

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

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^{1/8} Бумага типографская
№ 2, Гарнитура литературная. Печать высокая 1,25 усл. п. л. 1,5 усл. кр.-отг. 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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИАЦИОННАЯ ЭКИПАЖА
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В КОСМИЧЕСКОМ
ПОЛЕТЕ

РД

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

50—25645.225—91

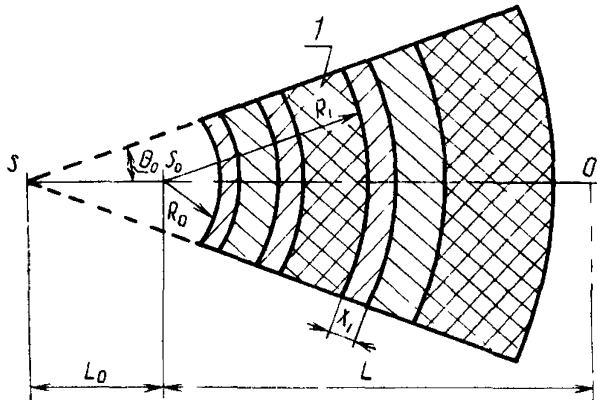
ОКСТУ 6968

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.



l — осевое сечение теневой защиты S — вершина конической поверхности S_0 — центр сферических слоев в который помещен точечный изотропный источник R_i , $i=0, 1, \dots, n$ — 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

1.2. Ядерный реактор моделируется точечным изотропным источником излучений, 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 методики, 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) λ_l — длина релаксации дозы нейтронного излучения, энергия которого больше 2,5 МэВ;

2) μ_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) β_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_i — коэффициенты для учета поглощения дозы нейтронного и гамма-излучений в защищаемой области, входящие в формулы в качестве множителей;

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

7) ρ_i — 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 $m(\mathbf{X})$, $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_n\}$ вычисляют по формуле

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

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_n , мощности дозы гамма-излучения реактора $D_{\gamma 1}$ и мощности дозы вторичного гамма-излучения из защиты $D_{\gamma 2}$

$$D = D_n + D_{\gamma 1} + D_{\gamma 2}. \quad (2)$$

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

$$D_n = D_{0n} a_n \exp \left[- (1 - \alpha_n) \sum_{i=1}^n X_i \lambda_i \right], \quad (3)$$

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

$a_n \exp[\alpha_n \sum X_i / \lambda_i]$ — множитель, учитывающий соотношение дозы на поверхности защиты и в защищаемой области.

2.2.4. Мощность дозы гамма-излучения реактора вычисляют по формуле

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

где μ_{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

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

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 dm/dX_i вычисляют по формуле

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

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

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

$$\frac{d\gamma}{dX_i} = \frac{dD_n}{dX_i} + \frac{dD_{\gamma 1}}{dX_i} + \frac{dD_{\gamma 2}}{dX_i}. \quad (7)$$

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

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

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
 $\alpha_2 \equiv \alpha_n$.

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

$$\frac{dD_{\gamma 2}}{dX_i} = D_{0n} \exp \left[- \sum_{k=1}^i \frac{X_k}{\lambda_k} - (1 - \alpha_{\gamma 2}) \sum_{k=i+1}^n \mu_i \Rightarrow kX_k \right] \cdot \left\{ [b_{1i} \beta_{1i} \exp(\beta_{1i} X_i) + b_{2i} \beta_{2i} \exp(\beta_{2i} X_i)] + \sum_{k=1}^{i-1} (1 - \alpha_{\gamma 2}) \mu_i \Rightarrow k \delta_k - \sum_{k=i}^n \frac{\delta_k}{\lambda_k} \right\}. \quad (9)$$

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 ΔX_i^q по формуле

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

2.4.5. Вычисляют значения толщин $X_i^{q+1} = X_i^q + \Delta X_i^q$, $i=1, \dots, n$, 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 $\left| \frac{D^{(q+1)} - D_0}{D_0} \right| \leq 0,05$, 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 $\tilde{\Delta X}_i^q$ по формуле

