КОМИТЕТ СТАНДАРТИЗАЦИИ И МЕТРОЛОГИИ СССР

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

## БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИАЦИОННАЯ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕНЕВОЙ ЗАЩИТЫ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

## РД 50—25645.225—91

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
1991

gost.e-ecolog.ru

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИАЦИОННАЯ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ**

**Методика расчета оптимальной теневой защиты экипажа космического аппарата от воздействия ионизирующих излучений ядерного реактора**

**РД 50—25645.225—91**

Редактор *В. М. Лысенкина*
Технический редактор *В. Н. Малькова*
Корректор *Н. Л. Шнайдер*

Сдано в наб. 31.05.91 Подп. в печ. 16.09.91 Формат изд. 60×90 1/16 Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая 1,25 усл. п. л. 1,5 усл. кр.-отт. 1,24 уч.-изд. л. Тираж 1400 экз. Изд. № 987/4 Цена 50 к.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123557, Москва, ГСП, Новопресненский пер., 3.
Калужская типография стандартов, ул. Московская, 256. Зак. 1174

УДК 621.039 538 Группа Ф40

РУКОВОДЯЩИЙ НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИАЦИОННАЯ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ

**Методика расчета оптимальной теневой защиты экипажа космического аппарата от воздействия ионизирующих излучений ядерного реактора**

**РД 50—25645.225—91**

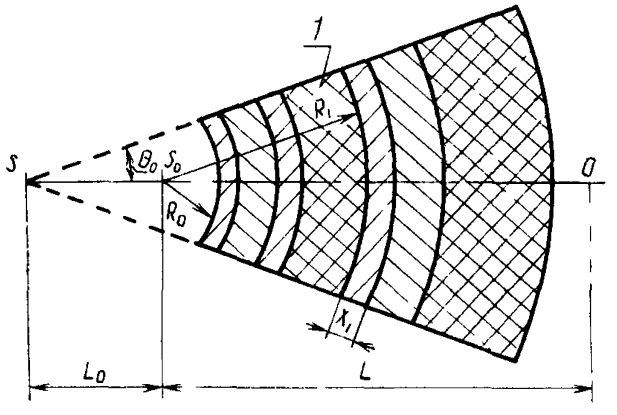
ОКСТУ 6968

**Дата введения 01.07.92**

Настоящие методические указания предназначены для выполнения расчетов оптимальной теневой защиты экипажа космического аппарата от воздействия ионизирующих излучений ядерного реактора (расчетов оптимальной защиты) на этапах составления технического задания и эскизного проектирования космических аппаратов с ядерным реактором

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Расчетная модель теневой защиты экипажа космического аппарата представляет собой последовательность сферических слоев защитных материалов, ограниченную конической поверхностью с углом $2\Theta_0$ при вершине, в соответствии с чертежом.




*1* — осевое сечение теневой защиты *S* — вершина конической поверхности $S_0$ — центр сферических слоев в который помещен точечный изотропный источник $R_i$, $i=0, 1, \ldots, n$ — радиусы сферических слоев защитных материалов, $L_0$ — расстояние от вершины конической поверхности до центра сферических слоев, *L* — расстояние от источника до защищаемой области $X_i=R_i-R_{i-1}$ — толщины сферических слоев, *O* — центр защищаемой области

© Издательство стандартов, 1991

1.2. Ядерный реактор моделируется точечным изотропным источником излучечий, помещенным в центре сферических слоев $S_0$.

1.3. Расстояние от центра $S_0$ до защищаемой области фиксировано и равно $L$.

1.4. Расчет оптимальной защиты выполняется по двум методикам. Для оперативного расчета оптимальной защиты применяют инженерную методику, изложенную в разд. 2. Для более точного расчета оптимальной защиты применяют методику, основанную на решении уравнения переноса излучения. Эта методика изложена в разд. 3.

1.5. Обе методики могут использоваться как независимо, так и последовательно. В случае последовательного использования методика, основанная на решении уравнения переноса, в качестве начальных значений толщин слоев может использовать значения, полученные по инженерной методике.

1.6. Константы в алгоритмах разд. 3 используют в соответствии со справочником*.

1.7. Пересчет характеристик нейтронного и гамма-излучений в мощности доз производят в соответствии с нормами радиационной безопасности НРБ—76/87, утвержденными Минздравом СССР.

## 2. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

2.1. Исходные данные

2.1.1. Каждому $i$-му слою защиты присваивают индекс материала $l(i)$, заполняющего этот слой. Пустым слоям присваивают индекс $l=0$.

2.1.2. Для каждого материала с индексом $l(i)$, отличным от нуля, задают следующие характеристики:

1) $\lambda_l$ — длина релаксации дозы нейтронного излучения, энергия которого больше 2,5 МэВ;

2) $\mu_l$ — полные коэффициенты ослабления гамма-излучения, энергия которого соответствует средней энергии гамма-излучения, испускаемого реактором, и вторичного гамма-излучения, возникающего в защитных слоях;

3) $b_l$ — коэффициенты аналитической аппроксимации зависимости дозового коэффициента вторичного гамма-излучения от толщины слоев, входящие в формулы в качестве сомножителей;

4) $\beta_l$ — коэффициенты аналитической аппроксимации зависимости дозового коэффициента вторичного гамма-излучения от толщины слоев, входящие в формулах в показатель экспоненты;

---

* Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Под ред. М Н Николаева М, Энергоиздат, 1981.

5) $a_l$ — коэффициенты для учета поглощения дозы нейтронного и гамма-излучений в защищаемой области, входящие в формулы в качестве сомножителей;

6) $\alpha_l$ — коэффициенты для учета поглощения дозы нейтронного и гамма-излучений в защищаемой области, входящие в формулах в показатель экспоненты;

7) $\rho_l$ — плотность материалов.

Примечание. Константы, перечисленные в п. 2.1.2, приведены в приложении 1.

2.1.3. Дополнительные исходные данные:

1) $2\Theta_0$ — угол при вершине конической поверхности, ограничивающей поперечные размеры защиты;

2) $R_0$ — расстояние от источника излучения до внутренней поверхности защиты;

3) $L$ — расстояние от источника излучения до защищаемой области;

4) $X_i^{(0)}$ — начальные значения толщины каждого слоя.

2.2. Алгоритм расчета массы защиты и эквивалентной дозы излучений

2.2.1. Массу защиты $m$ $(\mathbf{X})$, $\mathbf{X}=\{X_1, \ldots, X_n\}$ вычисляют по формуле

$$m(\mathbf{X})=\frac{2\pi}{3}\sum_{i=1}^{n}\rho_i\left\{\left[\left(\sum_{k=0}^{i}X_k\right)^3-\left(\sum_{k=0}^{i-1}X_k\right)^3\right]+\frac{3}{2}L_0\sin^2\Theta_0\times\right.$$
$$\times\left[\left(\sum_{k=0}^{i}X_k\right)^2-\left(\sum_{k=0}^{i-1}X_k\right)^2\right]-\cos\Theta_0\left\{\left[\left(\sum_{k=0}^{i}X_k\right)^2-\right.\right.$$
$$\left.\left.-L_0^2\sin^2\Theta_0\right]^{\frac{3}{2}}-\left[\left(\sum_{k=0}^{i-1}X_k\right)^2-L_0^2\sin^2\Theta_0\right]^{\frac{3}{2}}\right\}\right\}, \qquad (1)$$

где $L_0$ — расстояние от точечного источника излучения до вершины конической поверхности с углом $2\Theta_0$ при вершине, м;

$n$ — число слоев защиты.

