

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЛЬБЕДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАТЕКАНИЯ ДЛЯ ПРЯМОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАНАЛА, ПРОНИЗЫВАЮЩЕГО СЛОЙ ЗАЩИТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

К.С. Куприянов, В.В. Перевезенцев

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1*



Задача определения радиационной обстановки – плотности потоков нейтронов и гамма-квантов, спектра излучения, удельных объемных активностей радиоактивных газов в воздухе и т.д. за защитной композицией, имеющей неоднородности, всегда была важна в вопросах радиационной безопасности. Одним из путей решения задачи определения потоков гамма-излучения было разделение общего потока ионизирующего излучения на четыре составляющие: прямой видимости, натекания, альbedo прямой видимости и альbedo натекания, и получение аналитического решения для каждого компонента. Первые три составляющие подробно изучены применительно к простым геометриям, для них существуют аналитические решения, однако для последней составляющей таких решений нет. В данной работе было выведено аналитическое представление для компонента альbedo натекания, который, в отличие от численных методов (таких как методы Монте-Карло), позволяет анализировать влияние неоднородностей в защитных композициях на радиационную обстановку, а также быстро получать оценочные значения потоков и мощностей доз. Покомпонентное сравнение составляющих позволяет выделять наиболее существенные механизмы формирования дозовой нагрузки за защитой ядерного реактора, делать выводы об эффективности конструкторских решений при проектировании защиты и совершенствовать защиту при значительно меньших вычислительных затратах.

Произведены расчеты четырех составляющих общего потока ионизирующего излучения для различных параметров цилиндрической неоднородности в защите реактора. На основе полученных значений сделаны выводы о важности учета составляющей альbedo натекания в формировании радиационной обстановки за корпусом активной зоны.

Ключевые слова: альbedo натекания, неоднородности в радиационной защите.

При рассмотрении неоднородностей защитных композиций их подразделяют на элементарные (простые) и сложные. К элементарным неоднородностям относят такие, в

© К.С. Куприянов, В.В. Перевезенцев, 2021

которых поле излучения не зависит от поля соседней неоднородности. Изучение сложных неоднородностей является более общей задачей и, как правило, не имеет аналитического решения [1 – 7]. Решение достаточно сложных инженерных задач проводится численными (по существу, приближенными) методами. Однако результаты численного решения должны быть верифицированы. Одним из наиболее надежных способов верификации численного решения, а следовательно, и программного кода является сравнение результатов расчета с аналитическим решением. Однако понятно, что тестовая задача с аналитическим решением должна быть «максимально» близка к исходной подлежащей решению инженерной задаче. С этой точки зрения накопление объема тестовых задач, имеющих аналитические решения, имеет важнейшее практическое значение. В данной работе ставилась задача получить формулу компонента альbedo натекания для элементарной неоднородности и выполнить ее анализ, позволяющий оценить влияние геометрических размеров цилиндрического канала и свойств материала защиты.

Рассматривается элементарный прямой цилиндрический канал диаметром $2a$, пронизывающий насквозь слой защиты. С одной стороны имеется плоский равномерный источник мощностью N_0 , точка детектирования D находится на выходе из защиты на оси канала (рис. 1)

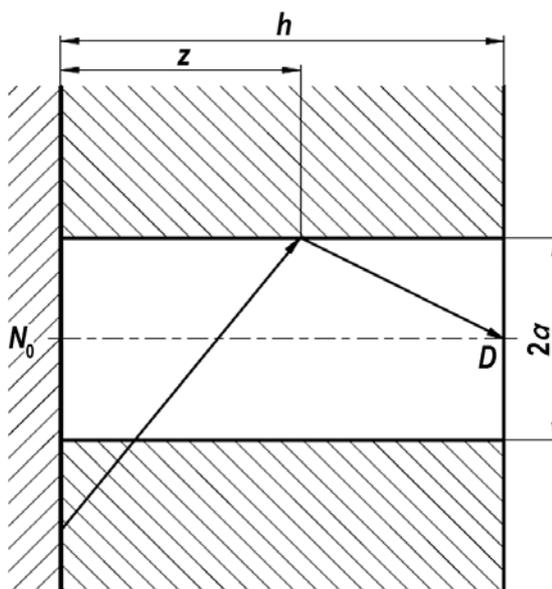


Рис. 1. Цилиндрическая неоднородность в защите

На рисунке лучом показано образование компонента альbedo натекания – луч выходит из зоны, находящейся вне канала, идет в область канала, физически ослабляясь, отражается от стенки канала и попадает в точку детектирования D . Получим решение для данной составляющей потока. Общий закон физического ослабления для ионизирующего излучения имеет вид $\exp(-\mu_0 L)$ [8], где величина μ_0 в зависимости от вида излучения определяется по-разному:

