

Программный пакет для расчета защиты от тормозного излучения протяженных источников бета-излучения

Статья описывает современный программный пакет, позволяющий рассчитать защиту от тормозного излучения радионуклидных бета-источников различного состава и комбинаций материалов защиты. Приведено описание и основные возможности программного продукта. В ходе выполнения процедуры валидации показано, что получаемые в программном пакете результаты находятся в хорошем соответствии с паспортными значениями, выбранными в качестве контрольных.

Ключевые слова:

тормозное излучение, бета-излучение, радиационная защита, программный пакет, протяженный источник, объемный источник.

В.С.Изгагин^{1,2}, М.В.Жуковский²

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург

²Институт промышленной экологии УрО РАН г. Екатеринбург

В своей практической деятельности человек часто сталкивается с различными источниками ионизирующего излучения: ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц, радионуклидные источники. Хотя источники имеют небольшие размеры, они могут содержать значительные активности включенных изотопов (например, изотопные термогенераторы). Их номенклатура достаточно широка и включает источники различного типа излучения и активности от единиц Бк до нескольких ПБк. Излучение таких источников должно быть надежно экранировано, чтобы обеспечить радиационную безопасность взаимодействующего с ними персонала.

Применяемые на сегодняшний день методические рекомендации по радиационной защите от тормозного излучения предполагают ручной расчет множества сопутствующих физических величин. Самостоятельный расчет занимает время и требует внимания и сосредоточенности на процессе. С целью автоматизации рутинных вычислений и сопутствующего увеличения производительности применяют специализированное программное обеспечение.

Из тех пакетов, что имеются на сегодняшний день, пока не существует программ, позволяющих вычислять защиту от тормозного излучения (ТИ) протяженных бета-источников. На рынке программного обеспечения есть стандартные пакеты для радиационных вычислений – это *MicroShield 11* [1] и *VARSKIN* [2]. Первый используется для расчета защиты от гамма-излучения различных изотопных источников, второй – для расчета мощностей доз от бета-радионуклидов. При этом ни один из них не учитывает важную компоненту, присущую протяженным бета-источникам – поле тормозного излучения. Разработанное и представленное в данной статье программное обеспечение призвано закрыть существующий пробел в арсенале программных средств для расчета радиационной защиты.

Основная идея разработанного продукта – обеспечить научное сообщество специалистов в области ядерной физики и радиационной безопасности инструментом, позволяющим провести расчет защиты и доз на биологический объект от тормозного излучения бета-источников. В качестве примеров часто встречающихся излучателей можно привести изотопные генераторы, контейнеры с радиоактивными отходами, ампулы с радиоактивными растворами и др.

Для упрощения оценок мощностей доз на биологические объекты в ходе расчетов источники излучения, как правило, принимаются за точечные. Однако такие допущения дают слишком заниженную или завышенную оценку. Реальные источники излучения протяженные, и при дозиметрических расчетах необходимо учитывать множество факторов, влияющих в конечном итоге на результат. Вот некоторые из них:

- наличие самопоглощения в источнике;
- рассеянное излучение в материале источника;
- рассеянное излучение в оболочке источника;
- ослабление излучения во внешней оболочке источника.

При расчетах радиационной защиты биологических объектов необходим учет всех этих факторов. Разработанный программный пакет включает перечисленные выше условия и позволяет получить близкую к действительной оценку искомой величины.

Название программного пакета «*BSP*» является аббревиатурой от англоязычного словосочетания «*Bremsstrahlung Protection*», что переводится дословно как «Защита от тормозного излучения». Продукт был разработан на языке программирования *C# (C Sharp)* [3], имеющего строгую статическую типизацию. Это позволяет избежать ошибок при использовании множества переменных с разным типом и оптимально выбирать необходимый тип для уменьшения использования аппаратных ресурсов.

Математическая формулировка задачи

Вычислительная механика, заложенная в алгоритм работы программного пакета «*BSP*», основывается на формулах расчета, приведенных в [4]. Однако перед рассмотрением выражений, описывающих поля протяженных источников, следует описать поле тормозного излучения и ввести некоторые величины.

Поле тормозного излучения

Первая вводимая величина – это поток энергии тормозного излучения. Она дается известной формулой Виарда [4]. Форма спектра тормозного излучения влияет на значение потока энергии, поэтому для минимизации такого влияния был использован модифицированный вид данного выражения:

$$Y_{\beta} = 8,5 \cdot 10^{-4} (Z_{\text{эфф}} + 3) \sum_i \overline{E_{\beta i}}^{-2} n_{\beta i}, \quad (1)$$

где Y_{β} – поток энергии ТИ, МэВ/распад; $Z_{\text{эфф}}$ – эффективный порядковый номер вещества; $E_{\beta i}$ – средняя энергия бета-частиц i -й энергетической группы, МэВ; $n_{\beta i}$ – выход бета-излучения на распад для i -й энергетической группы.

