



*Российская Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



**NUCLEAR SAFETY  
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2022-01

Preprint IBRAE-2022-01

**Ю. Е. Ванев**

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ФАКТОРОВ  
НАКОПЛЕНИЯ ДЛЯ БЕСКОНЕЧНОЙ СРЕДЫ  
ПО ПРЕЦИЗИОННОЙ ПРОГРАММЕ  
В СРАВНЕНИИ СО СПРАВОЧНЫМИ  
ДАНЫМИ**

УДК 621.039.58

**Ванеев Ю. Е.** Результаты расчетов факторов накопления для бесконечной среды по прецизионной программе в сравнении со справочными данными. Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2022-01 — Москва: ИБРАЭ РАН, 2022. — 13 с. — Библиогр.: 19 назв. — 44 экз. — ISBN 978-5-6041296-9-2

Аннотация

Приведены результаты расчетов факторов накопления в задачах с точечными и плоскими изотропными источниками гамма-излучения в бесконечной среде из железа с использованием прецизионной программы TDMCC. Выявлены области значений энергии и оптической толщины среды, при которых относительные отклонения расчетных и справочных значений факторов накопления заключены в интервале  $\pm 1\%$ . Вне этих областей отмечены существенные занижения (до 90%) расчетных значений факторов накопления, что связано с различиями в константах взаимодействия гамма-излучения при получении справочных данных и расчетах по программе TDMCC. При проведении верификации программ расчета параметров защиты от гамма-излучения рекомендованы соотношения для корректного сравнения получаемых значений факторов накопления со справочными данными.

ISBN 978-5-6041296-9-2

©ИБРАЭ РАН, 2022

**Vaneyev Yu. E.** Results of the Build-up Factors Calculations using the precision code for the Infinite Medium Compared to Referenced Data. Preprint IBRAE-2022-01. — Moscow : Nuclear Safety Institute, 2022. — 13 p. — Bibliogr.: 19 items. — ISBN 978-5-6041296-9-2

Abstract

The results of build-up factors calculations in the tasks with point and flat isotropic gamma radiation sources in the infinite medium of iron using the precision code TDMCC are presented. The ranges of energy and optical thickness values are detected where relative deviations of calculated and referenced build-up factors are within  $\pm 1\%$ . Outside those ranges, sufficient understating of calculated build-up factors values (up to 90%) is found, connected to differences in gamma radiation interaction constants when getting referenced data and calculations by TDMCC code. The relations for correct comparison of calculated build-up factors with referenced data are recommended during a verification of code for gamma radiation shield parameters calculation.

©Nuclear Safety Institute, 2022

# РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ФАКТОРОВ НАКОПЛЕНИЯ ДЛЯ БЕСКОНЕЧНОЙ СРЕДЫ ПО ПРЕЦИЗИОННОЙ ПРОГРАММЕ В СРАВНЕНИИ СО СПРАВОЧНЫМИ ДАННЫМИ

Ю. Е. Ванеев

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52  
тел.: (495) 955-22-68, эл. почта: [yuvan@ibrae.ac.ru](mailto:yuvan@ibrae.ac.ru)

## Содержание

Введение .....	3
1. Определения величин и особенности расчетных алгоритмов.....	4
2. Точечный изотропный источник в бесконечной среде.....	6
3. Плоский изотропный источник в бесконечной среде .....	9
5. Анализ и обобщение результатов .....	10
Заключение .....	11
Список литературы .....	12
Приложение .....	13

## Введение

Наряду с прецизионными программами, в которых реализовано решение уравнения переноса гамма-излучения методами Монте-Карло (например, MCNP [1], MCU-FR [2], TDMCC [3]) и дискретных ординат (например, РАДУГА [4], КАТРИН [5], ОДЕТТА [6]), при прогнозировании радиационной обстановки на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) используют инженерные программы, основанные на формализме факторов накопления (ФН), для оперативных оценок мощности дозы при обращении с источниками гамма-излучения. Среди зарубежных программ такого класса наиболее востребована программа MicroShield [7], используется также программа Mercurad [8]. Отечественный аналог – программа БРИЗ [9] находится в стадии апробации и подготовки к аттестации.

В указанных инженерных программах функционал от нерассеянной компоненты излучения (например, мощность дозы) вычисляется по аналитическим формулам, а вклад рассеянного излучения учитывается введением множителя – фактора накопления, как правило, для точечных изотропных источников в бесконечных средах. Значения этих ФН получены в 80-е годы прошлого века, приведены в ряде зарубежных работ [11,12] и обобщены в популярном среди инженерно-технического персонала справочнике [13] (далее - Справочник) авторов Машковича В.П. и Кудрявцевой А.В. При этом набор доступных конфигураций в системе «источник излучения-защита» ограничен плоской геометрией защиты и элементарными источниками в виде точки, линии, плоскости или тела-примитива (шар, цилиндр, параллелепипед, конус).

В данной работе приведены результаты исследований в обоснование разрабатываемого подхода к оперативным расчетам мощности дозы гамма-излучения, отличного от традиционного, обеспечивающего возможность расчета нерассеянной компоненты и факторов накопления для более широкого набора конфигураций «источник-защита», используя возможности монте-карловских программ.

На начальном этапе разработки проводится сравнение ФН из Справочника и ФН, полученных с использованием программы TDMCC, с целью оценки степени различия этих величин и бытующего представления о консерватизме справочных данных. Актуальность этой работы подтверждается использованием справочных данных по ФН для верификации программ для ЭВМ при расчетах мощности дозы гамма-излучения в задачах обоснования радиационной безопасности ОИАЭ [14]. На основании проведенных исследований выданы рекомендации по корректному сравнению справочных значений ФН и вычисляемых по верифицируемой программе.