2.2.2. Суммарную мощность дозы $D$ в центре защищаемой области определяют как сумму компонент: мощности дозы нейтронного излучения $D_н$, мощности дозы гамма-излучения реактора $D_{\gamma 1}$ и мощности дозы вторичного гамма-излучения из защиты $D_{\gamma 2}$

$$D=D_н+D_{\gamma 1}+D_{\gamma 2}. \qquad (2)$$

2.2.3. Мощность дозы нейтронного излучения $D_н$ в защищаемой области вычисляют по формуле

$$D_н=D_{0н}a_н\exp\left[-(1-\alpha_н)\sum_{i=1}^{n}X_i\lambda_i\right], \qquad (3)$$

где $D_{0н}$ — мощность дозы на внутренней поверхности защиты;

$a_н \exp[\alpha_н \Sigma X_i/\lambda_i]$ — множитель, учитывающий соотношение дозы на поверхности защиты и в защищаемой области.

2.2.4. Мощность дозы гамма-излучения реактора вычисляют по формуле

$$D_{\gamma 1}=D_{0\gamma}a_{\gamma 1}\exp\left[-(1-\alpha_{\gamma 1})\sum_{i=1}^{n}\mu_{1i}X_i\right], \qquad (4)$$

где $\mu_{1i}$ — линейный коэффициент ослабления дозы гамма-излучения реактора;

$a_{\gamma 1}\exp[\alpha_{\gamma 1}\sum_{i=1}^{n}\mu_{1i}X_i$ — [ множитель, учитывающий соотношение дозы на поверхности защиты и в защищаемой области.

2.2.5. Мощность дозы вторичного гамма-излучения, образующегося в слоях защиты, вычисляют по формуле

$$D_{\gamma 2}=D_{0н}\frac{\mathrm{tg}^2\Theta_0}{2}\sum_{i=1}^{n}\delta_i\exp\left[-\sum_{k=1}^{i}X_k/\lambda_k-(1-\alpha_{\gamma 2})\sum_{k=i+1}^{n}\mu_{i\Rightarrow k}X_k\right], \qquad (5)$$

где $\delta_i=b_{1i}\exp(\beta_{1i}X_i)+b_{2i}\exp(\beta_{2i}X_i)$ — дозовый коэффициент вторичного гамма-излучения;

$\mu_{i\Rightarrow k}$ — линейный коэффициент ослабления гамма-излучения, образовавшегося в $i$-м слое материалом $k$-го слоя.

2.3. Алгоритм расчета частных производных массы защиты и суммарной дозы по толщине слоя защиты

2.3.1. Частную производную массы защиты по толщине слоя $\partial m/\partial X_i$ вычисляют по формуле

$$\frac{dm}{dX_i}=2\pi\sum_{k=i}^{n}\rho_k\left\{\left(\sum_{j=0}^{k}X_j\right)^2-\nu_{ik}\left(\sum_{j=0}^{k-1}X_j\right)^2+L_0\sin^2\Theta_0\times\right.$$
$$\times\left[\sum_{j=0}^{k}X_j-\nu_{ik}\sum_{j=0}^{k-1}X_j\right]-\cos\Theta_0\left[\sqrt{\left(\sum_{j=0}^{k}X_j\right)^2-L_0^2\sin^2\Theta_0}\times\right.$$
$$\left.\left.\times\sum_{j=0}^{k}X_j-\nu_{ik}\sqrt{\left(\sum_{j=0}^{k-1}X_j\right)^2-L_0^2\sin^2\Theta_0}\cdot\sum_{j=0}^{k-1}X_j\right]\right\}, \qquad (6)$$

где $\nu_{ik}=\begin{cases}0, & k=i;\\ 1, & k>i.\end{cases}$

2.3.2. Частную производную суммарной мощности дозы по толщине слоя вычисляют по формуле

$$\frac{dD}{dX_i}=\frac{dD_н}{dX_i}+\frac{dD_{\gamma 1}}{dX_i}+\frac{dD_{\gamma 2}}{dX_i}. \qquad (7)$$

2.3.3. Частные производные мощности дозы нейтронного и мощности дозы гамма-излучения реактора вычисляют по формуле

$$\frac{dD_j}{dX}=-(1-\alpha_j)\mu_{ij}D_j, \qquad (8)$$

где $j=1$ — относится к гамма-излучению; $\mu_{i1}\equiv\mu_1$ и $\alpha_1\equiv\alpha_{\gamma 1}$;

$j=2$ — относится к нейтронному излучению; $\mu_{i2}\equiv 1/\lambda_i$ и $\alpha_2\equiv\alpha_н$.

2.3.4. Частную производную мощности дозы вторичного гамма-излучения по толщине слоя вычисляют по формуле

$$\frac{dD_{\gamma 2}}{dX_i}=D_{0н}\exp\left[-\sum_{k=1}^{i}\frac{X_k}{\lambda_k}-(1-\alpha_{\gamma 2})\sum_{k=i+1}^{n}\mu_i\Rightarrow kX_k\right]\cdot$$

$$\cdot\left\{[b_{1i}\beta_{1i}\exp(\beta_{1i}X_i)+b_{2i}\beta_{2i}\exp(\beta_{2i}X_i)]+\right.$$

$$\left.+\sum_{k=1}^{i-1}(1-\alpha_{\gamma 2})\mu_i\Rightarrow k\delta_k-\sum_{k=i}^{n}\frac{\delta_k}{\lambda_k}\right\}. \qquad (9)$$

2.4. Алгоритм минимизации массы защиты

2.4.1. Минимизацию массы защиты при фиксированном значении суммарной мощности дозы $D_0$ производят методом наискорейшего спуска.

2.4.2. Задают допустимое значение суммарной мощности дозы $D_0$ и начальные значения толщин защитных слоев $X_i^{(0)}$ и вычисляют значение массы $m^{(0)}$ по формуле (1) и значение мощности дозы $D^{(0)}$ по формуле (2).

2.4.3. Вычисляют частные производные массы по формуле (6) и суммарной мощности дозы по формуле (7).

2.4.4. Присваивают значениям частных производных индекс $q=0$ и вычисляют приращения толщин каждого слоя $\Delta X_i^q$ по формуле

$$\Delta X_i^q=-\Delta m\cdot\frac{\frac{dm}{dX_i}\cdot\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{dD}{dX_j}\right)^2-\frac{dD}{dX_i}\cdot\sum_{j=1}^{n}\frac{dm}{dX_j}\frac{dD}{dX_j}}{\left\{\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{dm}{dX_j}\cdot\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{dD}{dX_k}\right)^2-\frac{dD}{dX_j}\cdot\sum_{k=1}^{n}\frac{dm}{dX_k}\frac{dD}{dX_k}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}}. \qquad (10)$$

2.4.5. Вычисляют значения толщин $X_i^{q+1}=X_i^q+\Delta X_i^q$, $i=1,\ldots,n$, образующие новый вектор $\mathbf{X}^{(q+1)}$.

2.4.6. Вычисляют значения массы $m^{(q+1)}=m(\mathbf{X}^{(q+1)})$ и мощности дозы $D^{(q+1)}=D(\mathbf{X}^{(q+1)})$.

2.4.7. Если $\left|\frac{D^{(q+1)}-D_0}{D_0}\right|\leqslant 0{,}05$, то вычисления выполняют по п. 2.4.10;

Если $\left|\frac{D^{(q+1)}-D_0}{D_0}\right|>0{,}05$, то вычисления выполняют по п. 2.4.8.

2.4.8. Вычисляют значение $\Delta\widetilde{X}_i^q$ по формуле

$$\Delta\widetilde{X}_i^q=\frac{D^{(q+1)}-D_0}{\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{dD^{(q+1)}}{dX_j}\right)^2}\cdot\frac{dD^{(q+1)}}{dX_i}. \qquad (11)$$

2.4.9. Принимают $X_i^{q+1} = X_i^{q+1} + \Delta X_i^q$, $i = 1, ..., n$ и переходят к вычислению по п. 2.4.6 со значениями толщин $X_i^{q+1}$.