- $\mu_0 \equiv \mu$ – для гамма-квантов;
- $\mu_0 \equiv [\lambda(E_n > E_n^*)]^{-1}$ – для быстрых нейтронов;
- $\mu_0 \equiv \Sigma a$ – для тепловых нейтронов.

Для простоты рассмотрим вначале плоскую задачу, а затем перейдем к пространственному решению. Рассмотрим вид сверху (с торца канала) и отметим элементы, отвечающие за образование компонента натекания (рис. 2). Для этого выделим элемен-

тарный участок dS на радиусе R и угловой координате α . Для нахождения падающего на точку P потока проведем касательную в этой точке к поверхности канала и рассмотрим отдельно «части» излучения слева и справа от этой касательной.

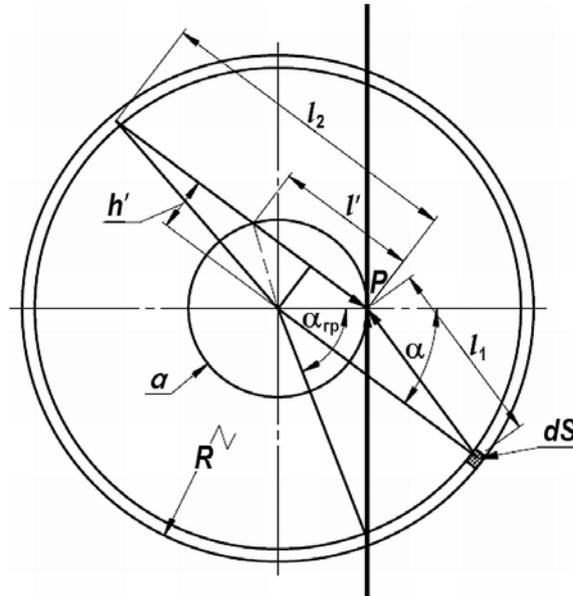


Рис. 2. Вид сверху на неоднородность

Рассмотрим правый участок: на радиусе R выделим справа от касательной площадку dS . Падающий поток ослабляется на всем участке длиной l_1 . Поскольку α – угол между лучом, проведенным из центра окружности через точку P , и лучом, проведенным из центра окружности к центру площадки dS , то для $\alpha \in [0, \alpha_{rp}]$ можно записать выражение для потока:

$$d\Phi = R \frac{N_0 f(\theta)}{l_1^2} dR d\alpha \cdot \exp(-\mu_0 l_1), \quad (1)$$

где $f(\theta)$ – угловое распределение излучения источника; $l_1 = (R^2 + a^2 - 2Ra \cdot \cos(\alpha))^{1/2}$ (по теореме косинусов); $\alpha_{rp} = \arccos(a/R)$.

Считая источник изотропным ($f(\theta) = 1/(2\pi)$) и интегрируя, получим выражение для потока, падающего на стенку канала с части кольца толщиной dR с правой стороны (выражение умножается на 2, так как суммируется поток сверху и снизу от точки P):

$$d\Phi_1 = 2N_0 \int_0^{\alpha_{rp}} \frac{R}{2\pi l_1^2} dR d\alpha \cdot \exp(-\mu_0 l_1). \quad (2)$$

Аналогично можно получить суммарный падающий поток с части кольца с левой части. Отличие между правой и левой частями на длине участка ослабления (см. рис. 2):

$$d\Phi_2 = 2N_0 \int_{\alpha_{rp}}^{\pi} \frac{R}{2\pi l_2^2} dR d\alpha \cdot \exp(-\mu_0 [l_1 - l']), \quad (3)$$

где $l_2 = l_1 = (R^2 + a^2 - 2Ra \cdot \cos(\alpha))^{1/2}$ (по теореме косинусов); $l' = 2a[1 - \sin^2(\alpha) \cdot (R/l_2)^2]^{1/2}$. Выражение для l' получено из соотношений $h'/R = -a \cdot \sin(\alpha)/l_2^2$ (теорема синусов для треугольника со стороной l_2) и $l'/2 = (a^2 - (h')^2)^{1/2}$. В дальнейшем равные длины l_2 и l_1 будем обозначать символом l .