# 1. Определения величин и особенности расчетных алгоритмов

Дозовый фактор накопления  $B_D$  определяют как отношение мощности дозы  $D$  к ее доле  $D_0$ , обусловленной нерассеянным излучением

$$B_D = D/D_0 \quad . \quad (1)$$

В частном случае, для точечного изотропного моноэнергетического (с энергией  $E_0$ ) источника в бесконечной однородной среде из материала  $M$ , выражение для нерассеянной компоненты поглощенной дозы  $D_0$  на расстоянии  $r$  имеет вид

$$D_0 = v(E_0, M) \cdot e^{-\mu(E_0, M) \cdot r} / 4\pi r^2, \quad (2)$$

где  $v(E_0, M)$  – коэффициенты преобразования флюенса гамма-квантов в дозу ( $v_D, v_K$  – для поглощенной дозы и кермы, Гр·см<sup>2</sup>;  $v_H$  – для эквивалентной дозы, Зв·см<sup>2</sup> и др.);

$\mu(E_0, M)$  – линейный коэффициент ослабления излучения с энергией  $E_0$  в материале  $M$ , см<sup>-1</sup>.

В общем случае в формуле (2) используется полный коэффициент ослабления  $\mu_t$ , определяемый полным сечением взаимодействия  $\sigma_t$  (см<sup>2</sup>):

$$\mu_t = \rho \cdot \sigma_t \cdot N_A / A \quad , \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность материала, г·см<sup>-3</sup>,

$N_A$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;

$A$  – относительная атомная масса, г·моль<sup>-1</sup>.

Соответствующий фактор накопления обозначим  $B_t$ .

Однако в Справочнике приведены значения факторов накопления  $B_{cnp}$  с нерассеянной компонентой, полученной без учета когерентного рассеяния, т.е. при значениях коэффициента ослабления

$$\mu_{t-ког} = \mu_t - \mu_{ког} \quad , \quad (4)$$

где линейные коэффициенты  $\mu_{ког}$  и  $\mu_{t-ког}$  связаны с сечением когерентного рассеяния  $\sigma_{ког}$  и разностью сечений  $\sigma_t - \sigma_{ког}$  в соответствии с формулой (3).

Таким образом, можно рассматривать две модификации определения (1) для факторов накопления:

$$B_D = B_t = D/D_0 \quad - \text{при расчете } D_0 \text{ с учетом когерентного рассеяния и} \quad (5)$$

$$B_{D-ког} = B_{cnp} = D/D_{0-ког} \quad - \text{при расчете } D_0 \text{ без учета когерентного рассеяния} \quad (6)$$

(как принято в Справочнике).

Для точечного изотропного (и плоского мононаправленного) источника в бесконечной среде соотношение между факторами накопления в указанных двух вариантах определения  $\Phi H$  ( $B_t^T$  и  $B_{cnp}^T$ ) имеет вид (на расстоянии  $r$  от источника)

$$B_t^T(r) / B_{cnp}^T(r) = \exp(\mu_{ког} \cdot r) \quad . \quad (7)$$

Аналогичное соотношение для плоского изотропного источника в бесконечной среде (на расстоянии  $d$  от источника по нормали) в двух вариантах определения  $\Phi H$  ( $B_t^{III}$  и  $B_{cnp}^{III}$ ):

$$B_t^{III}(d) / B_{cnp}^{III}(d) = E_1(\mu_{t-ког} \cdot d) / E_1(\mu_t \cdot d) \quad ; \quad (8)$$

где  $E_I(\mu d) = \int_{\mu d}^{\infty} \exp(x) / x dx$  – интегральная экспонента.

Значения ФН могут быть получены с использованием монте-карловских программ, например, TDMCC или MCU-FR, в состав которых входит одна и та же библиотека констант EPDL97 [15]. В таблице 1 приведены значения линейных коэффициентов ослабления и когерентного рассеяния из этой библиотеки в сравнении с аналогичными величинами из Справочника для железа плотностью 7,86 г/см<sup>3</sup> ( $\Delta$  - относительные отклонения расчетных значений от справочных, %). Как следует из таблицы 1, полные коэффициенты ослабления отличаются незначительно при энергиях фотонов  $E_0 > 0,2$  МэВ, тогда как при  $E_0 \leq 0,2$  МэВ справочные данные занижены на (1-1,5)%. Сечения когерентного рассеяния из Справочника при  $E_0 \leq 3$  МэВ занижены на (3-8)% относительно данных из библиотеки EPDL97. При  $E_0 \geq 3$  МэВ доля когерентного рассеяния пренебрежимо мала. Эта доля возрастает при уменьшении  $E_0$ , например, при  $E_0 = 0,1$  МэВ она составляет 10% от полного коэффициента ослабления.

На всем интервале рассматриваемых значений энергии  $\mu_t^{EPDL} > \mu_t^{сп}$ , кроме энергий 0,3 МэВ и 5 МэВ. Для этих двух значений энергии есть некоторые особенности и в соотношениях величин  $\mu_{t-ког}^{EPDL}$  и  $\mu_{t-ког}^{сп}$ , существенно влияющих на значения ФН (см. примечания к таблице 1).