2.4.10. Последовательно повторяют вычисления по пп. 2.4.3—2.4.6, присвоив значениям частных производных индекс $q = 1$.

2.4.11. Если $m^{(q+1)} \leqslant m^{(q)}$ и выполняется условие $|(D^{(q+1)} - D_0)/D_0| \leqslant 0{,}01$, то выполняют вычисления по п. 2.4.3—2.4.6, изменив индекс $q = 2$ и т. д.; если $m^{(q+1)} > m^{(q)}$, то уменьшают значение $\Delta m$ в два раза, принимают значения толщин, полученные на предыдущей итерации, и повторяют вычисления по пп. 2.4.3—2.4.6.

2.4.12. Если на двух последовательных итерациях $k$ и $k+1$ $m^{(k+1)} \approx m^{(k)}$ и одновременно выполняются условия

$$\left|\frac{D^{(k+1)} - D_0}{D_0}\right| \leqslant 0{,}05;$$

$$\left|\frac{X_i^{k+1} - X_i^k}{X_i^k}\right| \leqslant 0{,}01, \qquad (12)$$

то процедура минимизации прекращается и в качестве минимальной массы принимают значение $m^{(k)}$.

## 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ, ОСНОВАННАЯ НА РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА

3.1. Исходные данные для расчета дозы

3.1.1. Диапазон энергии для нейтронного излучения источника разбивают на 26 групп в соответствии с приложением 2.

3.1.2. Диапазон энергии для гамма-излучения источника разбивают на 13 групп в соответствии с приложением 2.

3.1.3. Плотность потока нейтронного излучения в каждой группе $F^{i(n)}$, падающего по нормали к внутренней поверхности защиты, вычисляют по формуле

$$F^{i(n)} = \int_{E_{i-1}^{(n)}}^{E_i^{(n)}} S^{(n)}(E)\,dE/(E_{i-1}^{(n)} - E_i^{(n)}), \qquad (13)$$

где $i = 1, ..., 26$;

$E_{i-1}^{(n)}$ — верхняя граница энергетической группы для нейтронного излучения, МэВ;

$E_i^{(n)}$ — нижняя граница энергетической группы для нейтронного излучения, МэВ;

$E_0 = 10{,}5$ МэВ.

3.1.4. Плотность потока гамма-излучения в каждой группе $F^{i(\gamma)}$, падающего по нормали к внутренней поверхности защиты, вычисляют по формуле

$$F^{j(\gamma)} = \int_{E_{j-1}^{(\gamma)}}^{E_j^{(\gamma)}} S^{(\gamma)}(E)\mathrm{d}E \; (E_{j-1}^{(\gamma)} - E_j^{(\gamma)}), \qquad (14)$$

где $j = 1, ..., 13$;

$E_{j-1}^{(\gamma)}$ — верхняя граница энергетической группы для гамма-излучения, МэВ;

$E_j^{(\gamma)}$ — нижняя граница энергетической группы для гамма-излучения, МэВ;

$E_0 = 11$ МэВ.

3.1.5. Значения групповых плотностей тока нейтронного излучения на внешней поверхности защиты $J_n^i(R)$ определяют по формулам (32—33) приложения 3.

3.1.6. Значения групповых плотностей тока гамма-излучения на внешней поверхности защиты $J_n^j(R)$ определяют по формулам (32, 33) приложения 3.

3.2. Расчет мощности дозы в центре защищаемой области

3.2.1. Суммарную мощность дозы $D$ в центре защищаемой области вычисляют по формуле

$$D = D_н + D_\gamma, \qquad (15)$$

где $D_н$ — мощность дозы нейтронного излучения;

$D_\gamma$ — мощность дозы гамма-излучения.

3.2.2. Мощность дозы нейтронного излучения $D_н$ вычисляют по формуле

$$D_н = \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sum_{i=1}^{23} K_н^i \, J_н^i(R), \qquad (16)$$

где $K_н^i$ — дозовые коэффициенты для нейтронного излучения, определяемые в соответствии с приложением 2.

3.2.3. Мощность дозы гамма-излучения $D_\gamma$ вычисляют по формуле

$$D_\gamma = \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sum_{j=1}^{13} K_\gamma^j \, J_\gamma^j(R), \qquad (17)$$

где $K_\gamma^j$ — дозовые коэффициенты для гамма-излучения, определяемые в соответствии с приложением 2.

3.3. Алгоритм минимизации массы защиты

3.3.1. Задают начальные значения толщин слоев $X_j^{(0)}, j = 1, ... n$, образующие вектор $\mathbf{X}^{(0)} = \{X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, ..., X_n^{(0)}\}^T$.

3.3.2. Вспомогательные наборы толщин $\mathbf{X}_i^{(0)}$, $i = 1, ..., n+1$ получают по формуле

$$\mathbf{X}_i^{(0)} = \mathbf{X}^{(0)} + q_i, \; i = 1, ..., n+1, \qquad (18)$$

где $q_i$ — в соответствии с приложением 4 вектор-столбец, составляющие которого — элементы $i$-го столбца матрицы $\widehat{Q}$.

3.3.3. Устанавливают счетчик числа полностью законченных этапов оптимизации $k=0$.

3.3.4. Для каждого вектора $\mathbf{X}_i^{(k)}$, $i=1, ..., n+1$ вычисляют вспомогательную функцию $G_i^{(k)}$, $i=1, ..., n+1$, характеризующую степень нарушения ограничений, по формуле

$$G_i^{(k)}=Z^{(k)}+T_i^{(k)}, \quad i=1, ..., n+1, \tag{19}$$

где $Z^{(k)}$ — критерий поиска, вычисляемый в соответствии с приложением 4;

$T_i^{(k)}$ — квадратичный функционал, вычисляемый в соответствии с приложением 4.

3.3.5. Если все $G_i^{(k)}$, $i=1, ..., n+1$ больше нуля, то переходят к вычислениям по п. 3.3.15. Если хотя бы одно значение $G_i^{(k)}$ меньше нуля, то переходят к вычислениям по п. 3.3.6.

3.3.6. Максимальное ($T_{\max}^{(k)}$) и минимальное ($T_{\min}^{(k)}$) значения функции $T$ вычисляют по формулам:

$$T_{\max}^{(k)} \equiv T(\mathbf{X}_H^{(k)})=\max\{T(\mathbf{X}_1^{(k)}), ..., T(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\},$$

$$T_{\min}^{(k)} \equiv T(\mathbf{X}_L^{(k)})=\min\{T(\mathbf{X}_1^{(k)}), ..., T(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\}. \tag{20}$$

3.3.7. Компоненты вектора $\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+2,j}^{(k)}=\frac{1}{n}\left[\left(\sum_{i=1}^{n+1} X_{i,j}^{(k)}\right)-X_{H,j}^{(k)}\right], \tag{21}$$

где $j=1; ..., n$.

3.3.8. *Устанавливают счетчик $k'$ этапов оптимизации функции $T$.* В пп. 3.3.9—3.3.14 счетчик $k$ полностью законченных этапов оптимизации фиксирован.

3.3.9. Значения функции $G_i^{(k')}$ для всех $i=1, 2, ..., n+1$ вычисляют по формуле

$$G_i^{(k')}=Z^{(k')}-T(\mathbf{X}_i^{(k')}), \quad i=1,2, ..., n+1. \tag{22}$$

Если для всех $i=1, 2, ..., n+1$ $G_i^{(k')}$ больше нуля, то оптимизация функции $T$ закончена и переходят к вычислениям по п. 3.3.15 со значением счетчика полностью законченных этапов оптимизации $k$. Если хотя бы одно значение $G_i^{(k')}$ меньше нуля, то переходят к вычислениям по п. 3.3.10.

