

УДК 621.039.58

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВКХ ПРИ ПОМОЩИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛУЭ

А.В. Лисицкий, С.А. Письменецкий, В.Г. Рудычев

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

61077, Харьков, пл. Свободы, 4

Поступила в редакцию 22 мая 2009 г.

Описывается методика расчета характеристик мозаичного e - γ -конвертора, состоящего из железных и вольфрамовых элементов, который предлагается использовать для моделирования γ -излучения снаружи вентилируемых контейнеров хранения (ВКХ). Адекватное воссоздание полей излучений такого типа с помощью тормозного излучения линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) позволит решать и анализировать многие задачи о действии его на оборудование и персонал, обеспечивающий эксплуатацию СХОЯТ. Расчеты производились на основе энергетических характеристик полей излучения ВКХ, знание которых является отправной точкой последующего расчета защитных свойств сооружений и предметов на местности при распространении излучений от ВКХ ВВЭР-1000. Моделирование действующих радиационных полей необходимо для испытания защит, детектирующего оборудования и других задач текущей эксплуатации СХОЯТ. Моделирование процессов транспорта излучения в веществе проводилось с использованием программного пакета PENELOPE.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, γ -излучение, конвертор, тормозное излучение, ускоритель электронов, PENELOPE

SIMULATION OF VENTILATED CONTAINER OF STORAGE BY LINAC BREMSSTRAHLUNG

A.V. Lisitsky, S.A. Pismenesky, V.G. Rudychev

Kharkiv National University

61077, Svobody Square, 4, Kharkiv, Ukraine

Methods of calculation of tungsten and iron e - γ -converter optimal characteristics are considered. These converters have been recommended to use for simulation γ -radiation near storage container of by means of linac bremsstrahlung. Right reconstruction of the irradiation is important problem. The problem solution will give a possibility to study of the irradiation influence to equipment and personnel of nuclear waste dry storage. Carried out calculations was based on the container radiation field characteristics [2]. Simulation of the fields is necessary for testing shields, detectors and for other problems of the storage using. For simulation of radiation transport processes in matter PENELOPE [3] program was used.

KEY WORDS: simulation, γ -radiation, converter, bremsstrahlung, linac, PENELOPE

МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВКЗ ЗА ДОПОМОГИ ГАЛЬМОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛПЕ

О.В. Лисицкий, С.О. Письменецкий, В.Г. Рудичев

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

61077, Харків, пл. Свободи, 4

Зроблено опис методики розрахунку характеристик мозаїчного e - γ -конвертора [1], складеного із залізних і вольфрамових елементів, який запропоновано використати для моделювання γ -випромінювання зовні вентильованих контейнерів зберігання (ВКЗ). Адекватне відтворення полів випромінювань такого типу за допомогою гальмового випромінювання лінійних прискорювачів електронів (ЛПЕ) дозволить розв'язати й проаналізувати коло задач відносно дії цього випромінювання на устаткування і персонал, Що забезпечує експлуатацію ССВЯП. Розрахунки виконані на підставі енергетичних характеристик полів випромінювання ВКЗ [2], дані про які є відправною точкою наступного розрахунку захисних властивостей споруд і предметів на місцевості при розповсюдженні випромінювань від ВКЗ ВВЕР-1000. Моделювання діючих радіаційних полів необхідне для випробування захисних споруд, детекторного обладнання й інших задач поточної експлуатації ССВЯП. Моделювання процесів транспорту випромінювання в речовині виконано з використанням програмного пакету PENELOPE [3].

КЛЮЧОВІ СЛОВА: моделювання, γ -випромінювання, конвертор, гальмове випромінювання, прискорювач електронів, PENELOPE.

Методика имитации радиационных полей, которые могут возникнуть в различных аварийных ситуациях на АЭС с ВВЭР, при помощи тормозного излучения ЛУЭ описана ранее в работе [1]. Также в упомянутой работе приведена классификация конверторов, принятая авторами в задачах моделирования радиационных полей. В настоящей работе приводятся данные, характеризующие возможности использования мозаичного конвертора, состоящего из железных и вольфрамовых элементов, в задаче моделирования радиационных полей вентилируемых контейнеров хранения (ВКХ). Конструкция такого конвертора была предложена в [1] и частично обсуждалась в [4]. Моделирование процессов транспорта излучения в веществе проводилось с использованием программного пакета PENELOPE [3].