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

2.4.9. Принимают $X_i^{q+1} = X_i^q + \Delta X_i^q$, $i = 1, \dots, n$ 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 $m^{(q+1)} \leq m^{(q)}$ и выполняется условие $|(D^{(q+1)} - D_0)/D_0| \leq 0,01$, то выполняют вычисления по пп. 2.4.3—2.4.6, изменив индекс $q=2$ и т. д.; если $m^{(q+1)} > m^{(q)}$, то уменьшают значение Δm 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

$$\begin{aligned} \left| \frac{D^{(k+1)} - D_0}{D_0} \right| &\leq 0,05; \\ \left| \frac{X_i^{k+1} - X_i^k}{X_i^k} \right| &\leq 0,01, \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

где $i = 1, \dots, 26$;

$E_{i-1}^{(n)}$ — 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

$$F^{(v)} = \int_{E_{j-1}^{(v)}}^{E_j^{(v)}} S^{(v)}(E) dE (E_{j-1}^{(v)} - E_j^{(v)}), \quad (14)$$

где $j=1, \dots, 13$;

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

$E_j^{(v)}$ — 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

$$D = D_n + D_\gamma, \quad (15)$$

где D_n — мощность дозы нейтронного излучения;

D_γ — мощность дозы гамма-излучения.

3.2.2. Мощность дозы нейтронного излучения D_n вычисляют по формуле

$$D_n = \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sum_{i=1}^{23} K_n^i J_n^i(R), \quad (16)$$

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

3.2.3. Мощность дозы гамма-излучения D_γ вычисляют по формуле

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

где K_γ^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 $X_j^{(0)}, j=1, \dots, n$, образующие вектор $\mathbf{X}^{(0)} = \{X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_n^{(0)}\}^T$.

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

$$\mathbf{X}_i^{(0)} = \mathbf{X}^{(0)} + q_i, \quad i=1, \dots, n+1, \quad (18)$$

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

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

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

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

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 $G_i^{(k)}$, $i=1, \dots, n+1$ 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:

$$\begin{aligned} T_{\max}^{(k)} &\equiv T(\mathbf{X}_H^{(k)}) = \max \{T(\mathbf{X}_1^{(k)}), \dots, T(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\}, \\ T_{\min}^{(k)} &\equiv T(\mathbf{X}_L^{(k)}) = \min \{T(\mathbf{X}_1^{(k)}), \dots, T(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\}. \end{aligned} \quad (20)$$

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

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

где $j=1; \dots, n$.

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 $i=1, 2, \dots, n+1$ вычисляют по формуле

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

Если для всех $i=1, 2, \dots, n+1$ $G_i^{(k')}$ 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

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

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

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

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 $T(\mathbf{X}_{n+4}^{(k')}) \geq T(\mathbf{X}_L^{(k')})$, 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

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

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 $i = 1, \dots, n+1$ вычисляют по формуле

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

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 $i = 1, \dots, n+1$ по формуле (1).

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

$$\begin{aligned} m(\mathbf{X}_H^{(k)}) &= \max \{m(\mathbf{X}_1^{(k)}), \dots, m(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\}, \\ m(\mathbf{X}_L^{(k)}) &= \min \{m(\mathbf{X}_1^{(k)}), \dots, m(\mathbf{X}_{n+1}^{(k)})\}. \end{aligned} \quad (27)$$

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

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

где $j = 1, \dots, n$.

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

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

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 $m(\mathbf{X}_{n+3}^{(k)}) \leq m(\mathbf{X}_L^{(k)})$, то вектор $\mathbf{X}_{n+4}^{(k)}$ вычисляют по формуле

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

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 $m(\mathbf{X}_{n+4}^{(k)}) \geq m(\mathbf{X}_L^{(k)})$, 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

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

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 $i=1, \dots, n+1$ вычисляют по формуле

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

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 ₄ C
b_1	0,004	0,425	0,1	0,0002	—
$\beta_1, \text{см}^{-1}$	0,073	—0,0167	0,101	0,105	—
b_2	0	0,0373	0	0	—
$\beta_2, \text{см}^{-1}$	0	0,121	0	0	—
a_{H}	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
a_{γ}	1	1	1	1	1
α_{H}	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194
α_{γ}	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
$\lambda_{\text{H}}, \text{см}^{-1}$	0,139	0,289	0,222	0,209	0,199
$\mu_{1i}, \text{см}^{-1}$	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 ₄ C	0,0697	0,0643	0,0389	0,0869	—
$\rho, \text{г/см}^3$	11,34	19,3	7,86	0,82	2,35

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

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 , мкбэп/с / $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	S_n^i , с^{-1}	Номер энергетической группы i	E_i , МэВ	K_n^i , мкбэп/с / $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	S_n^i , с^{-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 $2,15 \cdot 10^{-3}$ и т. д.