Таблица 1 – Сравнение констант для железа из библиотеки EPDL97 и «Справочника» [13]

Энергия, МэВ	Линейный коэффициент ослабления $\mu_t, \text{см}^{-1}$		Откл. $\Delta, \%$	Доля от когерентного рассеяния $\mu_{ког}, \text{см}^{-1}$		Откл. $\Delta, \%$
	EPDL97	Справочник		EPDL97	Справочник	
0,05	15,405	15,17	1,5	1,002	0,974	3
0,1	2,925	2,89	1,2	0,2981	0,2856	4,4
0,2	1,148	1,136	1,0	0,0809	0,0769	5
0,3	0,8627	0,8645	-0,2*	0,0369	0,0345	7
0,5	0,6608	0,6608	0,0	0,0135	0,0125	8
0,6	0,6046	0,6035	0,2	0,00943	0,00873	8
0,8	0,5259	0,5255	0,1	0,00532	0,00492	8
1	0,4706	0,4704	0,0	0,00341	0,00316	8
2	0,3346	0,3339	0,2	0,00086	0,00080	7,5
3	0,2840	0,2839	0,0	0,00038	0,00036	5,6
5	0,2468	0,2475	-0,3**	0,00014	0,00014	0,0
10	0,2350	0,2342	0,3	0,00003	0,00003	0,0

\*  $\Delta = -0,5\%$  для значений  $\mu_{t-ког}$

\*\*  $\mu_t^{EPDL} < \mu_{t-ког}^{сп}$

В данной работе для получения значений ФН с константами из библиотеки EPDL использована программа TDMCC, аттестованная Ростехнадзором для использования в задачах обоснования ядерной и радиационной безопасности ОИАЭ [16, 17]. Из результатов расчетов по этой программе получают значения мощности дозы  $D$  (с учетом когерентного рассеяния) и факторов накопления:

- $B_D$  (5) с коэффициентами ослабления (3) при расчете  $D_0$  или
- $B_{D-ког}$  (6) с коэффициентами ослабления (4) при расчете  $D_{0-ког}$ .

При использовании аналогового моделирования переноса гамма-квантов методом Монте-Карло для расчетов мощности дозы с приемлемыми значениями статистической погрешности и времени счета решают задачи с толщиной защиты, как правило, не более 20-25 средних длин свободного пробега (далее - дсп). Для источника на основе изотопа <sup>137</sup>Cs это соответствует толщине защиты из стали 35-44 см. При этом для 25 дсп при времени счета 100 часов на 1 процессоре с частотой 3 ГГц статистическая погрешность составляет 30% (одно стандартные отклонение).

Для больших толщин защиты (до 40 дсп в [13]) необходимо использовать неаналоговое моделирование методом Монте-Карло. Наиболее точный, но достаточно трудоемкий алгоритм предусматривает проведение предварительных расчетов распределения функции ценности с использованием детерминистских программ с последующим применением неаналоговых алгоритмов.

В данной работе использован достаточно экономичный алгоритм «расщепления-рулетки», при котором каждая частица, пересекающая выделенную поверхность в заданном направлении, «расщепляется» на одинаковое число частиц  $n$ , каждой из которых присваивается «вес»  $w/n$ , где  $w$  – текущий «вес» частицы до расщепления. При пересечении той же поверхности в обратном направлении частица уничтожается с вероятностью  $n^{-1}$ , а «вес» оставшихся частиц увеличивается в  $1/(1-n^{-1})$  раз. Результаты применения данного алгоритма (при  $n = 2$  на каждой поверхности) в расчетах факторов накопления для простейших геометрий источника и защиты приведены ниже в сравнении со справочными данными [13].

Здесь уместно еще раз акцентировать внимание на трудоемкости монте-карловских расчетов при моделировании глубокого проникновения гамма-излучения в защитные материалы и необходимости иметь возможность существенно более оперативных оценок мощности дозы в таких задачах.

В программе TDMCC предусмотрена возможность вычисления поправки на барьерность геометрии  $\delta_{бар}$ , которая определяется в Справочнике как отношение дозовых факторов накопления в барьерной геометрии  $B_{\delta}$  к дозовым факторам накопления в бесконечной среде  $B_{\infty}$ . Для этого использован алгоритм, позволяющий выделять вклады от частиц, влетающих извне через регистрирующую поверхность (при отражении от внешней среды) и после столкновений вылетающих через эту поверхность  $D_{omp}$ . Тогда на данной поверхности  $D_{\infty} - D_{omp}$  – это мощность дозы на границе с вакуумом. Поправка на барьерность вычисляется на стадии пост-обработки:

$$\delta_{бар} = (D_{\infty} - D_{omp}) / D_{\infty}, \quad (9)$$

где значения  $D_{\infty}$  и  $D_{omp}$  вычисляются на каждой регистрирующей поверхности за один пуск программы.

В разработанных расчетных моделях предусмотрена возможность одновременного вычисления нескольких дозиметрических характеристик (мощности поглощенной дозы  $D$ , мощность кермы  $K$ , мощности эквивалентной  $H$  и эффективной  $H_E$  дозы), что позволяет получать значения факторов накопления для всех этих характеристик ( $B_D, B_K, B_H, B_{H_E}$ ) также за один пуск программы.

## 2. Точечный изотропный источник в бесконечной среде

Для случая точечного изотропного источника в бесконечной среде в таблице 2 приведены расчетные значения ФН по воздушной керме  $B_K$  и  $B_{K-ког}$  при энергии  $E_0=0,6$  МэВ в материале «железо» ( $M=Fe$ ) плотностью  $7,86$  г/см<sup>3</sup> в сравнении с соответствующими данными из Справочника. При расчете мощности кермы  $K$  по программе TDMCC использованы табулированные значения кермы на единичный флюенс из Справочника. Расчеты проведены без учета вторичного излучения (флуоресцентного и тормозного); взятые данные из Справочника также не содержат вкладов от этих видов излучения. Относительная статистическая погрешность расчета  $K$  не превысила 0,1% до расстояния от источника 25 «дсп» и 0,3% до 40 «дсп» при времени счета 100 часов на 1 ядре-процессоре (реально использовалось 6 ядер). Для сохранения обозначений величин, введенных в п.2, ниже использованы замены обозначений:  $K \rightarrow D, B_K \rightarrow B_D$  и  $B_{K-ког} \rightarrow B_{D-ког}$ .