3.3.10. Вектор $\mathbf{X}_{n+3}^{(k')}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+3}^{(k')}=\mathbf{X}_{n+2}^{(k')}+2(\mathbf{X}_{n+2}^{(k')}-\mathbf{X}_H^{(k')}). \tag{23}$$

3.3.1.1. Если $T(\mathbf{X}_{n+3}^{(k')})>T(\mathbf{X}_L^{(k')})$, то переходят к вычислениям по п. 3.3.13;

если $T\ (\mathbf{X}_{n+3}^{(k')}) \leqslant T\ (\mathbf{X}_L^{(k')})$, то вектор $\mathbf{X}_{n+4}^{(k')}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+4}^{(k')}=\mathbf{X}_{n+2}^{(k')}+2(\mathbf{X}_{n+3}^{(k')}-\mathbf{X}_{n+2}^{(k')}). \tag{24}$$

3.3.12. Если $T\ (\mathbf{X}_{n+4}^{(k')}) < T\ (\mathbf{X}_L^{(k')})$, то вектор $\mathbf{X}_H^{(k')}$ заменяют вектором $\mathbf{X}_{n+4}^{(k')}$ и алгоритм повторяется с п. 3.3.9 при новом значении счетчика $k'=k'+1$;

если $T(\mathbf{X}_{n+4}^{(k')}) \geqslant T\ (\mathbf{X}_L^{(k')})$, то вектор $\mathbf{X}_H^{(k')}$ заменяют вектором $\mathbf{X}_{n+3}^{(k')}$ и алгоритм повторяется с п. 3.3.9 при новом значении счетчика $k'=k'+1$.

3.3.13. Если $T\ (\mathbf{X}_{n+3}^{(k')}) > T\ (\mathbf{X}_i^{(k')})$ для всех $i \neq h$, то вектор $\mathbf{X}_{n+5}^{(k')}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+5}^{(k')}=\mathbf{X}_{n+2}^{(k')}+0{,}5(\mathbf{X}_H^{(k')}-\mathbf{X}_{n+2}^{(k')}). \tag{25}$$

заменяют $\mathbf{X}_H^{(k')}$ на $\mathbf{X}_{n+5}^{(k')}$ и повторяют алгоритм, начиная с п. 3.3.9 при новом значении счетчика $k'=k'+1$.

3.3.14. Если $T\ (\mathbf{X}_{n+3}^{(k')}) > T\ (\mathbf{X}_H^{(k')})$, то все векторы для $i=1, \ldots, n+1$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_i^{(k')}=\mathbf{X}_L^{(k')}+0{,}5(\mathbf{X}_i^{(k')}+\mathbf{X}_L^{(k')}) \tag{26}$$

и переходят к вычислениям по п. 3.3.9 при $k'=k'+1$.

3.3.15. Вычисляют значения массы защиты $m\ (\mathbf{X}_i^{(k)})$ для всех наборов толщин слоев $i=1, \ldots, n+1$ по формуле (1).

3.3.16. Максимальное и минимальное значения массы защиты вычисляют по формулам:

$$m(\mathbf{X}_H^{(k)})=\max\{m(\mathbf{X}_1^{(k)}), \ldots, m(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\},$$
$$m(\mathbf{X}_L^{(k)})=\min\{m(\mathbf{X}_1^{(k)}), \ldots, m(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\}. \tag{27}$$

3.3.17. Компоненты вектора $\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+2,j}^{(k)}=\frac{1}{n}\left[\left(\sum_{i=1}^{n+1} X_{i,j}^{(k)}\right)-X_{H,j}^{(k)}\right], \tag{28}$$

где $j=1, \ldots, n$.

3.3.18. Вектор $\mathbf{X}_{n+3}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+3}^{(k)}=\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}+2(\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}-\mathbf{X}_H^{(k)}). \tag{29}$$

3.3.19. Если $m\ (\mathbf{X}_{n+3}^{(k)}) > m\ (\mathbf{X}_L^{(k)})$, то переходят к вычислениям по п. 3.3.21; если $m\ (\mathbf{X}_{n+3}^{(k)}) \leqslant m\ (\mathbf{X}_L^{(k)})$, то вектор $\mathbf{X}_{n+4}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+4}^{(k)}=\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}+2(\mathbf{X}_{n+3}^{(k)}-\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}). \tag{30}$$

3.3.20. Если $m\ (\mathbf{X}_{n+4}^{(k)}) < m\ (\mathbf{X}_L^{(k)})$, то вектор $\mathbf{X}_H^{(k)}$ заменяют вектором $\mathbf{X}_{n+4}^{(k)}$ и выполнение алгоритма повторяют, начи-

ная с п. 3.3.3 при новом значении счетчика $k=k+1$. Если $m\ (\mathbf{X}_{n+4}^{(k)})\geqslant m\ (\mathbf{X}_L^{(k)})$, то вектор $\mathbf{X}_H^{(k)}$ заменяют вектором $\mathbf{X}_{n+3}^{(k)}$ и выполнение алгоритма повторяют, начиная с п. 3.3.3, при новом значении счетчика $k=k+1$.

3.3.21. Если $m\ (\mathbf{X}_{n+3}^{(k)})>m\ (\mathbf{X}_i^{(k)})$ для всех $i\neq H$, то вектор $\mathbf{X}_{n+5}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_{n+5}^{(k)}=\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}+0{,}5(\mathbf{X}_L^{(k)}-\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}). \tag{31}$$

заменяют $\mathbf{X}_H^{(k)}$ на $\mathbf{X}_{n+5}^{(k)}$ и повторяют выполнение алгоритма, начиная с п. 3.3.3, при новом значении счетчика $k=k+1$.

3.3.22. Если $m\ (\mathbf{X}_{n+3}^{(k)})>m(\mathbf{X}_H^{(k)})$, то все векторы для $i=1, \ldots, n+1$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{X}_i^{(k)}=\mathbf{X}_L^{(k)}+0{,}5(\mathbf{X}_i^{(k)}-\mathbf{X}_L^{(k)}) \tag{32}$$

и переходят к вычислениям по п. 3.3.9 при $k=k+1$.

**Константы, необходимые для расчета доз по инженерной методике**

| | Материал | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pb | W | Fe | LiH | $B_4C$ |
| $b_1$ | 0,004 | 0,425 | 0,1 | 0,0002 | — |
| $\beta_1$, $см^{-1}$ | 0,073 | —0,0167 | 0,101 | 0,105 | — |
| $b_2$ | 0 | 0,0373 | 0 | 0 | — |
| $\beta_2$, $см^{-1}$ | 0 | 0,121 | 0 | 0 | — |
| $a_н$ | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| $a_\gamma$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $\alpha_н$ | 0,194 | 0,194 | 0,194 | 0,194 | 0,194 |
| $\alpha_\gamma$ | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 |
| $\lambda_н$, $см^{-1}$ | 0,139 | 0,289 | 0,222 | 0,209 | 0.199 |
| $\mu_{1i}$, $см^{-1}$ | 0,536 | 0,889 | 0,318 | 0,00538 | 0,088 |
| $\mu^*_{i \Rightarrow k}$, $см^{-1}$ | | | | | |
| Pb | 0,470 | 0,472 | 0,507 | 0,495 | — |
| W | 0,772 | 0,770 | 0,820 | 0,812 | — |
| Fe | 0,272 | 0,260 | 0,237 | 0,320 | — |
| LiH | 0,0303 | 0,0279 | 0,0213 | 0,0388 | — |
| $B_4C$ | 0,0697 | 0,0643 | 0,0389 | 0,0869 | — |
| ρ, $г/см^3$ | 11,34 | 19,3 | 7,86 | 0,82 | 2,35 |

* Примечание. Индекс $i$ при коэффициенте $\mu$ обозначает материал слоя, в котором образуется вторичное гамма-излучение, индекс $j$ обозначает материал слоя, для которого выполняется расчет.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 2*
*Рекомендуемое*

## СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГРУПП, ДОЗОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ И СПЕКТРЫ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ МНОГОГРУППОВЫХ РАСЧЕТОВ

Таблица 1.