Таблица 2

Характеристики для гамма-излучения

Номер энергетической группы i	E_i МэВ	K_γ^i , мкбэп/с / $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	S_γ^i , с^{-1}	Номер энергетической группы i	E_i МэВ	K_γ^i , мкбэп/с / $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	S_γ^i , с^{-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

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 Δr :

- 1) для слоев Fe, W $\Delta r = 1$ см;
- 2) для слоев LiH, CH₂ $\Delta r = 2$ см;
- 3) для слоев В₄С $\Delta r = 0,25$ см.

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

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

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

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

где $k=0, \dots, K$.

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

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

где $k=0, \dots, K$.

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

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

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

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

$$\Sigma_r^i(j) = \Sigma^i(j) - \Sigma_{s2}^{i \Rightarrow i}(j); \quad (33)$$

$\Sigma^i(j)$ — 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).

* Абаган 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 φ_k^i и Ψ_k^i

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

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

где α_k^i , β_k^i , γ_k^i — коэффициенты уравнений;

δ_k^i — правая часть уравнений.

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

$$\sigma_0 = \frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1} - \frac{B_2 \left[\frac{\Sigma_0(1)\Delta r_1}{2P_1} \Sigma_1(1) \left(\frac{r_1}{R_0} \right)^2 A_1 + \frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1} \right]}{B_2 + B_1 (r_1/r_0)^2}; \quad (38)$$

$$\beta_0 = \frac{\Sigma_1(1)}{2} + \frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1} + \frac{B_2 \left[\frac{\Sigma_2(1)\Delta r_1}{2P_1} \Sigma_1(1) A_2 - \frac{2P_1}{3\Delta r_1 B_1} \right]}{B_2 + B_1 (r_1/r_0)^2}; \quad (39)$$

$$\gamma_0 = 0, \quad (40)$$

где $A_1 = 1 - \Delta r_1 / 3r_1$; $B_1 = 1 - \Delta r_1 / 3r_0$;
 $A_2 = 1 + \Delta r_1 / 3r_0$; $P = 1 + 0,25\Sigma(1)\Sigma(1)(\Delta r)^2$;
 $B_2 = 1 + \Delta r_1 / 3r_1$; $\Sigma_0(1) = \Sigma^i(1) - \Sigma_{s_0}^{i \Rightarrow i}(1)$;

$$\Sigma_1(1) = \Sigma^i(1) - \Sigma_{s_1}^{i \Rightarrow i}(1);$$

значения $\Sigma_{s_0}^{i \Rightarrow i}(1)$ и $\Sigma_{s_1}^{i \Rightarrow i}(1)$ 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:

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

$$\beta_m = \frac{2P_j \Sigma_1(j)}{3\Delta r_j B_1^+} - \frac{B_2^+ \Sigma_1(j) \left[\frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j} \Sigma_1(j) A_2^+ - \frac{2}{3} \frac{P_j}{3\Delta r_j B_1^+} \right]}{B_2^+ + B_1^+ (r_{m+1}/r_m)^2} + \frac{B_1 \Sigma_1(j) \left[\frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2P_j} \Sigma_1(j) A_1 \left(\frac{r_m}{r_{m+1}} \right)^2 + \frac{2P_j}{3\Delta r_j B_1} \right]}{B_2 + B_1 (r_m/r_{m-1})^2}; \quad (42)$$

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

$$\begin{aligned} \text{где } A_1 &= 1 - \Delta r_j / 3r_m; & B_1 &= 1 - \Delta r_j / 3r_{m-1}; \\ A_2 &= 1 + \Delta r_j / 3r_{m-1}; & B_2 &= 1 + \Delta r_j / 3r_m; \\ A_1^+ &= 1 - \Delta r_j / 3r_{m+1}; & B_1^+ &= 1 - \Delta r_j / 3r_m; \\ A_2^+ &= 1 + \Delta r_j / 3r_m; & B_2^+ &= 1 + \Delta r_j / 3r_{m+1}; \\ P_j &= 1 + 0,25\Sigma_0(j)\Sigma_1(j)(\Delta r_j)^2. \end{aligned}$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{где } A_1^+ &= 1 - \Delta r_{j+1} / 3r_{m+1}; & B_1^+ &= 1 - \Delta r_{j+1} / 3r_m; \\ A_2^+ &= 1 + \Delta r_{j+1} / 3r_m; & B_2^+ &= 1 + \Delta r_{j+1} / 3r_{m+1}; \\ P_{j+1} &= 1 + 0,25\Sigma_0(j+1)\Sigma_1(j+1)(\Delta r_{j+1})^2. \end{aligned}$$