Лаборатория радиационной физики Харьковского национального университета с 2000 года проводит работы по экспертному анализу фактических и проектных радиационных полей на единственной в Украине площадке СХОЯТ, находящейся на территории Запорожской АЭС. В статье [2] приведены спектральные

характеристики γ -излучения на наружной боковой поверхности ВКХ на расчетный момент установки контейнера на площадку СХОЯТ, спектр γ -излучения от ВКХ приведен на рис. 1. Первоначально дискретный спектр γ -излучения ОЯТ после многократного рассеяния в защитных материалах становится квазинепрерывным и по форме подобным спектру тормозного излучения (см. для сравнения [4]). Таким образом, представляется естественным попытаться сформировать спектр тормозного излучения на ЛУЭ таким, чтобы его характеристики позволяли исследовать с его помощью распространение, ослабление и радиационное воздействие излучения ВКХ. Спектры гамма-излучения для рассматриваемого класса задач будем считать непрерывными как в математическом выражении, так и по физической природе.

Целью данной работы является определение характеристик конвертора, который обеспечил бы с заданной точностью подобие генерируемого и заданного γ -спектров, а также получение пространственно-энергетических характеристик моделирующего излучения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Учитывая сходства тормозного излучения e - γ -конвертора и γ -излучения ВКХ, а именно квазинепрерывный характер спектра, подобие формы спектров, была поставлена задача - определить энергию первичного пучка электронов и характеристики (толщины и соотношение площадей) двухкомпонентного конвертора из железных и вольфрамовых элементов, которые обеспечивали бы получение тормозного излучения, наиболее точно повторяющего спектр γ -излучения ВКХ. Двухкомпонентный конвертор, в данном случае, был выбран в качестве первого приближения мозаичного конвертора. Выбор железа и вольфрама в качестве тормозящих материалов двухкомпонентного конвертора понятен из рис. 2, где представлены зависимости средней энергии тормозного излучения от толщины конвертора для двух энергий первичных электронов. Из рис. 2 видно, что средняя энергия спектров тормозного излучения для всех материалов растет с увеличением толщины конвертора. Практически, это связано с более сильным поглощением мягкой части тормозного спектра в самом конверторе. Так же средняя энергия спектров тормозного излучения растет с применением первичных электронов более высоких энергий. Так, при массовой толщине конвертора $t = 8 \text{ г/см}^2$, т.е. приблизительно 1 см железа, 0,8 см молибдена или 0,4 см вольфрама диапазон средних энергий обычных однослойных конверторов из этих материалов для $E_e = 1,5 \text{ МэВ}$ составляет (0,33 - 0,63) МэВ, а для $E_e = 2,5 \text{ МэВ}$ - (0,44-0,8) МэВ.

На рис. 3 приведены относительные значения мощности экспозиционной дозы на поверхности ВКХ.

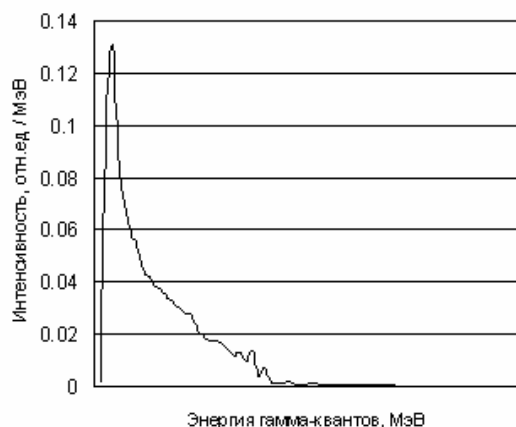


Рис. 1. Спектр γ -излучения на поверхности контейнера СХОЯТ:

