактора

$$-\nabla D \nabla \varphi + \Sigma \varphi = q. \tag{2}$$

Элементами векторов φ и q являются значения плотности потока нейтронов φ и источника q в узлах конечно-разностной сетки, а $(\hat{L} + \hat{\Sigma})$ — симметричная, положительно определенная, пятидиагональная матрица [при использовании пятиточечного шаблона для конечно-разностной аппроксимации уравнения (2)]. Предложено несколько модификаций МПН. В настоящей работе приводится их сравнение между собой по скорости сходимости и затратам машинного времени с целью выбора оптимального варианта для расчета двумерных моделей реакторов различных типов и решения задач обобщенной теории возмущений.

Рассмотрим следующие варианты МПН [1]: а) Писмэна и Рэкфорда; б) Дугласа и Рэкфорда; в) схема с минимальным числом арифметических операций, приходящихся на один узел сетки в рамках одной итерации; г) варианты, отличающиеся способом «расщепления» оператора $\hat{\Sigma}$ (диагональная матрица, включающая сечения полного вывода нейтронов из группы в каждом узле сетки и условия в узлах, принадлежащих границе) между левыми и правыми частями уравнений МПН; д) МПН с ускоряющими параметрами (УП), не изменяю-