Характеристики для нейтронного излучения

| Номер энергетической группы $i$ | $E_i$, МэВ | $K_n^i$, $\frac{\text{мкбэр/с}}{1/\text{см}^2\cdot\text{с}}$ | $S_n^i$, $c^{-1}$ | Номер энергетической группы $i$ | $E_i$, МэВ | $K_n^i$, $\frac{\text{мкбэр/с}}{1/\text{см}^2\cdot\text{с}}$ | $S_n^i$, $c^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10,5 | 0,0417 | 0,0019 | 14 | 2,15—3* | 0,00134 | 0,0436 |
| 2 | 6,5 | 0,0378 | 0,0104 | 15 | 1,00—3 | 0,00137 | 0,0436 |
| 3 | 4,0 | 0,0360 | 0,0218 | 16 | 4,65—4 | 0,00138 | 0,0436 |
| 4 | 2,5 | 0,0360 | 0,0322 | 17 | 2,15—4 | 0,00139 | 0,0436 |
| 5 | 1,4 | 0,0378 | 0,0322 | 18 | 1,00—4 | 0,00137 | 0,0436 |
| 6 | 0,8 | 0,0261 | 0,0390 | 19 | 4,65—5 | 0,00132 | 0,0436 |
| 7 | 0,4 | 0,0185 | 0,0390 | 20 | 2,15—5 | 0,00116 | 0,0436 |
| 8 | 0,2 | 0,0102 | 0,0390 | 21 | 1,00—5 | 0,00110 | 0,0436 |
| 9 | 0,1 | 0,00630 | 0,0436 | 22 | 4,65—6 | 0,00107 | 0,0436 |
| 10 | 4,65—2 | 0,00341 | 0,0436 | 23 | 2,15—6 | 0,00105 | 0,0436 |
| 11 | 2,15—2 | 0,00203 | 0,0436 | 24 | 1,00—6 | 0,00105 | 0,0436 |
| 12 | 1,00—2 | 0,00140 | 0,0436 | 25 | 4,65—7 | 0,00104 | 0,0436 |
| 13 | 4,65—3 | 0,00128 | 0,0436 | 26 | 2,15—7 | 0,00104 | 0,0436 |

* Читать $2{,}15\cdot10^{-3}$ и т. д.

Таблица 2

Характеристики для гамма-излучения

| Номер энергетической группы $i$ | $E_i$ МэВ | $K_\gamma^i$, $\frac{\text{мкбэр/с}}{1/\text{см}^2\cdot\text{с}}$ | $S_\gamma^i$, $c^{-1}$ | Номер энергетической группы $i$ | $E_i$ МэВ | $K_\gamma^i$, $\frac{\text{мкбэр/с}}{1/\text{см}^2\cdot\text{с}}$ | $S_\gamma^i$ $c^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 11,0 | 0,00298 | 0 | 7 | 2,5 | 9,60—4 | 0,0821 |
| 2 | 9,0 | 0,00248 | 9,27—5 | 8 | 1,75 | 7,37—4 | 0,103 |
| 3 | 7,0 | 0,00206 | 1,08—3 | 9 | 1,25 | 5,35—4 | 0,237 |
| 4 | 5,5 | 0,00175 | 0,00384 | 10 | 0,75 | 3,12—4 | 0,281 |
| 5 | 4,5 | 0,00148 | 0,0143 | 11 | 0,35 | 1,33—4 | 0,161 |
| 6 | 3,5 | 0,00121 | 0,0386 | 12 | 0,15 | 6,36—5 | 0,0697 |
| | | | | 13 | 0,08 | 3,30—5 | 0,0088 |

*ПРИЛОЖЕНИЕ 3*
*Рекомендуемое*

## 1. РАСЧЕТ ГРУППОВОЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА И ТОКА

1.1. Структуру энергетических групп для нейтронного и гамма-излучений следует брать из справочника*.

1.2. Расчет групповых характеристик как нейтронного, так и гамма-излучений выполняют по единому алгоритму в каждой энергетической группе. Сначала выполняют расчет для нейтронного, затем для гамма-излучения.

1.3. Алгоритм расчета групповой плотности потока

1.3.1. Каждый слой защиты разбивают на равные интервалы. Рекомендуемые значения интервалов $\Delta r$:

1) для слоев Fe, W $\Delta r = 1$ см;
2) для слоев LiH, $CH_2$ $\Delta r = 2$ см;
3) для слоев $B_4C$ $\Delta r = 0{,}25$ см.

Границы интервалов нумеруют последовательно: $k = 0, 1, .., K$.

1.3.2. Фиксируют первую группу для нейтронов (счетчик $i = 1$).

1.3.3. Групповую плотность потока $\Phi^i$ в $i$-й группе в каждой точке $r_k$ представляют в виде суммы двух компонент

$$\Phi^i(r_k) \equiv \Phi_k^i = \bar{\Phi}_k^i + \varphi_k^i, \quad k = 0, \ldots, K, \tag{32}$$

где $k = 0, ..., K$.

Групповую плотность тока $J^i$ в $i$-й группе в каждой точке $r_k$ также представляют в виде суммы двух компонент

$$J^i(r_k) \equiv J_k^i = \bar{J}_k^i + \psi_k^i, \quad k = 0, \ldots, K \tag{33}$$

где $k = 0, ..., K$.

1.3.4. Компоненту $\bar{\Phi}_k^i$ вычисляют по формуле

$$\bar{\Phi}_k^i = \begin{cases} 0, & \text{если для } i\text{-й группы отсутствует падающее излучение;} \\ \left(\dfrac{R_0}{r_k}\right)^2 F \exp(-\tau') \end{cases} \tag{34}$$

где $F^i$ — групповая плотность потока излучения, падающего по нормали к внутренней поверхности защиты;

$$\tau' = \sum_{m=1}^{j-1} \Sigma_r^i(m) X_j + \Sigma_r^i(m)(r_k - r_{k,(j)}); \tag{35}$$

$$\Sigma_r^i(j) = \Sigma^i(j) - \Sigma_{s2}^{i \Rightarrow i}(j); \tag{36}$$

$\Sigma^i(j)$ — групповое сечение взаимодействия излучения с материалом $j$-го слоя;
$\Sigma_{s2}^{i \Rightarrow i}(j)$ — второй момент разложения внутригруппового сечения рассеяния для материала $j$-го слоя;
$r_{k,(j)}$ — координата внутренней поверхности $j$-го слоя.

Значения сечений $\Sigma^i(j)$ и $\Sigma_{s2}^{i \Rightarrow i}(j)$ рекомендуется брать из справочника (см. п. 1.1 настоящего приложения).

---

* Абагян Л. П., Базазянц Н. О., Николаев М. Н., Цибуля А. М. Групповые константы для расчета реакторов и защиты: Справочник. — М.: Энергоиздат, 1981.

1.3.5. *Расчет компонент* $\varphi_k^i$ *и* $\psi_k^i$

1.3.5.1. Для каждой точки $r_k$, $k=1, \ldots, K$ записывают систему уравнений

$$-\alpha_k^i\ \varphi_{k+1}^i+\beta_k^i\ \varphi_k^i-\gamma_k^i\ \varphi_{k-1}^i=\delta_k^i\,, \tag{37}$$

где $\alpha_k^i$, $\beta_k^i$, $\gamma_k^i$ — коэффициенты уравнений;

$\delta_k^i$ — правая часть уравнений.