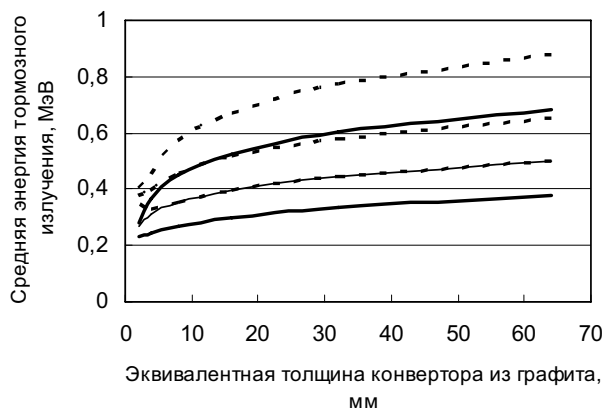


Рис. 2. Средние энергии спектра тормозного γ -излучения. Сплошные линии: энергия первичного пучка 1,5 МэВ для конверторов из железа, молибдена и вольфрама (снизу вверх). Пунктирные линии: энергия первичного пучка 2,5 МэВ для конверторов из железа, молибдена и вольфрама (снизу вверх).

Как видно из рис. 2, площадь, ограниченную самой нижней кривой (железный конвертор при $E_e = 1,5 \text{ МэВ}$) и самой верхней (вольфрамовый конвертор при $E_e = 2,5 \text{ МэВ}$) с достаточной точностью можно рассматривать как сумму трех площадей ограниченных кривыми для $E_e = 1,5 \text{ МэВ}$ и $E_e = 2,5 \text{ МэВ}$ для каждого материала (соответствующие пары сплошных и пунктирных линий). Причем последние площади практически не перекрываются. То есть суммарный диапазон средних энергий тормозного излучения конверторов из железа, молибдена и вольфрама практически полностью перекрывает диапазон средних энергий от 0,3 до 0,8 МэВ, при этом собственные диапазоны этих элементов практически независимы. Из сказанного вытекает, что данные тормозные спектры можно использовать в качестве базисных для моделирования более сложных спектров. Принимая во внимание детерминированную, по постановке задачи, двухкомпонентность решения (как простейшего варианта мозаичного конвертора) и форму спектра ВКХ (пик в районе 250 кэВ, смотри рис. 1), в качестве двух материалов конверторов логично выбрать железо и вольфрам. Железная компонента будет

отвечать за воссоздание низкоэнергетического пика, а вольфрамовая «восполнит недостаток» γ -излучения жесткой части спектра. То есть, если использовать комбинацию чередующихся пластин из железа и вольфрама, то суммарный спектр тормозного излучения можно варьировать изменением парциального вклада каждой компоненты, с целью оптимального соответствия результирующего спектра заданному.

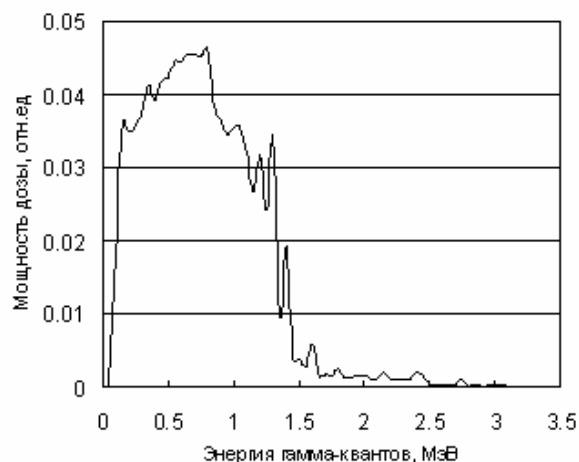


Рис. 3. Мощность дозы γ -излучения на поверхности контейнера СХОЯТ:

переопределены параметры формулы, т.е. M – измеренная величина ВКХ, X – соответствующее модельное значение (тормозное γ -излучение). Данное упрощение не позволяет принять величину χ^2 в качестве классического критерия Пирсона, но все же позволяет считать величиной, количественно описывающей близость распределений X_i и M_i . Далее эту величину мы будем называть критерием χ^2 либо критерием несоответствия.

Сразу же отметим, что задачи дальнейшего использования моделирующего излучения существенным образом уточняют критерии их сравнения. Так, для задач корректного изучения свойств защитных конструкций вокруг ВКХ необходимо добиться идентичности процессов транспорта излучений в защитных конструкциях, из чего вытекает требование наиболее точного совпадения спектров излучений. А для задач изучения влияния γ -излучения ВКХ на персонал и оборудование площадки СХОЯТ более важным является фактор дозообразования (гамма-постоянная) этих излучений. В этом случае для сравнения нами использовались мощность экспозиционной дозы [6]. Кривая мощности дозы для излучения ВКХ приведена на рис. 3. Она дает возможность оценить вклад разных участков спектра в экспозиционную дозу.