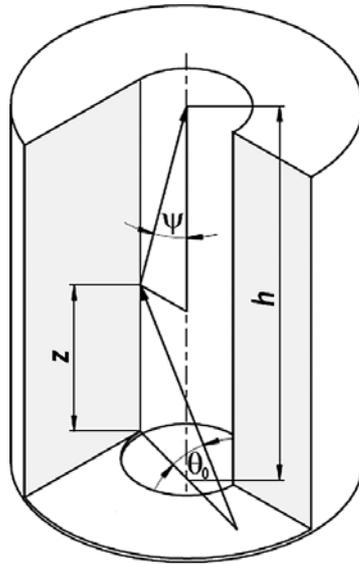


Рис. 3. Канал в пространстве

Перейдем к пространственной задаче (рис. 3). На рисунке показан цилиндр с разрезом, а лучом показано формирование составляющей альbedo натекания. Предполагается, что цилиндр имеет бесконечный радиус, чтобы не учитывать краевые эффекты. При переходе к пространственной задаче изменятся длины физического и геометрического ослабления, а именно, значения l и $[l - l']$. Выразим новые длины через l , l' и z , чтобы не усложнять формулу новыми переменными.

Для пояснения, как вычисляются новые длины геометрического ослабления, используется рис. 4, дополняющий рис. 3. На нем представлен треугольник с высотой z и углом θ_0 , противолежащим z . Поток гамма-квантов, вылетевших из торца цилиндра, проходит часть пути сквозь защитный материал и тем самым физически ослабляется на длине $L_{\text{ослабления}}$, а затем попадает в канал, в котором присутствует только геометрическое ослабление.

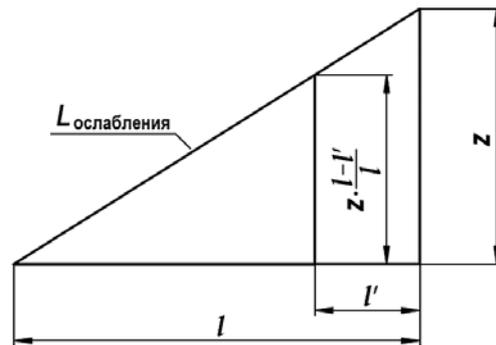


Рис. 4 Длина физического ослабления для $d\Phi_2$

Длина геометрического ослабления L определяется выражением $(l^2 + z^2)^{1/2}$; длина физического ослабления на левом участке – выражением $[(z(l - l')/l)^2 + (l - l')^2]^{1/2}$.

Тогда формулы (2) и (3) можно представить в виде

$$d\Phi_1 = 2N_0 \int_0^{\alpha_{\text{пр}}} \frac{R}{2\pi(l^2 + z^2)} dR d\alpha \cdot \exp(-\mu_0 \sqrt{(l^2 + z^2)}), \quad (4)$$

$$d\Phi_2 = 2N_0 \int_{\alpha_{rp}}^{\pi} \frac{R}{2\pi(l^2 + z^2)} dR d\alpha \cdot \exp\{-\mu_0 \sqrt{[z(l-l')/l]^2 + (l-l')^2}\}. \quad (5)$$

В большинстве практических случаев можно считать источник бесконечной плоскостью и производить интегрирование по радиусу с верхним пределом, равным бесконечности. Таким образом, суммарный поток, падающий в точку P , от бесконечной плоскости равен

$$\Phi_{\text{пад}} = \int_a^{\infty} (d\Phi_1 + d\Phi_2) dr.$$

Для получения величин отраженного потока воспользуемся величиной числового дифференциального альbedo: данная величина зависит от угла падения θ , угла отражения ψ и энергии потока ионизирующего излучения. Угол падения зависит от угла α , поэтому данную величину необходимо учитывать еще до первого интегрирования по углу α .