Эффективный атомный номер вещества находим по следующей формуле:

$$Z_{\text{эфф}} = \frac{\sum_i a_i Z_i^2}{\sum_i a_i Z_i}, \quad (2)$$

где a_i – доля атомов с атомным номером Z_i в данном химическом соединении.

Спектр тормозного излучения имеет непрерывный вид. Выход тормозного излучения на распад будет различен для каждой энергетической группы (рис.1). Для расчетов принимают, что весь спектр тормозного излучения разделен на 10 энергетических групп.

С учетом энергетических групп спектра тормозного излучения мощность воздушной кермы от тормозного излучения точечного источника запишется как:

$$\dot{K} = c \cdot \sum_{j=1}^{10} \mu_m^{\text{возд}}(E_j) \cdot I_{\beta j} = c \frac{A}{4\pi b^2} \sum_{j=1}^{10} \mu_m^{\text{возд}}(E_j) \cdot Y_{\beta} \cdot n_j, \quad (3)$$

где \dot{K} – мощность воздушной кермы на расстоянии R от источника, Гр/ч; c – константа для перехода к единице мощности дозы Гр/ч; $\mu_m^{\text{возд}}$ – массовый коэффициент поглощения энергии в воздухе, см²/г; E_j – средняя энергия тормозного излучения j -й энергетической группы, МэВ; $I_{\beta j}$ – интенсивность тормозного излучения для j -й энергетической группы тормозного излучения, МэВ/(см²·с); A – активность источника, Бк; b – расстояние от источника до точки регистрации излучения, см; Y_{β} – полный поток энергии ТИ, МэВ/распад; n_j – доля от полного потока энергии ТИ для j -й энергетической группы ТИ.

Учтено разделение спектра на 10 энергетических групп. Поэтому суммарная мощность дозы будет суммой парциальных мощностей доз \dot{K}_j от каждой j -й группы энергий.

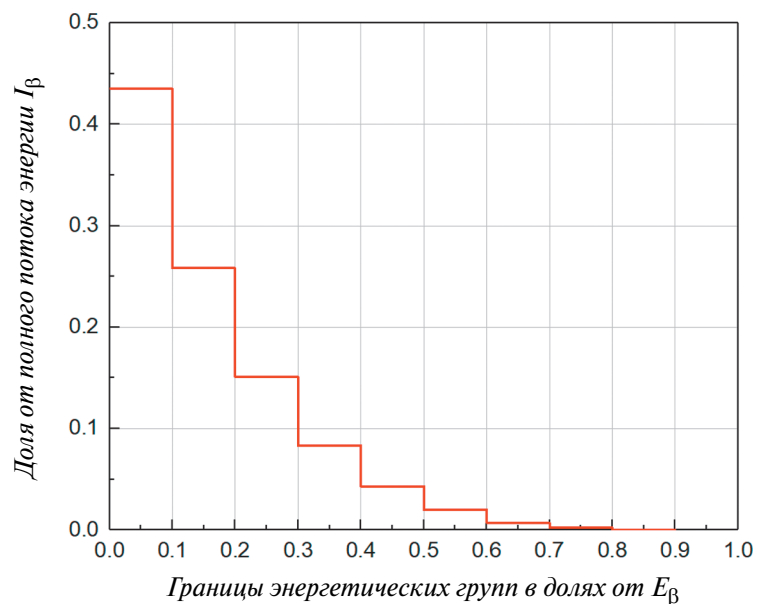


Рис.1. Энергетическое распределение тормозного излучения для бета-частиц.

Излучение цилиндрического источника

Одной из самых распространенных и близких форм протяженного источника является цилиндр. Для него выделено два направления распространения излучения – радиальное и осевое. Первое соответствует излучению вдоль радиуса цилиндра, второе – вдоль его оси. Рассматривая цилиндр, все вычисления проводим в цилиндрической системе координат. Опуская вывод формул, который можно найти в исходной литературе [4], приводим итоговое выражение для расчета парциальной мощности воздушной кермы в радиальном направлении:

$$\dot{K} = c \cdot 2\mu_m^{возд} n_j \frac{A_V Y_\beta}{4\pi} \int_0^h \int_0^R \int_0^\pi \frac{\rho \cdot dz d\rho d\varphi}{\rho^2 + b^2 + z^2 - 2\rho b \cdot \cos\varphi} \times \exp(-\mu_0 x_e) \cdot \exp(-\mu y) \cdot B_{zem}(\mu_0 x_e + \mu y), \quad (4)$$

где c – константа перехода к единицам мощности дозы Гр/ч; $\mu_m^{возд}$ – массовый коэффициент поглощения энергии в воздухе, см²/Г; n_j – доля от полного потока энергии ТИ для j -й энергетической группы тормозного излучения; Y_β – полный поток энергии ТИ, МэВ/распад; A_V – удельная активность источника, Бк/см³; R – радиус цилиндра, см; μ_0 – линейный коэффициент ослабления в материале источника, см⁻¹; x_e – длина самопоглощения, см; μ – линейный коэффициент ослабления слоя защиты, см⁻¹; y – длина ослабления слоя защиты, см; B_{zem} – фактор накопления для гетерогенной среды.