Характеристики полей излучения за однослойными конверторами рассчитывались при помощи пакета PENELOPE.

Также отметим, что в данной работе результирующий спектр e - γ -конвертора рассматривался как суперпозиция спектров от двух материалов без учета абсолютного выхода γ -квантов на один первичный электрон и без учета граничных условий между элементами конвертора. Т.е. при решении задачи любые сочетания толщин и площадей элементов рассматривались как возможные. Отсутствие электронов за конвертором также не было задано в качестве необходимого условия. Приведенные допущения не снижают практической ценности результатов, т.к. увеличение выхода излучения данного типа может быть достигнуто увеличением площади соответствующей части конвертора. Применение вращающегося конвертора в виде набора секторов из двух разных материалов с последующим отклонением прошедших электронов электрическим полем дает возможность получить совпадение интегральных характеристик поля излучения с рассчитанными теоретически. Заметим, что оба рассматриваемых материала обладают достаточно низкой теплопроводностью. Применение вращающегося конвертора с дополнительным охлаждением вне зоны облучения, и тот факт, что эти материалы имеют высокую температуру плавления, дает полное право рассматривать их в качестве элементов e - γ -конвертора без ограничений.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе решения поставленной задачи был проведен ряд расчетных экспериментов по определению характеристик поля тормозного излучения за e - γ -конвертором. В этих экспериментах варьировались толщина конверторов из вольфрама или железа, а также энергия первичного пучка электронов. Для всех исследуемых энергий первичного пучка электронов были рассчитаны критерии адекватности тормозного спектра спектру ВКХ (значение величины χ^2) и адекватности кривых потерь энергии как функции толщины конвертора. Примеры данных зависимостей для конвертора из вольфрама и железа приведены на рис. 4. 5.

Как следует из приведенных графиков, во-первых, в области малых толщин конверторов наблюдается качественное несоответствие модельных и моделируемых зависимостей.

В качестве количественного критерия оценки адекватности модели экспериментальным данным, как один из наиболее распространенных, применяется критерий χ^2 (Пирсона):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(X_i - M_i)^2}{M_i}, \quad (1)$$

где X – измеренная величина, M – соответствующее модельное значение, m – полное число интервалов [5].

Так как в большинстве расчетов энергия первичного пучка i , как следствие, максимальная энергия тормозного γ -излучения (моделирующей функции) была меньше, чем максимальная энергия γ -излучения ВКХ (моделируемой зависимости), то для всех интервалов, где $X_i > M_i = 0$ в выражении для χ^2 возникает ошибка деления на ноль. Во избежание этой проблемы были обратным образом