Как видно из таблицы 2, значения  $B_D$ , полученные с константами из программы TDMCC, существенно выше справочных данных  $B_{спр}$ , поскольку при расчете  $D_0$  использовали полный коэффициент ослабления  $\mu_t$ . При использовании коэффициента  $\mu_{t-ког}$  расчетные значения  $B_{D-ког}$  совпадают (в пределах  $\pm 0,7\%$ ) со справочными данными  $B_{спр}$  на расстояниях от источника до 8 «дсп» (~13 см). С дальнейшим увеличением расстояния до 40 «дсп» различие сравниваемых величин монотонно возрастает до 13% (при занижении расчетных значений).

При вычислениях  $D_{0-коз}$  можно использовать значения  $\mu_{т-коз}$  из библиотеки EPDL или из Справочника. Если эти значения близки (для заданной энергии), то соответствующие отклонения  $\Delta$  изменяются незначительно (см. табл.2); при существенных различиях наилучшие результаты (приведены ниже) получены с использованием значений  $\mu_{т-коз}^{EPDL}$ .

Таблица 2 – Сравнение расчетных факторов накопления с данными Справочника для точечного изотропного источника с  $E_0=0,6$  МэВ в бесконечной среде из железа

$\mu_{т-коз}^T$	$B_D$ ( $\mu_t = 0,6046^*$ )	$B_{сnp}$ [13]	Откл. $\Delta$ ( $B_D / B_{сnp}$ ), %	$B_{D-коз}$		Откл. $\Delta$ ( $B_{D-коз} / B_{сnp}$ ), %	
				$\mu_{т-коз}^{сnp}=0,5950^{**}$	$\mu_{т-коз}^{EPDL}=0,5952^{**}$	$\mu_{т-коз}^{сnp}$	$\mu_{т-коз}^{EPDL}$
1	1,98	1,96	1	1,96	1,96	0,1	0,1
2	3,15	3,07	3	3,09	3,09	0,6	0,6
3	4,55	4,39	4	4,41	4,41	0,3	0,4
4	6,20	5,90	5	5,92	5,93	0,2	0,3
5	8,09	7,61	6	7,62	7,63	0	0,1
6	10,2	9,51	8	9,50	9,51	-0,3	-0,1
7	12,7	11,6	9	11,6	11,6	-0,5	-0,3
8	15,3	13,9	10	13,8	13,8	-1	-0,7
10	21,5	19,0	13	18,7	18,8	-1,5	-1
15	41,8	34,8	20	33,7	33,9	-3	-2,5
20	70,0	54,8	28	52,1	52,4	-5	-4
25	107	78,8	35	73,4	74,0	-7	-6
30	153	107	43	97,6	98,1	-9	-7
35	210	138	52	123	124	-11	-10
40	279	173	61	151	153	-13	-12

\* значение использовалось при расчете  $D_0$ ; \*\* значения использовались при расчете  $D_{0-коз}$

Представленный подход к расчетам факторов накопления  $B_{D-коз}$  по программе TDMCC и выявлению их отклонений от справочных данных  $B_{сnp}^T$  применен и для ряда других значений энергии источника  $E_0$  от 0,1 до 10 МэВ. Некоторые результаты таких расчетов приведены в таблице 3. При вычислениях  $D_{0-коз}$  использованы значения  $\mu_{т-коз}^{EPDL}$ .

Как следует из этой таблицы, при увеличении энергии  $E_0$  занижения расчетных значений  $B_{D-коз}$  более, чем на 1%, начинаются со всё большего расстояния от источника, а при  $E_0 \geq 2$  МэВ систематическое занижение, превышающее 1%, отсутствует. Для объяснения этих результатов можно предположить, что при уменьшении  $E_0$  возрастает доля мощности дозы от фотонов с энергиями меньше 0,2 МэВ, для которых значения коэффициентов ослабления в библиотеке EPDL97 больше, чем приведенные в Справочнике (см. таблицу 1).

При  $E_0 \geq 2$  МэВ отмечается высокая чувствительность результатов к изменению значений  $\mu_{т-коз}$ , о чем свидетельствуют данные в крайнем правом столбце таблицы 3, где приведены значения  $\Delta$  при изменении  $\mu_{т-коз}$  ( $E_0 = 10$  МэВ) всего на 0,3%. Аналогично для энергий  $E_0 = 5$  МэВ и 3 МэВ при изменении  $\mu_{т-коз}$  всего на 0,1% значения  $\Delta$  входят в интервал  $\pm 0,5\%$  до 40 «дсп». Приведенные вариации коэффициентов ослабления существенно меньше уровня константной погрешности ( $\pm 2\%$  [13]).

На основе результатов расчетов факторов накопления бесконечной среды из железа  $B_{D-коз}(\mu r)$ ,  $\mu r = 0,5; 1; 2...40$  для значений энергии  $E_0$  от 0,1 до 3 МэВ (12 значений из Справочника) получена матрица коэффициентов превышения справочных значений над расчетными

$$k_B^T(E_0, \mu r) = B_{сnp}^T(E_0, \mu r) / B_{D-коз}(E_0, \mu r), \quad (10)$$

при этом ячейкам таблицы 3 с белыми полями и со значениями  $E_0 = 3$  МэВ, 5 МэВ и 10 МэВ соответствуют  $k_B^T(E_0, \mu r) = 1$ .