1.3.5.2. Значения коэффициентов в точке $k=0$ вычисляют по формулам (групповые индексы фиксированы):

$$\alpha_0=\frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1}-$$

$$-\frac{B_2\left[\frac{\Sigma_0(1)\Delta r_1}{2P_1}\ \Sigma_1(1)\left(\frac{r_1}{R_0}\right)^2 A_1+\frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1}\right]}{B_2+B_1(r_1/r_0)^2}\,; \tag{38}$$

$$\beta_0=\frac{\Sigma_1(1)}{2}+\frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1}+$$

$$+\frac{B_2\left[\frac{\Sigma_0(1)\Delta r_1}{2P_1}\ \Sigma_1(1)A_2-\frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1}\right]}{B_2+B_1(r_1/r_0)^2}\,; \tag{39}$$

$$\gamma_0=0, \tag{40}$$

где $A_1=1-\Delta r_1/3r_1$; $B_1=1-\Delta r_1/3r_0$;

$A_2=1+\Delta r_1/3r_0$; $P=1+0{,}25\Sigma(1)\Sigma(1)(\Delta r)^2$;

$B_2=1+\Delta r_1/3r_1$; $\Sigma_0(1)=\Sigma^i(1)-\Sigma_{s0}^{i\Rightarrow i}(1)$;

$$\Sigma_1(1)=\Sigma^i(1)-\Sigma_{s1}^{i\Rightarrow i}(1);$$

значения $\Sigma_{s0}^{i\Rightarrow i}(1)$ и $\Sigma_{s1}^{i\Rightarrow i}(1)$ рекомендуется брать из справочника (см. п. 1.1 настоящего *приложения*).

1.3.5.3. Значения коэффициентов в точках $k=m$ внутри $j$-го слоя вычисляют по формулам:

$$\alpha_m=\frac{2P_j\Sigma_1(j)}{3\Delta r_j B_j^+}-$$

$$-\frac{B_2^+\Sigma_1(j)\left[\frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j}\ \Sigma_1(j)A_1^-\left(\frac{r_{m+1}}{r_m}\right)^2+\frac{2P_j}{3\Delta r_j B_1^+}\right]}{B_2^++B_1^+(r_{m+1}/r_m)^2}\,; \tag{41}$$

$$\beta_m=\frac{2P_j\Sigma_1(j)}{3\Delta r_j B_1^+}-$$

$$-\frac{B_2^+\Sigma_1(j)\left[\frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j}\ \Sigma_1(j)A_2^+-\frac{2}{3}\ \frac{P_j}{3\Delta r_j\ B_1^+}\right]}{B_2^++B_1^+(r_{m+1}/r_m)^2}+$$

$$+\frac{B_1\Sigma_1(j)\left[\frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j}\ \Sigma_1(j)A_1\left(\frac{r_m}{r_{m+1}}\right)^3+\frac{2P_j}{3\Delta r_j\ B_1}\right]}{B_2+B_1(r_m/r_{m-1})^2}\,; \tag{42}$$

$$\gamma_m = \frac{B_1\Sigma_1(j)\left[\frac{2P_j}{3\Delta r_j B_1} - \frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j}\Sigma_1(j)A_2\right]}{B_2+B_1(r_m/r_{m-1})^2}, \quad (43)$$

где $A_1=1-\Delta r_j/3r_m$; $B_1=1-\Delta r_j/3r_{m-1}$;

$A_2=1+\Delta r_j/3r_{m-1}$; $B_2=1+\Delta r_j/3r_m$;

$A_1^+=1-\Delta r_j/3r_{m+1}$; $B_1^+=1-\Delta r_j/3r_m$;

$A_2^+=1+\Delta r_j/3r_m$; $B_2^+=1+\Delta r_j/3r_{m+1}$;

$P_j=1+0{,}25\Sigma_0(j)\Sigma_1(j)(\Delta r_j)^2$.

1.3.5.4. Значения коэффициентов в точках $k=m$ на границах слоев $j$ и $j+1$ вычисляют по формулам:

$$\alpha_m = \frac{2P_{j+1}\Sigma_1(j)}{3\Delta r_{j+1}B_1^+} - \frac{B_2^+\Sigma_1(j)\left[\frac{\Sigma_0(j+1)\Delta r_{j+1}}{2P_{j+1}}\Sigma_1(j+1)A_1^+\left(\frac{r_{m+1}}{r_m}\right)^2 + \frac{2P_{j+1}}{3\Delta r_{j+1}B_1^+}\right]}{B_2^+ + B_1^+(r_{m+1}/r_m)^2}; \quad (44)$$

$$\beta_m = \frac{2P_{j+1}\Sigma_1(j)}{3\Delta r_{j+1}B_1^+} + \frac{B_2^+\Sigma_1(j)\left[\frac{\Sigma_0(j+1)\Delta r_{j+1}}{2P_{j+1}}\Sigma_1(j+1)A_2^+ - \frac{2P_{j+1}}{3\Delta r_{j+1}B_1^+}\right]}{B_2^+ + B_1^+(r_{m+1}/r_m)^2} + \frac{B_1\Sigma_1(j+1)\left[\frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j}\Sigma_1(j)A_1\left(\frac{r_m}{r_{m-1}}\right)^2 + \frac{2P_j}{3\Delta r_j B_1}\right]}{B_2+B_1(r_m/r_{m-1})^2}; \quad (45)$$

$$\gamma_m = \frac{B_1\Sigma_1(j+1)\left[\frac{2P_j}{3\Delta r_j B_1} - \frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j}\Sigma_1(j)A_2\right]}{B_2+B_1(r_m/r_{m-1})^2}, \quad (46)$$

где $A_1^+=1-\Delta r_{j+1}/3r_{m+1}$; $B_1^+=1-\Delta r_{j+1}/3r_m$;

$A_2^+=1+\Delta r_{j+1}/3r_m$; $B_2^+=1+\Delta r_{j+1}/3r_{m+1}$;

$P_{j+1}=1+0{,}25\Sigma_0(j+1)\Sigma_1(j+1)(\Delta r_{j+1})^2$.

1.3.5.5. Значения коэффициентов в точке $k=K$ вычисляют по формулам.

$$\alpha_K = 0; \quad (47)$$

$$\beta_K = \frac{\Sigma_1(n)}{2} + \frac{\frac{2P_n}{3\Delta r_n} + \frac{\Sigma_0(n)\Delta r_n}{2P_n}\Sigma_1(n)\left(\frac{r_k}{r_{k-1}}\right)^2 A_1B_1}{B_2+B_1(r_k/r_{K-1})^2}; \quad (48)$$

$$\gamma_K = \frac{2P_n}{3\Delta r_n} - \frac{\dfrac{\Sigma_0(n)\Delta r_n}{2P_n}\,\Sigma_1(n)A_2B_1}{B_2+B_1(r_k/r_{K-1})^2}\,, \qquad (49)$$

где $A_1 = 1 - \Delta r_n/3r_K$; $B_1 = 1 - \Delta r_n/3r_{K-1}$;
$A_2 = 1 + \Delta r_n/3r_{K-1}$; $B_2 = 1 + \Delta r_n/3r_K$.