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

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

$$\beta_K = \frac{\Sigma_1(n)}{2} + \frac{\frac{2P_n}{3\Delta r_n} + \frac{\Sigma_0(n)\Delta r_n}{2P_n} \Sigma_1(n) \left(\frac{r_K}{r_{K-1}} \right)^2 A_1 B_1}{B_2 + B_1 (r_K/r_{K-1})^2}; \quad (48)$$

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

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

1.3.5.6. Групповые значения нулевых моментов источника $f_{0,k}^i$ в точках $k=1, \dots, K$ вычисляются по формулам:

1) при расчете нейтронного излучения

$$f_{0,k}^i = \sum_{m=1}^{i-1} \Sigma_{s0}^{m \Rightarrow i}(j) \Phi_k^m + [\Sigma_{s0}^{i \Rightarrow i}(j) - \Sigma_{s2}^{i \Rightarrow i}(j)] \bar{\Phi}_k^i; \quad (50)$$

2) при расчете гамма-излучения

$$f_{0,k}^i = \sum_{m=1}^{i-1} \Sigma_{s0}^{m \Rightarrow i}(j) \Phi_k^m + [\Sigma_{s0}^{i \Rightarrow i}(j) - \Sigma_{s2}^{i \Rightarrow i}(j)] \bar{\Phi}_k^i + \\ + \sum_{m=1}^{23} \Sigma_{n\gamma}^m(j) \nu^{m \Rightarrow i} \Phi_{k(n)}^m. \quad (51)$$

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

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

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

$\Sigma_{n\gamma}^m(j)$ — 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;

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

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

1.3.5.7. Групповые значения первых моментов источника $f_{1,k}^i$ в точках $k=1, \dots, K$ вычисляются по формуле

$$f_{1,k}^i = \sum_{m=1}^{i-1} \Sigma_{s1}^{m \Rightarrow i}(j) J_k^m + [\Sigma_{s1}^{i \Rightarrow i}(j) - \Sigma_{s2}^{i \Rightarrow i}(j)] \bar{\Phi}_k^i, \quad (52)$$

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

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

1.3.5.8. Значение правой части δ_k^i в точке $k=0$ вычисляются по формуле

$$\delta_k^i = \frac{\left[\frac{F_0^i \Sigma_1(1)}{P_1 r_0^2} + \frac{2F_1^i}{\Delta r_1 B_1} \right] B_2}{B_2 + B_1(r_1/r_0)^2} - \frac{2F_1^i}{B_1 \Delta r_1}, \quad (53)$$

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

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

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

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

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

где $F_0^{i+} = \frac{1}{6} (f_{0,m}^i + f_{0,m+1}^i)(r_{m+1}^3 - r_m^3) +$

$$+ \frac{\Sigma_0(j)(\Delta r_j)^2}{4} (f_{1,m+1}^i r_{m+1}^2 - f_{1,m}^i r_m^2); \quad (57)$$

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

$$+ \frac{\Sigma_1(j)(\Delta r_j)^2}{12} (f_{0,m+1}^i - f_{0,m}^i); \quad (58)$$

$$F_0^{i-} = \frac{1}{6} (f_{0,m-1}^i + f_{0,m}^i)(r_m^3 - r_{m-1}^3) +$$

$$+ \frac{\Sigma_0(j)(\Delta r_j)^2}{4} (f_{1,m}^i r_m^2 - f_{1,m-1}^i r_{m-1}^2); \quad (59)$$

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

$$+ \frac{\Sigma_1(j)(\Delta r_j)^2}{12} (f_{0,m}^i - f_{0,m-1}^i). \quad (60)$$

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

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

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

где $F_0^{i+} = \frac{1}{6} (f_{0,m}^i + f_{0,m+1}^i)(r_{m+1}^3 - r_m^3) +$

$$+ \frac{\Sigma_0(j+1)(\Delta r_{j+1})^2}{4} (f_{1,m+1}^i r_{m+1}^2 - f_{1,m}^i r_m^2); \quad (62)$$

$$F_1^{i+} = \frac{1}{2} (f_{1,m}^i + f_{1,m+1}^i)(r_{m+1} - r_m) + \frac{\Sigma_1(j+1)(\Delta r_{j+1})^2}{12} (f_{0,m+1}^i - f_{0,m}^i), \quad (63)$$

значения F_0^{i-} и F_j^{i-} вычисляются по формулам (59) и (60) соответственно.