При энергиях  $E_0 < 3$  МэВ вклад тормозного излучения пренебрежимо мал, а при энергиях  $E_0 \geq 3$  МэВ можно воспользоваться справочными значениями  $B_{спр+тор}^T$ , полученными с учетом тормозного излучения, и дополнить матрицу коэффициентов  $k_B(E_0, \mu r)$  и в этой области энергий (еще 6 значений  $E_0$ )

$$k_B^T(E_0 \geq 3 \text{ МэВ}, \mu r) = B_{спр+тор}^T / B_{спр}^T \quad (11)$$

Таблица 3 – Относительные отклонения  $\Delta$  (%) расчетных значений факторов накопления от справочных [13] для точечного изотропного источника в бесконечной среде из железа плотностью 7,86 г/см<sup>3</sup>

$\mu_{t-коз} r$	Энергия $E_0$ , МэВ											
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1	2	3	5	10 0,2349*	10 0,2342
0,5	-0,4	0,1	-0,3	-0,1	0,2	0,1	-0,1	0	0,2	0,2	0,0	-0,2
1	-0,4	0,3	0,2	-0,1	0,1	0	0	0,3	0,1	0,3	0,5	0,2
2	-1,7	0,5	0,5	0,4	0,6	0,1	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,0
3	-4	-0,2	0,2	0,5	0,4	0,1	0	0,1	0,6	0,3	1	0,0
4	-6	-1	-0,2	0,3	0,3	0	-0,1	0,2	0,7	0,3	1,3	0,1
5	-8	-2	-0,3	0,1	0,1	-0,1	-0,2	0,2	0,7	0,4	1,4	-0,2
6	-11	-3	-0,5	0	-0,1	-0,2	-0,2	0,1	0,8	0,6	1,7	-0,2
7	-13	-4	-0,8	0,5	-0,3	-0,6	-0,3	0,1	0,9	0,6	2	-0,2
8	-16	-5	-1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	0,1	1	0,6	2,4	-0,2
10	-21	-8	-2	-1	-1	-0,9	-0,9	0,2	1	0,9	3	0
15	-34	-14	-5	-3	-2,5	-2	-2	-0,2	1,6	0,9	5	0,2
20	-45	-21	-7	-5	-4	-3	-3	-0,2	2	1,5	7	0,3
25	-55	-27	-11	-7	-6	-4	-4	-0,3	2	2	9	0,9
30	-64	-34	-13	-9	-7	-5	-4	-0,5	3	2	11	1
35	-71	-40	-18	-11	-10	-7	-5	-0,7	4	3	13	1
40	-77	-46	-21	-13	-12	-8	-6	-0,9	5	4	15	1

\*  $\mu_{t-коз}^{(EPDL)}$

Результирующая матрица из 18x41 значений коэффициентов  $k_B^T(Fe, E_0, \mu r)$  для кермы в воздухе от точечного изотропного источника в бесконечной среде из железа приведена в Приложении А. Для вычисления этой величины в промежуточных точках по  $E_0$  и  $\mu r$  можно использовать линейную интерполяцию.

Результаты вычислений поправки на барьерность геометрии  $\delta_{бар}^T(Fe, E_0, \mu r)$  в соответствии с формулой (9) для нескольких энергий  $E_0$  в сравнении с данными Справочника приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения поправки на барьерность  $\delta_{бар}^T$  на различных расстояниях от точечного изотропного источника в среде из железа в сравнении с данными Справочника

$E_0$ , МэВ	Оптическое расстояние $\mu r$			Данные [13]
	1	1 – 40	40	
0,6	0,923	0,881*	0,874	0,879
0,8	0,933	0,889*	0,880	0,893
1,0	0,941	0,896*	0,888	0,903
2,0	0,958	0,922*	0,916	0,929

\* Средние значения в интервале (1-40)  $\mu r$

Таким образом, полученные результаты для точечного изотропного источника позволяют записать корректные выражения для вычисления мощности дозы  $D$  (при заданных значениях  $E_0$  и  $r$ ) на основе величины  $D_0$  ( $\mu_t^{EPDL} r$ ) и фактора накопления  $B_{cnp}^T$  ( $\mu_{t-коз} r$ ) из Справочника:

$$- \text{ для бесконечной среды } D = D_0 \cdot COR^T \cdot B_{cnp}^T, \quad (12)$$

$$- \text{ для среды с барьерной геометрией } D = D_0 \cdot COR^T \cdot B_{cnp}^T \cdot \delta_{бар}^T, \quad (13)$$

$$\text{ где корректирующий множитель } COR^T = \exp(\mu_{коз} r). \quad (14)$$

При этом значения  $D$ , получаемые из (12)-(13) будут в  $k_B^T$  раз больше, чем значения  $D_{МС}$  непосредственно из расчета по программе TDMCC без учета вторичного излучения и с константами из библиотеки EPDL97, отличающимися от констант, с которыми получены значения ФН в [11].

### 3. Плоский изотропный источник в бесконечной среде

С использованием программы TDMCC получены значения факторов накопления  $B_{D-коз} = D/D_{0-коз}$  по керме в воздухе для плоского изотропного источника гамма-излучения в бесконечной гомогенной среде из железа для сравнения со справочными данными.