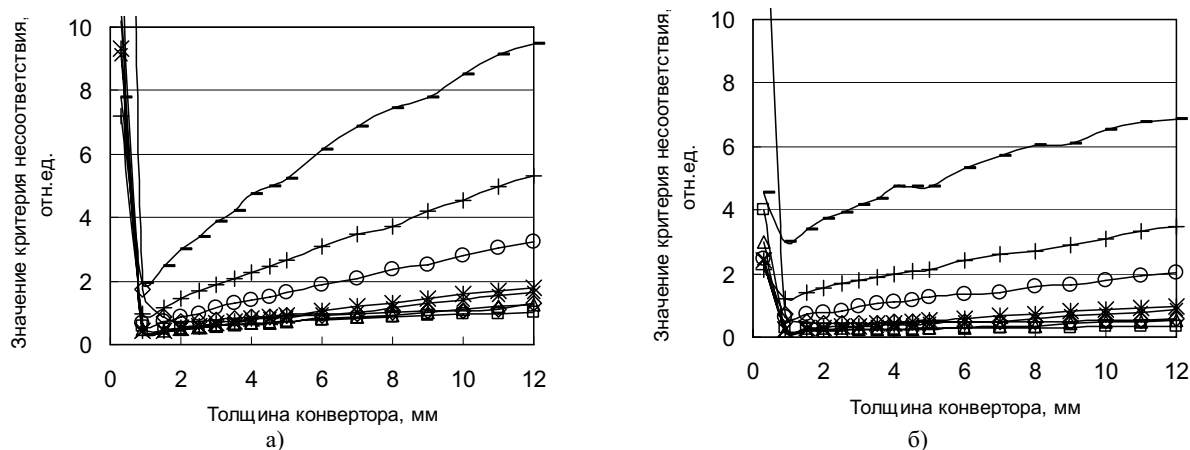


Рис. 4. Зависимость значения критерия χ^2 от толщины вольфрамового конвертора для различных энергий первичного пучка (1,25 МэВ – ♦; 1,5 МэВ – ■; 1,75 МэВ – ▲; 1,9 МэВ – ×; 2,0 МэВ – *; 2,5 МэВ – ●; 3,0 МэВ – +; 3,5 МэВ – -)

а) соответствие спектров;

б) соответствие мощности доз

Это можно объяснить соизмеримостью толщины конвертора с длиной свободного пробега первичных электронов в материале и, как следствие, практическим отсутствием слоя, генерирующего тормозное излучение. Результатом малой статистики тормозных γ -квантов является практически случайный спектральный состав моделирующего излучения. Далее этот диапазон толщин конверторов рассматриваться не будет. Во-вторых, для вольфрамовых конверторов практически при всех фиксированных энергиях первичного пучка критерий несоответствия растет с толщиной конвертора практически линейно, для железа – практически экспоненциально падает. Представив линейную комбинацию таких спектров в виде $a_0(b_0 + \exp(-b_1x)) + a_1(c_0 + c_1x)$, получаем условие минимума $a_0b_1\exp(-b_1x) = a_1c_1$. То есть существует минимум в области $x > 0$. В-третьих, зависимость критерия несоответствия от толщины вольфрамового конвертора имеет минимум в диапазоне толщин 1-2 мм, для железа – это практически монотонно убывающая функция, за исключением энергии 3,5 МэВ. В-четвертых, при фиксированной толщине с ростом энергии также растет несоответствие, за исключением энергии 1,5 МэВ, при которой в диапазоне больших толщин наблюдается минимум (см. рис. 5). В таблице 1 приведены толщины и величина критерия несоответствия оптимальных однослойных вольфрамовых и железных конверторов. Серым фоном выделены минимальные значения χ^2 в каждой группе. Из данных этой таблицы, соответствующих энергиям 1,9 и 2,0 МэВ, можно судить о точности применяемого метода моделирования и оценки результатов. Так, при отклонении энергий первичных пучков на 0,1 МэВ величина χ^2 отличается не более чем на 0,03.

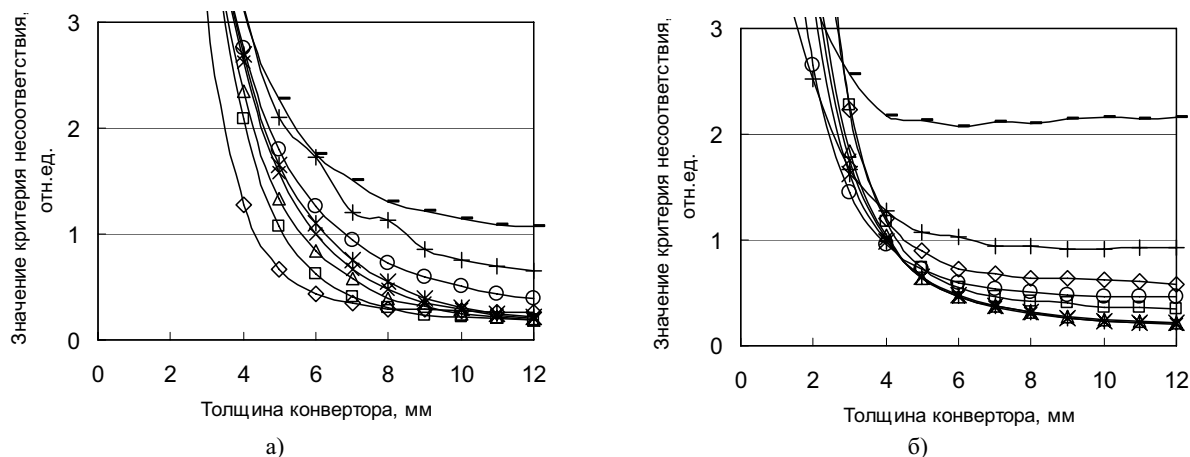


Рис. 5. Зависимость значения критерия χ^2 от толщины железного конвертора для различных энергий первичного пучка (1,25 МэВ – ♦; 1,5 МэВ – ■; 1,75 МэВ – ▲; 1,9 МэВ – ×; 2,0 МэВ – *; 2,5 МэВ – ●; 3,0 МэВ – +; 3,5 МэВ – -)