1.3.5.6. Групповые значения нулевых моментов источника $f^i_{0,k}$ в точках $k=1, \ldots, K$ вычисляют по формулам:

1) при расчете нейтронного излучения

$$f^i_{0,k} = \sum_{m=1}^{i-1} \Sigma^{m\Rightarrow i}_{s0}(j)\Phi^m_k + [\Sigma^{i\Rightarrow i}_{s0}(j) - \Sigma^{i\Rightarrow i}_{s2}(j)]\bar{\Phi}^i_k\,; \qquad (50)$$

2) при расчете гамма-излучения

$$f^i_{0,k} = \sum_{m=1}^{i-1} \Sigma^{m\Rightarrow i}_{s0}(j)\Phi^m_k + [\Sigma^{i\Rightarrow i}_{s0}(j) - \Sigma^{i\Rightarrow i}_{s2}(j)]\bar{\Phi}^i_k + \sum_{m=1}^{23} \Sigma^m_{n\gamma}(j)\nu^{m\Rightarrow i}\Phi^m_{k(n)}\,. \qquad (51)$$

где $\Sigma^{m\Rightarrow i}_{s0}(j)$ — нулевой момент сечения перехода из группы $m$ в группу $i$ для материала $j$-го слоя;

$\Sigma^{i\Rightarrow i}_{s0}(j)$ — нулевой момент внутригруппового сечения рассеяния для материала $j$-го слоя;

$\Sigma^{i\Rightarrow i}_{s2}(j)$ — второй момент внутригруппового сечения рассеяния для материала $j$-го слоя;

$\Sigma^m_{n\gamma}(j)$ — сечение радиационного захвата нейтронов $m$-й группы для материала $j$-го слоя;

$\nu^{m\Rightarrow i}$ - выход гамма-излучения $i$-й группы при захвате нейтронов $m$-й группы;

$\Phi^m_{k(n)}$ — плотность потока нейтронов $m$-й группы в точке $k$.

Значения $\Sigma^{m\Rightarrow i}_{s0}$, $\Sigma^{i\Rightarrow i}_{s2}$, $\Sigma^m_{n\gamma}$ и $\nu^{m\Rightarrow i}$ рекомендуется брать из справочника (см. п. 1.1 настоящего приложения).

1.3.5.7. Групповые значения первых моментов источника $f^i_{1,k}$ в точках $k=1, \ldots, K$ вычисляют по формуле

$$f^i_{1,k} = \sum_{m=1}^{i-1} \Sigma^{m\Rightarrow i}_{s1}(j)J^m_k + [\Sigma^{i\Rightarrow i}_{s1}(j) - \Sigma^{i\Rightarrow i}_{s2}(j)]\bar{\Phi}^i_k\,, \qquad (52)$$

где $\Sigma^{m\Rightarrow i}_{s1}(j)$ — первый момент сечения перехода из группы $m$ в группу $i$ для материала $j$-го слоя.

Значение $\Sigma^{m\Rightarrow i}_{s1}$ рекомендуется брать из справочника (см. п. 1.1 настоящего приложения).

1.3.5.8. Значение правой части $\delta^i_k$ в точке $k=0$ вычисляют по формуле

$$\delta^i_k = \frac{\left[\dfrac{F^i_0\Sigma_1(1)}{P_1r_0^2} + \dfrac{2F^i_1}{\Delta r_1 B_1}\right]B_2}{B_2+B_1(r_1/r_0)^2} - \frac{2F^i_1}{B_1\Delta r_1}\,, \qquad (53)$$

где $F_0^i = \frac{1}{6}\ (f^i_{0,0}+f^i_{0,1})(r_1^3-r_0^3)+\ \frac{\Sigma_0(1)(\Delta r_1)^2}{4}\ (f^i_{1,1}\,r_1^2-f^i_{1,0}\,r_0^2);$ (54)

$$F_1^i = \frac{1}{2}\ (f^i_{1,0}+f^i_{1,1})(r_1-r_0)+\ \frac{\Sigma_1(1)(\Delta r_1)^2}{12}\ (f^i_{0,1}-f^i_{0,0}). \qquad (55)$$

1.3.5.9. Значения правой части $\delta_k^i$ в точках $k=m$ внутри $j$-го слоя вычисляют по формулам:

$$\delta_k^i = \frac{B_1^+\Sigma_1(j)\left[\dfrac{F_0^{i+}\Sigma_1(j)}{P_j r_m^2}+\dfrac{2F_1^{i+}}{\Delta r_j\ B_1^+}\right]}{B_2^+ + B_1^+(r_{m+1}/r_m)^2}+$$

$$+\ \frac{B_1\Sigma_1(j)\left[\dfrac{F_0^{i-}\Sigma_1(j)}{P_j r_{m-1}}+\dfrac{2F_1^{i-}}{\Delta r_j\ B_1}\right]}{B_2+B_1(r_m/r_{m-1})^2}-\frac{2F_1^{i+}\Sigma_1(j)}{\Delta r_j\ B_1^+}, \qquad (56)$$

где $F_0^{i+} = \frac{1}{6}\ (f^i_{0,m}+f^i_{0,m+1})(r^3_{m+1}-r^3_m)+$

$$+\ \frac{\Sigma_0(j)(\Delta r_j)^2}{4}\ (f^i_{1,m+1}\,r^2_{m+1}-r^i_{1,m}\,r^2_m); \qquad (57)$$

$$F_1^{i+} = \frac{1}{2}\ (f^i_{1,m}+f^i_{1,m+1})(r_{m+1}-r_m)+$$

$$+\ \frac{\Sigma_1(j)(\Delta r_j)^2}{12}\ (f^i_{0,m+1}-f^i_{0,m}); \qquad (58)$$

$$F_0^{i-} = \frac{1}{6}\ (f^i_{0,m-1}+f^i_{0,m})(r_m^3-r^3_{m-1})+$$

$$+\ \frac{\Sigma_0(j)(\Delta r_j)^2}{4}\ (f^i_{1,m}\,r^2_m-f^i_{1,m-1}\,r^2_{m-1}); \qquad (59)$$

$$F_1^{i-} = \frac{1}{2}\ (f^i_{1,m-1}+f^i_{1,m})(r_m-r_{m-1})+$$

$$+\ \frac{\Sigma_1(j)(\Delta r_j)^2}{12}\ (f^i_{0,m}-f^i_{0,m-1}). \qquad (60)$$

1.3.5.10. Значения правой части $\delta_k^i$ в точках $k=m$ на границах слоев $j$, $j+1$ вычисляют по формулам:

$$\delta_m^i = \frac{B_1^+\Sigma_1(j)\left[\dfrac{F_0^{i+}\Sigma_1(j+1)}{P_{j+1}\,r_m^2}+\dfrac{2F_1^{i+}}{\Delta r_{j+1}\ B_1^+}\right]}{B_2^+ + B_1^+(r_{m+1}/r_m)^2}+$$

$$+\ \frac{B_1\Sigma_1(j+1)\left[\dfrac{F_0^{i-}\Sigma_1(j)}{P_j r_{m-1}^2}+\dfrac{2F_1^{i-}}{\Delta r_j\ B_1}\right]}{B_2+B_1(r_m/r_{m-1})^2}-\frac{2F_1^{i+}\Sigma_1(j)}{\Delta r_{j+1}\ B_1^+}, \qquad (61)$$

где $F_0^{i+} = \frac{1}{6}\ (f^i_{0,m}+f^i_{0,m+1})(r^3_{m+1}-r^3_m)+$

$$+\frac{\Sigma_0(j+1)(\Delta r_{j+1})^2}{4}(f^i_{1,m+1}\,r^2_{m+1}-f^i_{1,m}\,r^2_m); \tag{62}$$

$$F_1^{i+}=\frac{1}{2}(f^i_{1,m}+f^i_{1,m+1})(r_{m+1}-r_m)+$$

$$+\frac{\Sigma_1(j+1)(\Delta r_{j+1})^2}{12}(f^i_{0,m+1}-f^i_{0,m}), \tag{63}$$

значения $F_\delta^{i-}$ и $F_j^{i-}$ вычисляют по формулам (59) и (60) соответственно.