Регистрировалась мощность дозы (кермы)  $D$  на плоских поверхностях, расположенных с шагом  $d_1$ , равным средней длине свободного пробега фотона с энергией  $E_0$ :  $d_1(E_0) = \mu_{t-коз}^{-1} (E_0)$ . Значения нерассеянной компоненты  $D_{0-коз}$  на тех же поверхностях определяли из расчета по программе TDMCC при изменении плотности материала  $\rho$  на  $\rho \cdot \mu_{t-коз} / \mu_t$ , где значения  $\mu_t$  и  $\mu_{t-коз}$  брались из библиотеки EPDL.

В таблице 5 приведены расчетные и справочные значения факторов накопления бесконечной среды из железа плотностью  $7,86 \text{ г/см}^3$  для нескольких значений энергии  $E_0$ .

Таблица 5 – Относительные отклонения  $\Delta$  (%) расчетных значений факторов накопления от справочных [13] для плоского изотропного источника в бесконечной среде из железа плотностью  $7,86 \text{ г/см}^3$

$\mu_{t-коз} d$	Энергия $E_0$ , МэВ						
	0,1	0,2	0,6	0,8	1	2	5
1	-6	-5	-2	-2	-3	-3	-5
2	-15	-14	-10	-10	-10	-9	-9
3	-21	-20	-15	-14	-14	-13	-11
4	-27	-24	-18	-17	-17	-15	-13
5	-31	-27	-20	-19	-19	-17	-14
6	-35	-29	-22	-21	-21	-19	-15
7	-38	-31	-23	-23	-22	-20	-16
8	-42	-33	-25	-24	-23	-21	-16
10	-48	-37	-27	-26	-25	-22	-16
15	-60	-44	-30	-29	-27	-25	-16
20	-69	-50	-32	-30	-29	-25	-14
25	-76	-55	-34	-32	-29	-26	-13
30	-82	-60	-35	-33	-29	-26	-12
35	-87	-64	-36	-34	-30	-25	-10
40	-89	-68	-37	-34	-30	-25	-9

В сравнении с отклонениями расчетных и справочных значений ФН для точечного изотропного источника (см. табл. 3), в данном случае занижение расчетных значений для всех  $E_0$  начинается уже с первого «пробега» ( $\mu d = 1$ ) и увеличивается с расстоянием от источника.

Аналогично задаче с точечным источником в задаче с плоским источником могут быть вычислены (наряду с факторами накопления) матрицы коэффициентов  $k_B^{II}(E_0, \mu d)$  и поправок на барьерность  $\delta_{бар}^{II}(E_0, \mu d)$  для различных защитных сред.

Сравнение зависимостей коэффициентов  $k_B(FE, E_0=0,6, \mu r)$  от оптического расстояния  $\mu r = \mu d$  для двух рассмотренных типов источников приведено на рисунке.

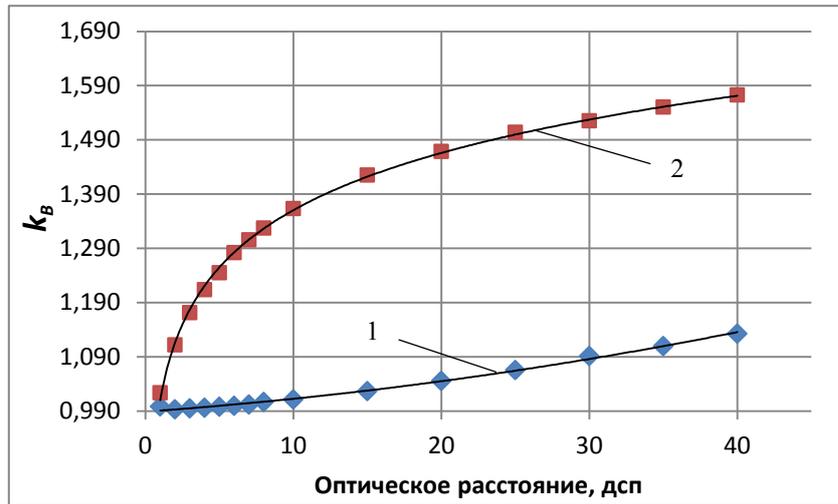


Рисунок – Зависимости коэффициентов  $k_B$  от оптического расстояния до точечного (1) и плоского (2) изотропных источников с энергией  $E_0=0,6$  МэВ в бесконечной среде из железа; маркеры соответствуют расчетным значениям, непрерывные линии – результаты их аппроксимации

Для вычисления мощности дозы  $D$  (при заданных значениях  $E_0$  и  $d$ ) справедливы формулы (12) и (13) с подстановками вместо  $B_{ср}^T$  величины  $B_{ср}^{II}$  и вместо  $\delta_{бар}^T$  величины  $\delta_{бар}^{II}$  при значении корректирующего множителя

$$COR^{II} = E_1 (\mu_{t-coh} \cdot d) / E_1 (\mu_t \cdot d) . \quad (15)$$

## 5. Анализ и обобщение результатов

Для точечного изотропного источника в бесконечной железной среде получены небольшие (в пределах  $\pm 1\%$ ) относительные отклонения расчетных значений ФН( $E_0, \mu r$ ) от приведенных в [13] при  $E_0$  и  $\mu r$ , соответствующих белым полям в таблице 2 и со значениями  $E_0 \geq 3$  МэВ. В то же время, отмечены систематические занижения расчетных ФН при  $E_0 < 2$  МэВ с существенными занижениями (до 50-80%) при  $E_0 < 0,2$  МэВ. Из этого следует вывод о существенных различиях в константах (особенно в низкоэнергетической области до 0,01 МэВ) при расчете величины  $D$  в программе TDMCC (с библиотекой EPDL97 от 1997 года) и в программах авторов публикаций: [11] от 1980 года (расчеты  $B_{\infty}^T$ ) и [12] от 1984 года (расчеты  $B_{\infty}^{II}$ ), чьи результаты приведены в [13].