Здесь длина самопоглощения (4) и ослабления (5) выражаются следующим образом:

$$x_e = \frac{\sqrt{\rho^2 + b^2 + z^2 - 2\rho b \cdot \cos\varphi}}{\rho^2 + b^2 - 2\rho b \cdot \cos\varphi} \times (\rho^2 - b\rho \cdot \cos\varphi + \sqrt{R^2(\rho^2 + b^2 - 2\rho b \cdot \cos\varphi) - b^2\rho^2 \cdot \sin\varphi}), \quad (5)$$

$$y = d \frac{\sqrt{\rho^2 + b^2 + z^2 - 2\rho b \cdot \cos\varphi}}{b - \rho \cdot \cos\varphi}, \quad (6)$$

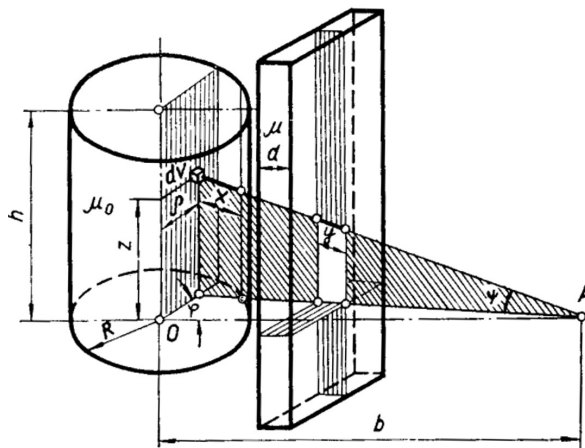


Рис.2. Схема к расчету ослабления в защите излучения цилиндрического источника в радиальном направлении [4].

где d – толщина слоя защиты, см.

В формуле (4) учтены все необходимые условия – рассеяние излучения в защите и материале источника, самопоглощение в источнике и ослабление тормозного излучения в материале защиты.

Вклад поля рассеянного излучения в результирующую величину учитывался введением фактора накопления. Для каждого слоя материала, включая слой самого источника, расчет выполнялся по стандартной формуле Тейлора в двухэкспоненциальном приближении. Кроме того, в пакете реализован дополнительный вариант вычисления фактора накопления [5] для вещества по формуле (7), которая работает в более широком диапазоне энергий, начиная от 15 кэВ и заканчивая энергией 15 МэВ:

$$B(E, \mu d) = \begin{cases} 1 + \frac{(b-1)(K^{\mu d} - 1)}{K - 1}, & \text{при } K \neq 1 \\ 1 + (b-1) \cdot \mu d, & \text{при } K = 1 \end{cases}, \quad (7)$$

$$K(\mu d) = c \cdot (\mu d)^a + d \frac{\tanh\left(\frac{\mu d}{\chi_k} - 2\right) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)}, \quad (8)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления в материале вещества, см⁻¹; E – энергия, для которой рассчитывается фактор накопления, МэВ; d – толщина слоя материала, см; $a, b, c, d, \chi_k = f(E)$ – параметры формулы, зависящие от энергии излучения.

Для многослойной защиты расчет выполнялся по формуле Бродера [4]. Выбор именно этой формулы обусловлен ее простотой, достаточной для расчета точно и возможностью учета смены порядка слоев гетерогенной защиты.

Излучение в направлении оси

В этом случае распространение излучения рассматривалось вдоль оси цилиндра. В сферической системе координат выражение для расчета парциальной мощности воздушной кермы, с учетом введенных условий, будет выглядеть следующим образом.

$$\begin{aligned} \dot{K}_j &= 2\pi \cdot c \cdot Y_\beta \cdot \eta_j \cdot \mu_m^{6030} \frac{A_V}{4\pi} \times \\ &\times \left[\int_0^{\theta_1} \sin\theta \exp(-\mu y) d\theta \int_{b-\sec\theta}^{(b+H)\sec\theta} \exp(-\mu_0 x_e) B_{zem}(\mu_0 x_e + \mu y) dr + \right. \\ &\left. + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta \exp(-\mu y) d\theta \int_{b-\sec\theta}^{R \cos\theta} \exp(-\mu_0 x_e) B_{zem}(\mu_0 x_e + \mu y) dr \right] \end{aligned} \quad (9)$$

где N – количество слоев защиты; A_V – удельная активность источника, Бк/м³; H – полная высота цилиндра, см; R – радиус цилиндра, см; b – расстояние от торца цилиндра до точки регистрации излучения, см; μ – линейный коэффициент ослабления для слоя защиты, см⁻¹; x_e – длина самопоглощения в источнике, см; y – длина ослабления в слое защиты, см.