Задача является осесимметричной, поэтому, интегрируя дифференциал падающего потока на боковую поверхность по узкому кольцу, окончательно получаем решение для составляющей альbedo натекания как сумму двух составляющих:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{ал.нат}} &= \Phi_{\text{ал.нат1}} + \Phi_{\text{ал.нат2}}; \\ \Phi_{\text{ал.нат1}} &= \int_0^h \int_a^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{N_0 R}{\pi(l^2 + z^2)} dR d\alpha \times \\ &\times \exp(-\mu_0 \sqrt{l^2 + z^2}) \cdot \frac{a_4(E_0, \theta_0, \psi)}{(h-z)^2 + a^2} 2\pi adz; \\ \Phi_{\text{ал.нат2}} &= \int_0^h \int_a^{\infty} \int_0^{\alpha_{rp}} \frac{N_0 R}{\pi(l^2 + z^2)} dR d\alpha \times \\ &\times \exp\{-\mu_0 \sqrt{[z(l-l')/l]^2 + (l-l')^2}\} \cdot \frac{a_4(E_0, \theta_0, \psi)}{(h-z)^2 + a^2} 2\pi adz. \end{aligned}$$

Используя функцию Хэвисайда $H(\alpha - \alpha_{rp})$, можно записать решение единым интегралом:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{ал.нат}} &= \int_0^h \int_a^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{N_0 R}{\pi(l^2 + z^2)} dR d\alpha \times \\ &\times \frac{\exp\{-\mu_0 [l-l'H(\alpha - \alpha_{rp})] \sqrt{(z/l)^2 + 1}\} \cdot a_4(E_0, \theta_0, \psi)}{(h-z)^2 + a^2} 2\pi adz. \end{aligned} \quad (6)$$

Для проверки полученной формулы были проведены расчеты методом Монте-Карло с использованием программы для нейтронно-физических расчетов SERPENT [14]. Расчет проводился в односкоростном приближении с равномерно распределенным источником изотропного излучения. Геометрическая модель, заданная в SERPENT, показана на рис. 5.

В модельном расчете в качестве защитного материала использовался алюминий, а источник задавался моноэнергетическим с энергией гамма-квантов равной 1.25 МэВ. Для получения потока гамма-квантов на оси канала на выходе из защиты в модели задавался малый конечный объем, достаточный для регистрации гамма-квантов, вылетевших из источника. Результаты модельных расчетов, а также расчетов по аналитическим формулам представлены в табл. 1. Значения физических свойств алю-

миния $a(E_0, \theta_0, y)$ и $\mu_0(E_0)$ взяты из [8].

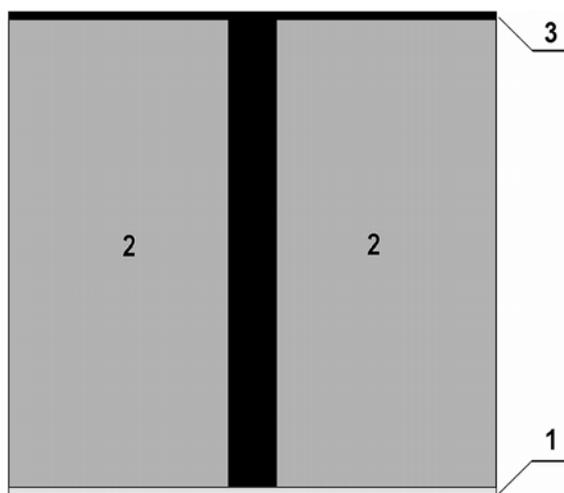


Рис. 5. Модель геометрии в SERPENT: 1 – область, в которой задавался источник единичной мощности; 2 – материал защитной композиции; 3 – области, не содержащие материала

Результаты расчётов по программе Serpent и по аналитическим формулам

Таблица 1

$a, \text{ см}$	$h, \text{ см}$	$\Sigma\Phi_{\text{Serpent}}, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\Sigma\Phi_{\text{аналит.}}, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\varepsilon = [(\Sigma\Phi_{\text{аналит.}} - \Sigma\Phi_{\text{Serpent}}) / \Sigma\Phi_{\text{Serpent}}] \cdot 100, \%$
15	135	0.011	0.01	-9.1
15	270	$3.501 \cdot 10^{-3}$	$2.291 \cdot 10^{-3}$	-34.6
30	135	0.037	0.036	-2.7
30	405	$5.252 \cdot 10^{-3}$	$3.875 \cdot 10^{-3}$	-26.2
10	200	$2.241 \cdot 10^{-3}$	$1.968 \cdot 10^{-3}$	-12.2

Проанализируем полученные результаты.