а) соответствие спектров

б) соответствие мощности доз

Из рис. 4,5, а также из данных, приведенных в таблице 1, видно, что при использовании железного конвертора оптимальными являются результаты с применением элементов максимальной толщины, т.е. 12 мм. Более толстые слои не рассматривались. Напротив, при использовании вольфрама оптимальными являются тонкие элементы.

Таблица 1. Оптимальные толщины моноконверторов для различных энергий первичного излучения

Энергия, МэВ	1,25		1,5		1,75		1,9		2		2,5		3		3,5	
	мм	χ^2	мм	χ^2	мм	χ^2	мм	χ^2	мм	χ^2	мм	χ^2	мм	χ^2	мм	χ^2
W, спектр	2	0,74	1,5	0,49	1,5	0,42	0,9	0,43	0,9	0,43	0,9	0,68	0,9	0,95	0,9	1,94
W, потери	2,5	0,45	2,5	0,24	1,5	0,19	0,9	0,22	0,9	0,25	0,9	0,64	0,9	1,22	0,9	3,01
Fe, спектр	12	0,26	12	0,19	12	0,19	12	0,20	12	0,22	12	0,40	12	0,65	12	1,08
Fe, потери	12	0,59	12	0,35	12	0,22	12	0,21	12	0,21	12	0,46	12	0,92	12	2,16

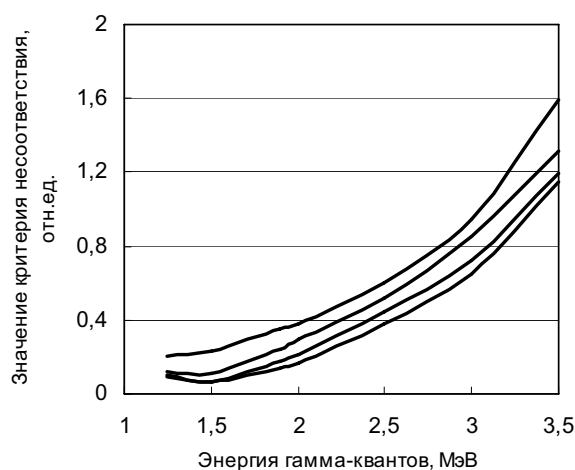
В таблицах 2 и 3 приведены оптимальные толщины двухкомпонентных конверторов из вольфрама и железа наиболее близко воспроизводящие заданный спектр ОЯТ. Из полученных результатов следует, что в случае двухкомпонентных конверторов оптимальным является использование обеих компонент конвертора практически максимальной толщины (хотя бы одна компонента была максимальной толщины). Более того, из рис. 6 видно, что соответствующие кривые не пересекаются. То есть, увеличение максимальной толщины конвертора в рассматриваемом диапазоне (до 12 мм) систематически улучшало результат оптимизации.

Таблица 2. Оптимальные толщины двухкомпонентных конверторов с точки зрения оптимизации идентичности спектров излучения

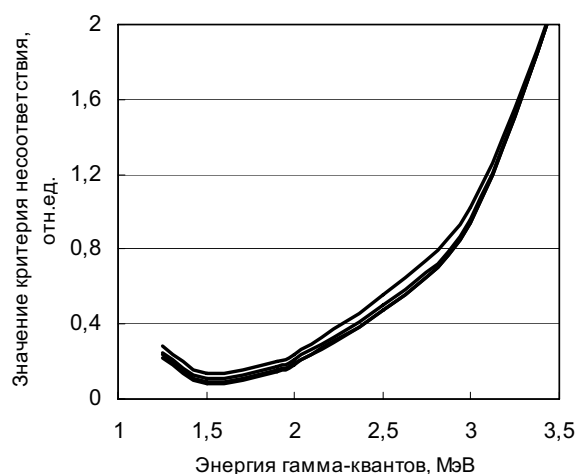
Максимальная толщина конвертора, мм	6	8	10	12
Энергия первичных электронов, МэВ	1,25	1,5	1,5	1,5
Величина χ^2	0,201	0,109	0,069	0,063
Толщина конвертора из железа, мм	6	8	9	11
Толщина конвертора из вольфрама, мм	6	8	10	12
k(Fe/W)	0,6	0,7	0,7	0,7