Здесь введены следующие обозначения:

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{R}{b+H}\right), \quad \theta_2 = \arctg\left(\frac{R}{b}\right). \quad (10)$$

Длины самопоглощения (10) и ослабления (11):

$$x_e = r - b \cdot \sec\theta, \quad y = d \cdot \sec\theta. \quad (11)$$

Первое слагаемое в выражении (9) соответствует значению мощности дозы от усеченного конуса, а второе – мощности дозы от тела вращения, дополняющего усеченный конус до цилиндра. Суммарная величина этих вкладов будет мощностью дозы в осевом направлении излучения.

Излучение прямоугольного параллелепипеда

Для данной геометрической формы источника (рис.4) получены следующие уравнения. Полагая, что размеры источника $L \times W \times H$, где

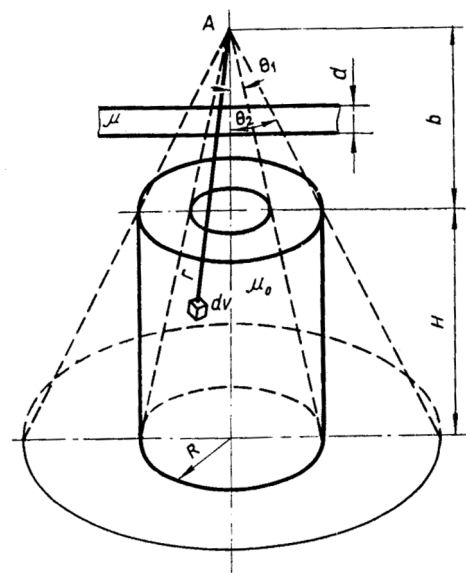


Рис.3. Схема к расчету мощности дозы в направлении оси цилиндрического источника [4].

L, W, H – длина, ширина и высота, соответственно, точка, в которой вычисляется мощность дозы, находится на расстоянии b от боковой поверхности источника за защитой толщиной d . Тогда получаем следующее выражение:

$$\dot{K}_J = c \cdot \mu_m^{гозд} \eta_j \frac{Y_\beta}{4\pi} \int_0^L \int_0^W \int_0^H \frac{\exp(-\mu_0 x_e - \mu y) \cdot B_{зем}(\mu_0 x_e + \mu y)}{R^2} dx dy dz, \quad (12)$$

где c – коэффициент перехода к единицам мощности дозы, Гр/ч; $\mu_m^{гозд}$ – массовый коэффициент поглощения энергии в воздухе, см²/г; η_j – доля от полного потока энергии тормозного излучения; Y_β – поток энергии тормозного излучения, МэВ/с; A_V – удельная активность источника, Бк/м³; μ_0 – линейный коэффициент ослабления для вещества источника, см⁻¹; x_e – длина самопоглощения в источнике, см; μ – линейный коэффициент ослабления защиты, см⁻¹; y – длина ослабления в слое защиты, см; $B_{зем}$ – фактор накопления для гетерогенной среды; R – расстояние от элементарного объема с координатами $(x; y; z)$ до точки измерения A , см.

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}. \quad (13)$$

Длины самопоглощения (14) и ослабления (15) будут выражаться формулами:

$$x_e = \frac{c}{b + m} R, \quad (14)$$

$$y = \frac{R}{b + m}, \quad (15)$$

где m – величина, зависящая от направления, в котором рассчитывается мощность дозы. Она равна разности геометрического размера источника и соответствующей координаты элементарной ячейки.