- Сравнение потоков, полученных аналитически и методом Монте-Карло, показало, что аналитический результат дает всегда меньшие значения.
- Минимальные погрешности получаются в случае, когда неоднородность большая и основной вклад в формирование потока вносит компонент прямой видимости. При увеличении влияния составляющих натекания погрешность увеличивается, что обусловливается нарушением корректности допущений, принятых при выводе аналитических формул.

Оценим вклад составляющей альbedo натекания в суммарную плотность потока ионизирующего излучения в точке детектирования. Ниже будут представлены расчеты для частного случая.

Источник моноэнергетического ионизирующего излучения – ^{60}Co ; отражающая поверхность – алюминий. Значения $a_{\text{ч}}(E_0, \theta_0, y)$ взяты из [8]. Поверхностная мощность источника $N_0 = 1\text{с}^{-1}$. Расчетные формулы для вычисления составляющих прямой видимости ($\Phi_{\text{пр.вид}}$), натекания ($\Phi_{\text{нат}}$) и альbedo прямой видимости ($\Phi_{\text{ал.пр.вид}}$) взяты из источника [9]. Результаты расчета для точки детектирования, распложенной на оси канала на высоте h , приведены в табл. 2.

Проанализируем результаты, представленные в этой таблице.

- Для веществ с высоким μ_0 вклад составляющих натекания на порядки меньше, чем от составляющих прямой видимости.

- При увеличении высоты h вклад альbedo натекания может как уменьшаться, так увеличиваться.
- При уменьшении размера a значение потока прямой видимости падает интенсивнее, чем значение потока альbedo натекания, что увеличивает вклад последнего в суммарный поток.

Таблица 2

**Расчет отдельных составляющих
плотности потока ионизирующего излучения**

a , см	h , см	μ_0 , см ⁻¹	$\Phi_{\text{пр. вид.}}$, см ⁻² с ⁻¹	$\Phi_{\text{нат.}}$, см ⁻² с ⁻¹	$\Phi_{\text{ал. пр. вид.}}$, см ⁻² с ⁻¹	$\Phi_{\text{ал. нат.}}$, см ⁻² с ⁻¹	$\frac{\Phi_{\text{ал. нат.}}}{\Sigma\Phi}$
15	350	0.3	$9.18 \cdot 10^{-4}$	$3.93 \cdot 10^{-6}$	$1.786 \cdot 10^{-4}$	$7.451 \cdot 10^{-5}$	0.063
5	350	0.3	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$1.087 \cdot 10^{-9}$	$6.795 \cdot 10^{-6}$	$1.462 \cdot 10^{-5}$	0.118
5	115	0.3	$9.443 \cdot 10^{-4}$	$5.759 \cdot 10^{-5}$	$1.856 \cdot 10^{-4}$	$2.44 \cdot 10^{-4}$	0.17
30	350	0.3	$3.66 \cdot 10^{-3}$	$5.341 \cdot 10^{-5}$	$1.17 \cdot 10^{-3}$	$2.043 \cdot 10^{-4}$	0.04
15	115	0.3	$8.435 \cdot 10^{-3}$	$5.265 \cdot 10^{-4}$	$3.104 \cdot 10^{-3}$	$9.932 \cdot 10^{-4}$	0.076
15	115	3	$8.435 \cdot 10^{-3}$	$8.383 \cdot 10^{-6}$	$3.104 \cdot 10^{-3}$	$9.452 \cdot 10^{-5}$	0.0081
5	350	3	$1.02 \cdot 10^{-4}$	0	$6.795 \cdot 10^{-6}$	$1.377 \cdot 10^{-6}$	0.012