1.3.5.11. Значения правой части $\delta^i_K$ в точке $k=K$ вычисляют по формуле

$$\delta^i_K=\frac{B_1\left[\dfrac{F_0^{i-}\Sigma_1(n)}{P_n r^2_{K-1}}+\dfrac{2F_1^{i-}}{\Delta r_n B_1}\right]}{B_2+B_1(r_K/r_{K-1})^2}. \tag{64}$$

1.3.5.12. Значения вспомогательных величин $E^i_k$, $k=0, \ldots, K$ вычисляют по формуле

$$E^i_k=\begin{cases}\alpha^i_0(\beta^i_0)^{-1}, & k=0;\\ \alpha^i_k(\beta^i_k-\gamma^i_k\,E^i_{k-1})^{-1}, & 1\leqslant k\leqslant K.\end{cases} \tag{65}$$

1.3.5.13. Значения вспомогательных величин $G^i_k$, $k=0, \ldots K$ вычисляют по формуле

$$G^i_k=\begin{cases}\delta^i_0(\beta^i_0)^{-1}, & k=0;\\ (\delta^i_k+\gamma^i_k\,G^i_{k-1})(\beta^i_k-\gamma^i_k\,E^i_{k-1})^{-1}, & 1\leqslant k\leqslant K.\end{cases} \tag{66}$$

1.3.5.14. Значения компоненты $\varphi^i_k$ вычисляют по формуле

$$\varphi^i_k=\begin{cases}E^i_k\,\varphi_{k+1}+G^i_k, & 0\leqslant k<K;\\ G^i_k, & k=K.\end{cases} \tag{67}$$

1.3.5.15. Значения компоненты $\psi^i_k$ в точках $k=1, \ldots, K$ вычисляют по формуле

$$\psi^i_k=\frac{F_0^i-\dfrac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2}(r^2_k\,\varphi^i_k A_1+r^2_{k-1}\varphi_k A_2)}{P_j(r^2_k+r^2_{k-1}B_2/B_1)}+$$

$$+\frac{\dfrac{r_{k-1}}{B_1}\left\{\dfrac{2}{\Sigma_1(j)\Delta r_j}\left[F_1^{i-}-\dfrac{1}{3}P_j(\varphi^i_k+\varphi^i_{k-1})\right]\right\}}{r^2_k+r^2_{k-1}B_2/B_1}. \tag{68}$$

1.3.5.16. Значение компоненты $\psi^i_k$ в точке $k=0$ вычисляют по формуле

$$\psi^i_0=-\frac{1}{2}\varphi^i_0. \tag{69}$$

1.3.5.17. Значение компоненты $\psi^i_k$ в точке $k=K$ вычисляют по формуле

$$\psi^i_K=\frac{1}{2}\varphi^i_K. \tag{70}$$

1.3.6. По формулам (32) и (33) вычисляют групповую плотность потока $\Phi_k$ и тока $J_k^i$ соответственно.

1.3.7. Если $i \neq 26$ (для нейтронного излучения) или $i \neq 13$ (для гамма-излучения), то счетчик групп «$i$» увеличивают на 1 и переходят к вычислениям по п. 1.3.3.

1.3.8. Алгоритм с п. 1.3.3 до п. 1.3.7 повторяют дважды: для нейтронного излучения и гамма-излучения.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 4*
*Обязательное*

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ АЛГОРИТМА МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ ЗАЩИТЫ

### 1. Вычисление элементов вспомогательной матрицы $\widehat{Q}$

Элементы матрицы

$$\widehat{\mathrm{Q}} = \begin{bmatrix} 0 & d_1 & d_2 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_1 & \dots & d_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_1 \end{bmatrix} \tag{71}$$

$d_1$ и $d_2$ вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{t}{n\sqrt{2}} \left(\sqrt{n+1}+n-1\right); \\ d_2 &= \frac{t}{n\sqrt{2}} \left(\sqrt{n+1}-1\right), \end{aligned} \tag{72}$$

где $n$ — число слоев защиты;

$t = 0{,}1 \min\limits_j \{\mathrm{X}_j^{(0)}\}$, $j = 1, \dots, n$ — начальное значение шага минимизации.

### 2. Вычисление критерия поиска $Z^{(k)}$

2.1. Вычисление компонентов вектора $\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}$.

Компоненты вектора $\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$\mathrm{X}_{n+2,j}^{(k)} = \frac{1}{n}\left[\left(\sum_{i=1}^{n+1} \mathrm{X}_{i,j}^{(k)}\right) - \mathrm{X}_{H,j}^{(k)}\right], \quad j = 1, \dots, n. \tag{74}$$

2.2. Вычисление нормы векторов

Норму $N_i^{(k)}$ векторов $\mathbf{X}_i^{(k)}$ и $\mathbf{X}_{n+2}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$N_i^{(k)} = \mathbf{X}_i^{(k)} - \mathbf{X}_{n+2}^{(k)} = \left[\sum_{j=1}^{n} \left(\mathrm{X}_{i,j}^{(k)} - \mathrm{X}_{n+2,j}^{(k)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{75}$$

$i = 1, \dots, n+1.$

2.3. Вычисление значения критерия поиска

Значение критерия поиска $Z^{(k)}$ на $k$-м этапе оптимизации вычисляют по формуле

$$Z^{(k)}=\begin{cases} 2t, & k=0 \\ \min\left\{ Z^{(k-1)}, \dfrac{1}{n+1}\sum\limits_{i=1}^{n+1} N_i^{(k)} \right. \end{cases} \tag{76}$$

## 3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ $T_i^{(k)}$

Значения функций $T_i^{(k)}$, $i=1, \ldots, n+1$ на $k$-м этапе минимизации вычисляют по формуле

$$T_i^{(k)} \equiv T(\mathbf{X}_i^{(k)}) = \left\{ U_{i,D} \left[ \frac{\widetilde{D}-D(\mathbf{X}_i^{(k)})}{\widetilde{D}} \right] + \sum_{j=1}^{n} U_{i,j} \left[ \frac{X_{i,j}^{(k)}-\widetilde{X}_j}{\widetilde{X}_j} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \tag{77}$$

где $D(\mathbf{X}_i^{(k)})$ — мощность дозы на поверхности защищаемого объема, определяемая набором толщин слоев $\mathbf{X}_i^{(k)}$,

$$\mathbf{X}^{(k)}=\{X_{i,1}^{(k)}, X_{i,2}^{(k)}, \ldots, X_{i,n}^{(k)}\};$$

$\widetilde{D}$ — ограничение на мощность дозы;

$X_{i,j}^{(k)}$ — толщина $j$-го слоя в $i$-м наборе толщин слоев;

$\widetilde{X}_j$ — ограничение на толщину $j$-го слоя;

$$U_{i,D}=\begin{cases} 0 \text{ при } D(\mathbf{X}_i^{(k)})<\widetilde{D} \\ 1 \text{ при } D(\mathbf{X}_i^{(k)})\geqslant\widetilde{D} \end{cases}; \tag{78}$$

$$U_{i,j}=\begin{cases} 0 \text{ при } X_{i,j}^{(k)}\geqslant\widetilde{X}_j \\ 1 \text{ при } X_{i,j}<\widetilde{X}_j \end{cases}. \tag{79}$$

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

**1. РАЗРАБОТЧИКИ:**

**А. А. Дубинин**, канд. техн. наук; **Ю. А. Кураченко**, канд. физ.-мат. наук; **П. Ф. Курочка**; **В. М. Сахаров**, канд. физ.-мат.-наук; **И. А. Осипьянц**; **В. А. Панин**; **И. М. Овсянникова**

**2. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ** Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 30.04.91 № 619

**3. Срок проверки — 1996 г., периодичность проверок — 5 лет**

**4. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ**

gost.e-ecolog.ru