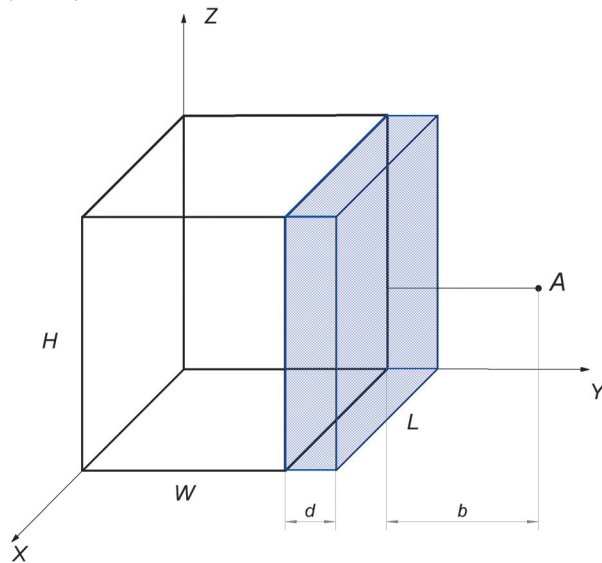


Рис.4. К расчету излучения прямоугольного параллелепипеда.

тормозного излучения: ³²P, ⁸⁵Kr, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr, ⁹⁰Y, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru, ¹⁰⁶Rh, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Pr, ¹⁴⁷Pm и ²⁰⁴Tl. Предлагаемые для использования материалы источника или защиты: вода, бетон, титанат стронция (SrTiO₃), алюминий, железо, свинец и вольфрам.

Для получения численного значения тройного интеграла весь объем источника разбивается на бесконечно малые элементарные объемы dV . Величину разбиения, а значит, и размеры элементарно-

Алгоритм расчета программного пакета

Алгоритм программы условно разделен на 3 этапа: ввод входных параметров, вычисление искомой величины, завершение расчета и отображение результата в единицах мощности дозы (МД). Блок-схема алгоритма приведена на рис.5.

Ввод входных параметров подробно описан в следующем пункте и включает в себя три группы параметров, которые необходимо задать перед началом расчета. Это параметры источника излучения, его защиты и дополнительные входные величины. В качестве источников излучения пакет «BSP» предлагает следующие изотопы, представляющие максимальный интерес с точки зрения защиты от

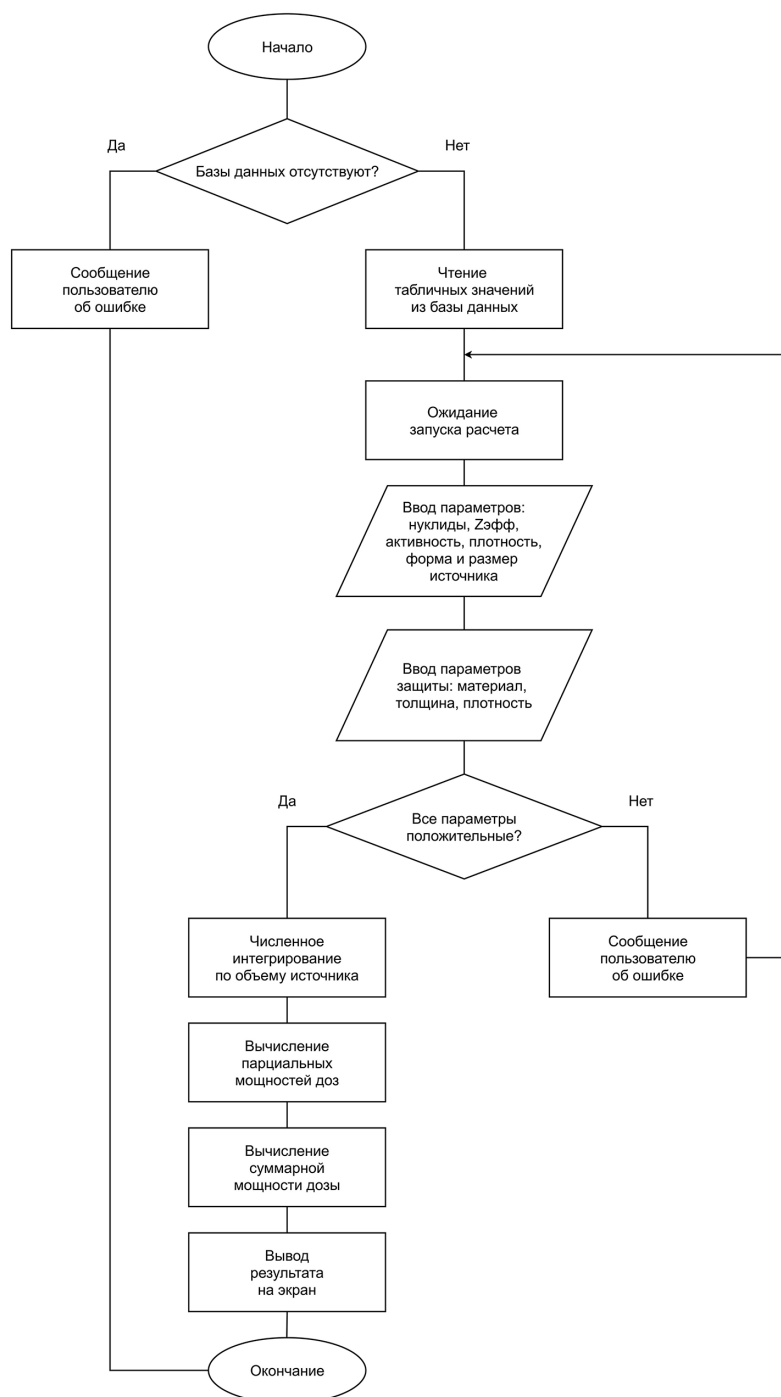


Рис. 5. Блок-схема программного пакета «BSP».