Таким образом, учет альbedo натекания важен в случае малых каналов в защите с «низкими» значениями μ_0 . Для частного случая из приведенного примера альbedo натекания может составлять 17% от общего потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на стремительное развитие численных методов в вопросах расчета радиационной обстановки аналитические решения все еще находят применение в первоначальных оценочных расчетах радиационных полей, при исследовании зависимостей получаемых потоков ионизирующего излучения, а также для верификации программных комплексов [10 – 14]. В области процессов переноса ионизирующих излучений, особенно в структурах сложной геометрии (в частности, при наличии неоднородностей) с резкими изменениями количественных характеристик взаимодействия излучения с веществом, численные решения в большинстве случаев не дают ясного (физически прозрачного) понимания закономерностей формирования функционалов полей ионизирующих излучений. Поэтому с точки зрения формирования четких и правильных представлений о закономерностях процессов распространения ионизирующих излучений возможность получения аналитических решений имеет важнейшее учебно-методическое значение. Это обстоятельство чрезвычайно важно для подготовки специалистов по расчетам защиты от ионизирующих излучений. В работе было получено и проанализировано аналитическое решение для составляющей альbedo натекания. Показано, что эта составляющая может быть важна при определенных параметрах канала и должна учитываться при расчете радиационной обстановки.

Литература

1. Гусев Н.Г и др. Защита от ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512с.
2. Николаев А.И. Новый подход к классификации неоднородностей и систематизации экспериментов по прохождению ионизирующих излучений через неоднородности в защите. Препринт ФЭИ-1726. – Обнинск: ФЭИ, 1985. – 12 с.

3. Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях. / Сб. материалов юбилейной X Российской научной конференции, 22-25 сентября 2015 г., Москва, Обнинск. Под общ. ред. Л.А. Большова. – М.:ООО «САМ Полиграфист», 2015. – 142 с.
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Расчетно-экспериментальное исследование однородных защит от гамма-излучения. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2015. – № 3 (77). – С. 26-38.
5. Бухтоярова Е.С., Семеняк В.И. Ионизирующие излучения и обеспечение радиационной безопасности. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2015. – № 2-3 (22-23). – С. 27-33
6. Зинченко В.Ф., Романенко А.А., Фигуров В.С., Улимов В.Н. Проблемы радиационных испытаний. // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2010. – Вып. 2. – С. 5-7.
7. Мемарианфард М.Е. Эффективные бетоны для биологической защиты реакторов типа ВВЭР-1000. // Вестник МГСУ. – 2009. – № 2. – С. 131-135.
8. Машкович В.П. Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
9. Золотухин В.Г., Золотухин В.А., Климанов В.А., Лейпунский А.И. и др. Прохождение излучений через неоднородности в защите. Под ред. д-ра физ.-мат. наук проф. А.И. Лейпунского, канд. техн. наук доц. В.П. Машковича. – М.: Атомиздат, 1968. – 335 с.
10. Robert C.P., Casella G. Monte Carlo Statistical Methods. – 2-nd edition. – Springer, 2004. – 683 pp.
11. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973. – 312 с.
12. Гомин Е.А. Статус МСУ-4. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2006. – Вып. 1. – С. 6-32.
13. RSICC Computer Code Collection. MCNP4C. Monte Carlo N-Particle Transport Code System. – New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2000.
14. Leppanen Jaakko. PSG2/SERPENT – A Continious Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. – Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. Электронный ресурс: <http://montecarlo.vtt.fi> (дата обращения – 22.09.2020).

Поступила в редакцию 29.09.2020 г.

Авторы

Куприянов Кирилл Сергеевич, студент
E-mail: bdf-1@mail.ru

Перевезенцев Владимир Васильевич, профессор, д-р. техн. наук
E-mail: vladimirperezencev@rambler.ru

UDC 621.039

ANALYTICAL MODEL FOR DETERMINING THE LEAKAGE ALBEDO COMPONENT FOR A DIRECT CYLINDRICAL CHANNEL PASSING THROUGH THE NUCLEAR REACTOR PROTECTIVE LAYERKupriyanov K.S., Perevezentsev V.V.Bauman Moscow State Technical University
5/1 Baumanskaya 2-ya Str., 105005 Moscow, Russia