Как показали результаты расчетов нерассеянной компоненты  $D_{0-коз}$  с вариациями коэффициентов ослабления  $\mu_{t-коз}$ , отмеченные различия ФН в низкоэнергетической области не ликвидируются. Эти различия в большей степени влияют на величину рассеянной компоненты излучения, о чем косвенно свидетельствуют полученные результаты для плоского изотропного источника в той же среде с нарастающими с глубиной занижениями (до 90%) расчетных ФН относительно справочных

(см. таблицу 3). Поскольку доля рассеянного излучения для плоского источника больше, чем для точечного ( $B^{III}(E_0, \mu r) > B^T(E_0, \mu d)$ ), то и эффект проявляется сильнее.

В дальнейшем планируется провести расчеты ФН по программе TDMCC с измененными сечениями, взятыми из Справочника, а также расчеты по другим программам, использующим отличные от EPDL97 библиотеки констант (например, MCNP, SCALE [19]).

При реализации заявленного подхода, основанного на использовании программы TDMCC для расчетов «нерассеянной» компоненты гамма-излучения, с последующим умножением результатов на факторы накопления, предполагается использовать данные либо из Справочника для точечного и плоского источников, либо из новой библиотеки ФН, формируемой из результатов предварительно проведенных расчетов по той же программе TDMCC модельных задач с более сложными конфигурациями системы «источник-защита». При этом будут использованы все возможности программы TDMCC по заданию исходных данных, в частности, элементного состава материалов, параметров двух- или трех- мерной геометрии системы, пространственных и энергетических распределений источников излучения. Кроме того, поскольку расчетные модели для определения нерассеянной компоненты  $D_0$  и суммарной величины  $D$  по программе TDMCC совпадают, то для некоторых (типовых) модельных задач можно корректно оценивать погрешности приближенных расчетов с использованием ФН и сохранять эти результаты для обобщения и дополнения библиотеки ФН.

В настоящее время при использовании программы TDMCC для расчетов ФН гамма-излучения необходимо принимать во внимание ограничения на толщины защитных материалов, приведенные в действующем аттестационном паспорте [17]: при толщине железа 25 см обеспечивается погрешность расчета мощности дозы от гамма-излучения изотопов  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$   $\pm 15\%$  (10-14 «дсп»); при толщине 30 см –  $\pm 22\%$  (13-17 «дсп»). При этом погрешности расчета имеют смысл максимальных отклонений от экспериментальных данных. Для больших толщин железа программа не аттестована; в этих случаях оправданным является выбор ФН из Справочника с введением поправочных множителей, включая поправки на утечку вблизи границ раздела сред, значения которых могут быть заранее рассчитаны по программе TDMCC для типовых конфигураций «источник-защита» и включены в библиотеку ФН.

В общем случае, при верификации некоторой программы (Code – условное название) для расчета мощности дозы гамма-излучения с собственной библиотекой констант, получаемые значения  $D^{(Code)}$  (при заданных значениях  $E_0$  и  $r$ ) надо сравнивать с величиной  $D$ , вычисляемой на основе фактора накопления  $B_{cnp}$  из Справочника в соответствии со следующими выражениями:

- для бесконечной среды  $D = D_0^{(Code)} \cdot COR \cdot B_{cnp}$ ,
- для среды с барьерной геометрией  $D = D_0^{(Code)} \cdot COR \cdot B_{cnp} \cdot \delta_{бар}$ ,

где  $D_0^{(Code)}$  вычисляется с учетом когерентного рассеяния,

$COR$  – корректирующий множитель, который для точечного изотропного источника вычисляется в соответствии с (14), а для плоского изотропного источника – в соответствии с (15).

Для непосредственного сравнения со справочным значением  $B_{cnp}$  необходимо с использованием программы Code вычислить для соответствующих значений энергии и оптического расстояния величину

$$B^{(Code)} = D^{(Code)} / D_0^{(Code)} / COR .$$

## Заключение

На примере решения задач с точечными и плоскими изотропными источниками гамма-излучения в бесконечной среде из железа с использованием прецизионной программы TDMCC, выявлены области значений энергии и оптической толщины среды, при которых относительные отклонения расчетных и справочных значений факторов накопления заключены в интервале  $\pm 1\%$ . Вне этих областей отмечены существенные занижения расчетных значений факторов накопления (до 90%), что связано с различиями в константах взаимодействия гамма-излучения в библиотеке EPDL97 программы TDMCC и библиотеках, использованных при получении справочных данных [11, 12].

Отмеченные в данной работе закономерности получены в процессе установления корректных соотношений между результатами расчетов мощности дозы по некоторой верифицируемой программе моделирования переноса гамма-излучения и соответствующими значениями, получаемыми на основе справочных данных по факторам накопления.

Проведенные исследования на системах с простейшей геометрией являются начальным этапом обоснования возможности получения значений факторов накопления и факторов утечки на границах сред в системах с более сложными конфигурациями «источник излучения – защита» с использованием аттестованных программ прецизионного класса.

В дальнейшем планируется выпуск публикаций с результатами тестовых расчетов мощности дозы гамма-излучения, полученными с использованием разрабатываемого подхода, и доказательствами его эффективности.