Реальные источники излучения заключены в оболочку защиты, что также учитывается программным пакетом. На второй панели входных параметров (рис.7) приложение «BSP» позволяет задать набор слоев защиты определенной толщины, плотности и вещества. При этом порядок их расположения играет свою роль в конечном результате и задается в направлении от источника к внешней среде.

Поскольку расчет защиты (или дозы) проводится в заданной точке на определенном расстоянии от источника, то это также указывается во входных параметрах, и дополнительно выбирается

го объема можно варьировать в программном пакете по каждой из направляющих осей.

Входные данные

После запуска программного пакета перед пользователем появляется главное окно (рис.6). Оно состоит из четырех основных частей: меню программы, панель входных данных, поле выходных значений, строка статуса.

Панель входных данных многостраничная и разделена на три основные группы параметров. Первая содержит набор характеристик источника бета-излучения. Здесь указывается перечень радионуклидов, входящих в состав источника и их активность в единицах «Бк». Задается вещество материала источника излучения. Это может быть Fe, Pb, SrTiO₃ и др. В пакете «BSP» предусмотрено задание своих параметров вещества (плотности и эффективного атомного номера Z), если они отличаются от стандартных. Далее можно выбрать геометрическую форму источника излучения – цилиндр или прямоугольный параллелепипед, задать его геометрические размеры.

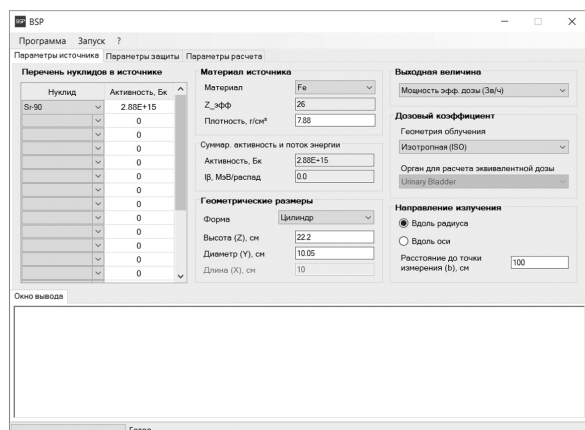


Рис.6. Главное окно программы «BSP».

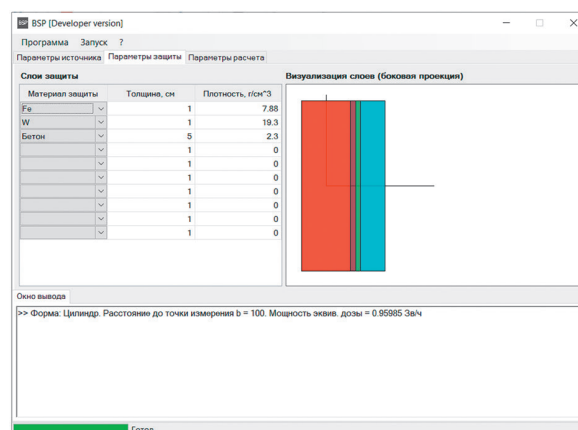


Рис.7. Панель «Параметры защиты» программного пакета «BSP».

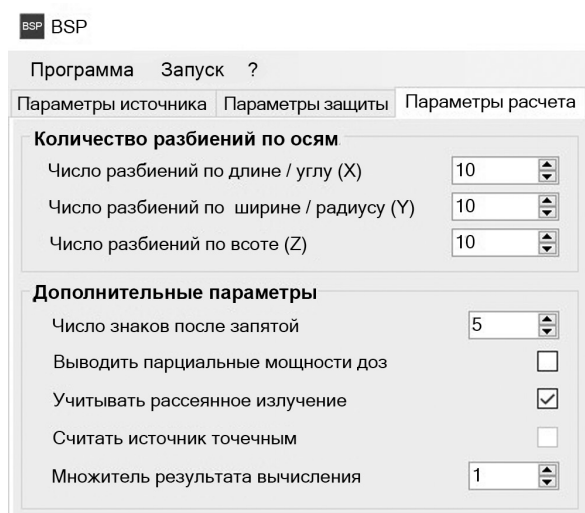


Рис.8. Панель «Параметры расчета».