ABSTRACT

The task of determining the radiation situation, including neutron and gamma-quantum flux density, radiation spectrum, specific volumetric activity of radioactive gases in the air, etc. behind the protective composition having inhomogeneities, has always been important in matters of radiation safety. One of the ways to solve the problem of determining gamma radiation fluxes was to divide the total ionizing radiation flux into four components: line-of-sight, leakage, line-of-sight albedo, and leakage albedo, and obtain an analytical solution for each component. The first three components have been studied in detail in relation to simple geometries and there are analytical solutions for them, but there is no such a solution for the last component. The authors of this work have derived an analytical representation for the leakage albedo component, which, in contrast to numerical methods (such as Monte Carlo methods), makes it possible to analyze the effect of inhomogeneities in protective compositions on the radiation environment as well as to quickly obtain estimated values of fluxes and dose rates. Due to a component-by-component comparison, it becomes possible to single out the most significant mechanisms of the dose load formation behind the nuclear reactor protection, to draw conclusions about the effectiveness of design solutions in the protection design and to improve the protection at significantly lower computational costs. Finally, the authors present calculations for the four components of the total ionizing radiation flux for various parameters of the cylindrical inhomogeneity in the reactor shield. On the basis of the obtained values, conclusions are made about the importance of taking into account the leakage albedo component in the formation of the radiation situation behind the core vessel.

Key words: leakage albedo, inhomogeneities in radiation protection.

REFERENCES

1. Gusev N.G. et al. *Protection from Ionizing Radiation*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, 512 p. (in Russian).
2. Nikolaev A.I. *New Approach to Classification of Heterogeneities and Systematization of Experiments on the Passage of Ionizing Radiation through Heterogeneities in Protection*. Preprint FEI-1726. Obninsk. FEI Publ., 1985, 12 p. (in Russian).
3. Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technology. *Proc. of the Xth Anniversary Russian Scientific Conference, September 22-25, 2015, Moscow, Obninsk*. Under general ed. by L.A. Bolshov. Moscow. Sam Polygraphist Publ., 2015, 142 p. (in Russian).
4. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Khomyakov A.P., Russkikh I.M., Seleznev E.N. Calculated-Experimental Study of Homogeneous Protections against Gamma-Radiation. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost'*. 2015, no. 3 (77), pp. 26-38 (in Russian).
5. Bukhtoyarova E.S., Semenyak V.I. Ionizing Radiation and Radiation Safety. *Chrezvychajnye Situatsii: Promyshlennaya i Ekologicheskaya Bezopasnost'*. 2015, no.

2-3 (22-23), pp. 27-33 (in Russian).

6. Zinchenko V.F., Romanenko A.A., Figurov V.S., Ulimov V.N. Problems of Radiation Testing. *VANT. Ser.: Fizika Radiatsionnogo Vozdejstviya na Radioelektronnyu Apparaturu*. 2010, iss. 2, pp. 5-7 (in Russian).

7. Memarianfard M.E. Effective Concretes for Biological Protection of VVER-1000-type Reactors. *Vestnik MGSU*. 2009, no. 2, pp. 131-135 (in Russian).

8. Mashkovich V.P. Kudryavtseva A.V. *Protection From Ionizing Radiation: Handbook* – 4-th ed., rev. and suppl. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1995, 496 p. (in Russian).

9. Zolotukhin V.G., Zolotukhin V.A., Klimanov V.A., Leypunsky A.I. et al. *Radiation Transmission through Inhomogeneities in Protection*. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 335 p. (in Russian).

10. Robert C.P., Casella G. *Monte Carlo Statistical Methods*. 2-nd edition. Springer, 2004. – 683 pp.

11. Sobol' I.M. *Numerical Monte Carlo Methods*. Moscow. Nauka Publ., 1973, 312 p. (in Russian).

12. Gomin E.A. Status of MCU-4. *VANT. Ser.: Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2006, iss. 1, pp. 6-32 (in Russian).

13. RSICC computer code collection. *MCNP4C. Monte Carlo N-Particle Transport Code System*. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2000.

14. Leppanen Jaakko. *PSG2/SERPENT – A Continuous Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code*. Helsinki. VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. Available at: <http://montecarlo.vtt.fi> (accessed Sep. 22, 2020).

Authors

Kuprianov Kirill Sergeevich, Student

E-mail: bdf-1@mail.ru

Perevezencev Vladimir Vasilievich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: vladimirperevezencev@rambler.ru