1.3.5.11. Значения правой части δ_K^i в точке $k=K$ вычисляются по формуле

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

1.3.5.12. Значения вспомогательных величин F_k^i , $k=0, \dots, K$ вычисляются по формуле

$$E_k^i = \begin{cases} \alpha_0^i (\beta_0^i)^{-1}, & k=0; \\ \alpha_k^i (\beta_k^i - \gamma_k^i E_{k-1}^i)^{-1}, & 1 \leq k \leq K. \end{cases} \quad (65)$$

1.3.5.13. Значения вспомогательных величин G_k^i , $k=0, \dots, K$ вычисляются по формуле

$$G_k^i = \begin{cases} \delta_0^i (\beta_0^i)^{-1}, & k=0; \\ (\delta_k^i + \gamma_k^i G_{k-1}^i) (\beta_k^i - \gamma_k^i E_{k-1}^i)^{-1}, & 1 \leq k \leq K. \end{cases} \quad (66)$$

1.3.5.14. Значения компоненты φ_k^i вычисляются по формуле

$$\varphi_k^i = \begin{cases} E_k^i \varphi_{k+1} + G_k^i, & 0 \leq k < K; \\ G_k^i, & k=K. \end{cases} \quad (67)$$

1.3.5.15. Значения компоненты ψ_k^i в точках $k=1, \dots, K$ вычисляются по формуле

$$\psi_k^i = \frac{F_0^{i-} - \frac{\Sigma_0(j)\Delta r_j}{2} (r_k^2 \varphi_k^i A_1 + r_{k-1}^2 \varphi_k^i A_2)}{P_j (r_k^2 + r_{k-1}^2 B_2/B_1)} + \frac{r_{k-1}}{B_1} \left\{ \frac{2}{\Sigma_1(j)\Delta r_j} \left[F_1^{i-} - \frac{1}{3} P_j (\varphi_k^i + \varphi_{k-1}^i) \right] \right\} \quad (68)$$

1.3.5.16. Значение компоненты ψ_k^i в точке $k=0$ вычисляются по формуле

$$\psi_0^i = -\frac{1}{2} \varphi_0^i. \quad (69)$$

1.3.5.17. Значения компоненты ψ_k^i в точке $k=K$ вычисляются по формуле

$$\psi_K^i = \frac{1}{2} \varphi_K^i. \quad (70)$$

1.3.6. По формулам (32) и (33) вычисляют групповую плотность потока Φ_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

$$\widehat{Q} = \begin{bmatrix} 0 & d_1 & d_2 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_1 & \dots & d_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_1 \end{bmatrix} \quad (71)$$

d_1 и d_2 вычисляют по формулам:

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

где n — число слоев защиты;

$t = 0,1 \min_j \{X_j^{(0)}\}$, $j = 1, \dots, n$ — начальное значение шага минимизации.

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

2.1. Вычисление компонентов вектора $X_{n+2}^{(k)}$.

Компоненты вектора $X_{n+2}^{(k)}$ вычисляют по формуле

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

2.2. Вычисление нормы векторов

Норму $N_i^{(k)}$ векторов $X_i^{(k)}$ и $X_{n+2}^{(k)}$ вычисляют по формуле

$$N_i^{(k)} = X_i^{(k)} - X_{n+2}^{(k)} = \left[\sum_{j=1}^n (X_{i,j}^{(k)} - X_{n+2,j}^{(k)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (75)$$

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

2.3. Вычисление значения критерия поиска

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

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

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

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

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

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

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

\tilde{D} — ограничение на мощность дозы;

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

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

$$U_{i,D} = \begin{cases} 0 & \text{при } D(\mathbf{X}_i^{(k)}) < \tilde{D} \\ 1 & \text{при } D(\mathbf{X}_i^{(k)}) \geq \tilde{D} \end{cases}; \quad (78)$$

$$U_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{при } X_{i,j}^{(k)} \geq \tilde{X}_j \\ 1 & \text{при } X_{i,j}^{(k)} < \tilde{X}_j \end{cases}. \quad (79)$$

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