и предоставляется пользователю ее выбор: изотропная, левая или правая боковая, передняя-задняя, задняя-передняя, вращательная.

Результатом расчета программного пакета будет значение мощности дозы тормозного излучения на заданном расстоянии от протяженного источника. При этом пользователь может выбрать тип получаемой дозиметрической величины: мощность эффективной или эквивалентной дозы (для выбранного органа/ткани), мощность AMBIENTного эквивалента дозы или же экспозиционной дозы.

Поскольку спектр тормозного излучения немонноэнергетический, то может понадобиться получение результатов расчета для каждой энергетической группы тормозного излучения. Это также было реализовано в пакете «BSP» (рис.8, панель «Параметры расчета»).

Для консервативных оценок дозовой нагрузки возможно провести расчет в приближении точечного источника (рис.8), где его геометрические размеры считаются много меньше расстояния до точки измерения, а самопоглощением в его объеме можно пренебречь. При таких расчетах величину мощности дозы следует считать завышенной.

Процедура валидации

Валидация рассчитанных в программном пакете «BSP» значений проводилась по нескольким контрольным значениям.

Первые значения относятся к экспериментальным данным, полученным в ходе ликвидации радиационной аварии в селе Лиа (Грузия) [7]. Значения мощностей доз получены от радиоизотопных термогенераторов РИТ-90 на основе ^{90}Sr мощностью 250 Вт. В табл.1 приведены результаты экспериментальных и расчетных значений. В качестве меры различия величин введено отношение рассчитанной величины к измеренной (контрольной).

Также была проведена валидация по источникам рентгеновского излучения типа ИРИС и ИРИТ [8]. В первом в качестве источника бета-излучения используется $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, во втором ^{204}Tl . Расчетные и паспортные значения для ИРИС и ИРИТ приведены в табл.2.

Табл.1. Контрольные и расчетные значения МД на различных расстояниях.

| | | |
|---|------|------|
| Расстояние от источника до детектора, м | 0,55 | 2 |
| Измеренная МД, мЗв/ч | 4941 | 423 |
| Расчетная МД, мЗв/ч | 4500 | 300 |
| Отношение <i>расчет/измерения</i> | 0,91 | 0,71 |

Табл.2. Контрольные и расчетные значения МД для различных источников рентгеновского излучения на расстоянии 1 м.

| Тип источника | А, ГБк | Паспортная \dot{X}_p , Р/ч | Расчетная \dot{X}_p , Р/ч | Отношение <i>расчет/измерения</i> |
|---------------|--------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| ИРИС-1 | 55,0 | $7,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | 1,37 |
| ИРИС-2 | 250,0 | $3,2 \cdot 10^{-2}$ | $4,5 \cdot 10^{-2}$ | 1,40 |
| ИРИС-3 | 1250,0 | $1,7 \cdot 10^{-1}$ | $2,5 \cdot 10^{-1}$ | 1,47 |
| ИРИТ-1 | 0,04 | $2,2 \cdot 10^{-6}$ | $1,3 \cdot 10^{-6}$ | 0,59 |
| ИРИТ-2 | 1,5 | $8,8 \cdot 10^{-5}$ | $5,2 \cdot 10^{-5}$ | 0,59 |
| ИРИТ-3 | 7,6 | $4,5 \cdot 10^{-4}$ | $2,6 \cdot 10^{-4}$ | 0,57 |
| ИРИТ-4 | 38,0 | $2,2 \cdot 10^{-3}$ | $2,2 \cdot 10^{-3}$ | 1,0 |

Табл.3. Контрольные и расчетные значения МД для источников типа БИС на расстоянии 50 см до точки измерения.

| Тип источника | А, ГБк | Паспортная \dot{X}_p , Р/ч | Расчетная \dot{X}_p , Р/ч | Отношение <i>расчет/измерения</i> |
|---------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| БИС-МНА-1 | $18,5 \cdot 10^7$ | $1,814 \cdot 10^{-4}$ | $1,817 \cdot 10^{-4}$ | 1,0 |
| БИС-МНА-2 | $75,0 \cdot 10^7$ | $5,442 \cdot 10^{-4}$ | $7,365 \cdot 10^{-4}$ | 1,35 |

Табл.4. Контрольные и расчетные значения МД для источников типа БИП на расстоянии 50 см до точки измерения.

| Тип источника | А, ГБк | Нижняя граница (по паспорту) \dot{X}_p , Р/ч | Верхняя граница (по паспорту) \dot{X}_p , Р/ч | Расчетная \dot{X}_p , Р/ч |
|---------------|---------------------|--|---|-----------------------------|
| БИП-10 | $1,2 \cdot 10^9$ | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | $8,7 \cdot 10^{-4}$ | $4,1 \cdot 10^{-4}$ |
| БИП-30 | $5,9 \cdot 10^9$ | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | $7,5 \cdot 10^{-3}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ |
| БИП-50 | $1,1 \cdot 10^{10}$ | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | $1,1 \cdot 10^{-2}$ | $3,8 \cdot 10^{-3}$ |

Поскольку геометрические размеры и состав паспортных источников точно неизвестен, наблюдается разброс полученных значений мощности экспозиционной дозы. Тем не менее, в результате расчета возможно получение консервативной оценки мощности дозы.