## Список литературы

1. X-5 Monte Carlo Team, «MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5», Los Alamos National Laboratory report LA-UR-03-1987 (April 2003).
2. Гуревич М.И., Калугин М.А., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А. Характерные особенности MCU-FR // ВАНТ, сер. «Физика ядерных реакторов», 2016, вып. 5, стр. 17-21.
3. Житник А.К., Рослов В.И., Семенова Т.В. и др. Программа TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010614412 от 07.07.2010.
4. Басс Л.П., Гермогенова Т.А., Николаева О.В., Кузнецов В.С. Радуга-5.1 и Радуга-5.1(П) – программы для решения стационарного уравнения переноса в 2-х и 3-х мерных геометриях на одно- и многопроцессорных ЭВМ // Сб. докладов семинара «Нейтроника-2001. Обнинск, 30 октября–2 ноября 2001.
5. Волощенко А.М., Крючков В.П. КАТРИН-2.5 – программа для решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения методом дискретных ординат в трехмерной геометрии. Инструкция для пользователя. Отчет ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, инв. № 6-21-2011, М., 2011.
6. Сычугова Е. П., Белоусов В. И., Селезнев С. А.. Апробация кода ODETТА на экспериментах по защите реактора. Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Десятая международная научно-техническая конференция МНТК-2016. Сб. трудов, Москва, 2016.
7. Официальный сайт в сети интернет, MicroShield, [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://radiationsoftware.com/microshield/свободный>.
8. Официальный сайт в сети интернет, Mercurad, [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://mercurad.software.informer.com/свободный>.
9. Официальный сайт в сети интернет, RayXpert, [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://rayxpert.com/ режим доступа свободный>.
10. Бакин Р.И., Званцев А.А., Илупин С.И. и др. Программный комплекс оперативного расчета доз фотонного излучения за защитой от источников различной геометрической формы. Известия Российской науки. Энергетика. Наука, 2013, №5, сс. 129-135.
11. Chilton A.B., Eisenhauer C.M., Simmons C.I. // Nucl. Sci. Engng. 1980. V.73. N 1. P. 97-107.
12. Takeuchi K., Tanaka S. // Nucl. Sci. Engng. 1984. V.87. N 4. P. 478-489.
13. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1995. – 494 с.
14. Верификационный отчет ПС TDMCC для решения задач радиационной защиты от заданных источников нейтронного и фотонного излучения. Отчет ИТМФ РФЯЦ ВНИИЭФ, 2017. 255с.
15. Cullen D.E., Chen M.N., Hubell J.H. Tables and Graphs of Photon-Interaction Cross Sections from 10 eV to 100 GeV derived from the LNL Evaluated Photon Data Library (EPDL). // UCRL-50400. Vol. A6. Rev. 4. Livermore. California, 1989.
16. Аттестационный паспорт программного средства TDMCC. Рег. номер 407 от 8.12.2016.
17. Аттестационный паспорт программного средства TDMCC. Рег. номер 452 от 24.10.2018.
18. Storm E., Israel H. J. Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100 // Nucl. Data Tadles. 1970. Vol. A7. P. 565-681.
19. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, Vols. I, II, and III. — Radiation Safety Information Computational Center at ORNL, 2000. — ORNL/NUREG/CSD-2R6.

Приложение А

Матрица из 18x41 значений коэффициентов  $k_B^T (Fe, E_0, \mu r)$  для воздушной кермы от точечного изотропного источника в бесконечной среде из железа

$\mu_{r-воз}^T$	Энергия $E_0$ , МэВ																	
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	15
0,5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,010	1,025	1,039	1,048	1,057	1,076	1,105
1	1,004	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,015	1,031	1,046	1,061	1,094	1,128	1,194
2	1,017	1,004	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,020	1,038	1,056	1,075	1,123	1,176	1,319
3	1,037	1,010	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,015	1,036	1,057	1,078	1,132	1,215	1,428
4	1,063	1,023	1,010	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,010	1,032	1,054	1,080	1,141	1,227	1,511
5	1,091	1,040	1,020	1,003	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,010	1,029	1,048	1,077	1,139	1,236	1,574
6	1,123	1,055	1,032	1,005	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,010	1,029	1,049	1,071	1,127	1,233	1,615
7	1,156	1,08	1,044	1,008	1,004	1,003	1,003	1,003	1,003	1,000	1,000	1,010	1,029	1,049	1,069	1,135	1,232	1,648
8	1,20	1,11	1,057	1,013	1,008	1,007	1,006	1,005	1,005	1,003	1,000	1,010	1,027	1,045	1,065	1,129	1,232	1,671
10	1,29	1,15	1,085	1,023	1,015	1,013	1,012	1,010	1,009	1,004	1,000	1,010	1,026	1,041	1,063	1,121	1,222	1,690
15	1,51	1,25	1,16	1,047	1,034	1,031	1,026	1,020	1,017	1,007	1,000	1,010	1,024	1,037	1,056	1,106	1,194	1,676
20	1,81	1,40	1,26	1,076	1,060	1,051	1,043	1,032	1,027	1,012	1,000	1,010	1,021	1,033	1,049	1,101	1,179	1,619
25	2,23	1,60	1,38	1,12	1,086	1,073	1,060	1,045	1,037	1,017	1,003	1,010	1,020	1,030	1,041	1,088	1,149	1,555
30	2,76	1,90	1,51	1,15	1,12	1,096	1,080	1,057	1,048	1,022	1,005	1,010	1,020	1,031	1,040	1,082	1,136	1,503
35	3,43	2,28	1,67	1,22	1,15	1,124	1,105	1,072	1,058	1,028	1,007	1,010	1,020	1,030	1,040	1,081	1,122	1,451
40	4,34	2,70	1,84	1,27	1,19	1,155	1,13	1,09	1,07	1,035	1,010	1,010	1,019	1,028	1,039	1,077	1,116	1,413