Аналогично выполнена валидация по источнику типа БИС (Бета-источник на основе ^{90}Sr) [9]. В пакете «BSP» для него получена расчетная величина мощности экспозиционной дозы на расстоянии 50 см. Результаты сведены в табл.3.

Проведен расчет для источника БИП на ^{147}Pm [9] в приближении точечного источника (когда его размеры на порядки меньше расстояния до точки измерения МД). Результаты расчета и паспортные значения для расстояния 50 см приведены в табл.4.

По трем наборам данных из табл.1–4 наблюдаем, что контрольные и рассчитанные в программном пакете «BSP» значения величин мощностей доз хорошо согласуются друг с другом и отличаются не более, чем в 1,5 раза.

Заключение

Разработан программный пакет под названием «*Bremsstrahlung Protection (BSP)*» для расчета защиты от тормозного излучения протяженных источников бета-излучения различных геометрических форм и состава. Продукт предназначен для специалистов по радиационной безопасности и обращению с радиоактивными источниками бета-излучения различной мощности.

Представлено описание алгоритма работы программы, элементов рабочего интерфейса и функциональные возможности. Валидация программного пакета «BSP» показала, что расчетные значения находятся в хорошем соответствии с паспортными (контрольными) значениями мощностей доз по каждому из приведенных типов источников. Наблюдаемые отличия в расчетных и паспортных значениях обусловлены использованием приближенных геометрических размеров и химического состава изотопных источников излучения, формой бета-спектра источника излучения, неопределенностью используемых коэффициентов в расчетных формулах поля тормозного излучения, а также самих экспериментальных значений.

Программное обеспечение «BSP» прошло регистрацию в государственном реестре программ для ЭВМ от 01.12.2020 [10]. Ознакомиться с программным пакетом можно через официальный сайт института промышленной экологии Уральского отделения РАН: <http://www.iie-uran.ru/BSP.zip>.

Литература

1. MicroShield. User's Manual. Version 11. Grove Software. 2017.
2. VARSKIN 6: A computer code for skin contamination dosimetry // NUREG/CR-6918 Rev.3. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2017.
3. Липаев В.В. Системное проектирование сложных программных средств для информационных систем. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: СИНТЕГ, 2002.
4. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
5. Y. Harima, T. Shun-ichi, Y. Sakamoto, H. Hirayama, «Development of new gamma-ray buildup factor and application to shielding calculations», Journal of Nuclear Science and Technology, no. 28(1). pp. 74-84.
6. ICRP, 2010. Conversion Coefficients Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40 (2–5).

7. The radiological accident in Lia, Georgia. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. 166 p.
8. Каталог закрытых радионуклидных источников тепла. Производственное объединение «МАЯК»: радиоизотопный завод, г. Озерск, 2003.
9. Каталог образцовых растворов. АО В/О Изотоп. URL: <http://www.isotop.ru/production/industrial/sources-solutes/928/> (дата обращения: 27.04.2020).
10. Свидетельство 2021610532. «Bremsstrahlung protection (BSP)»: программа для ЭВМ. Изгагин В.С., Жуковский М.В. (RU), правообладатель ФГБУН ИПЭ УрО РАН, 2020665818, заявл. 01.12.2020, опубл. 15.01.2021. 1268 Кб.

Software Package for Calculation of Protection Against Bremsstrahlung of Extended Beta Sources

Izgagin Vyacheslav^{1,2}, Zhukovsky Mikhail²

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

² Institute of Industrial Ecology UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The article describes the modern software for calculation of protection against bremsstrahlung of beta-sources of different compound and combinations of radiation shield materials. The description and general opportunities of software are depicted. It was presented during the validation procedure that attained results of software work are in good agreement with reference values.

Key words: beta radiation, bremsstrahlung, software, radiation protection, extended source, volume source.

В.С.Изгагин^{1,2} (инж.), М.В.Жуковский² (профессор, д.т.н., директор).

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург.

² Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Контакты: тел. +7 (950) 553-57-34; e-mail: v.s.izgagin@urfu.ru.