Таблица 3. Оптимальные толщины двухкомпонентных конверторов с точки зрения оптимизации идентичности мощности доз

Максимальная толщина конвертора, мм	6	8	10	12
Энергия первичных электронов, МэВ	1,5	1,5	1,5	1,5
Величина χ^2	0,136	0,108	0,092	0,082
Толщина конвертора из железа, мм	6	8	10	10
Толщина конвертора из вольфрама, мм	6	8	10	12
k(Fe/W)	0,5	0,6	0,7	0,7



а)



б)

Рис. 6. Зависимости минимального значения критерия χ^2 от энергии гамма-квантов, кривые на графиках: сверху вниз, получены в результате варьирования толщины конверторов от минимального значения до 6, 8, 10, 12 мм, соответственно а) совпадение спектров излучения; б) совпадение мощности доз

Как следует из выделенных ячеек таблиц 2 и 3, использование двухкомпонентного конвертора дало значительное снижение критерия несоответствия полей излучений (спектры: с 0,42 для вольфрама и 0,19 для железа до 0,063, потери: с 0,19 и 0,21, соответственно, до 0,082). Характеристики полей излучения, полученные при использовании оптимальных двухкомпонентных конверторов, приведены на рис. 7.

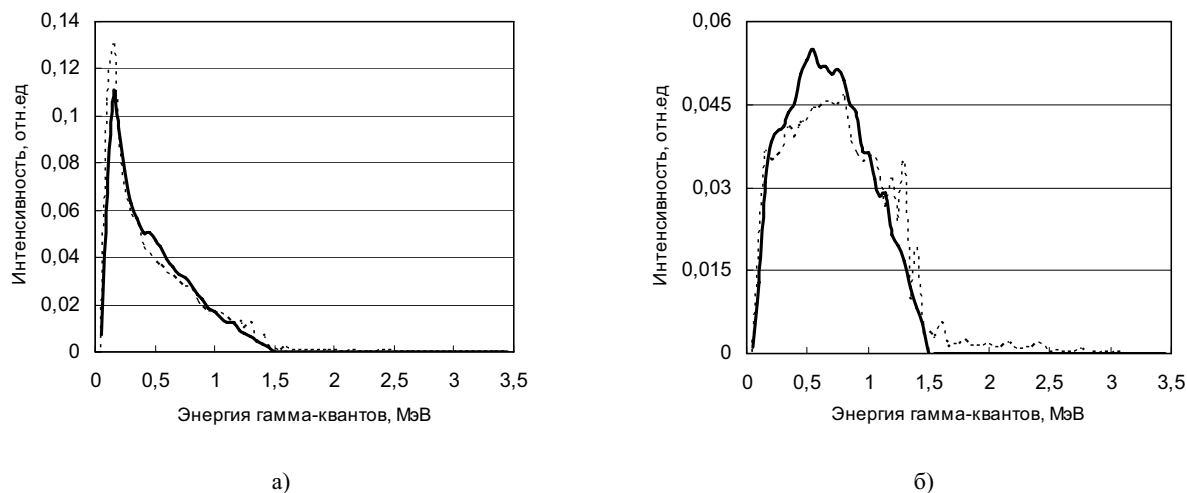


Рис. 7. Характеристики полей излучения для оптимальных двухкомпонентных конверторов. Сплошные линии – характеристики моделирующего излучения, пунктирные – характеристики поля ВКХ
 а) спектры γ -излучения ($E = 1,5$ МэВ, $d_W = 12$ мм, $d_{Fe} = 11$ мм, $k_{Fe/W} = 0,7$, $\chi^2 = 0,063$)
 б) мощности доз ($E = 1,5$ МэВ, $d_W = 12$ мм, $d_{Fe} = 10$ мм, $k_{Fe/W} = 0,7$, $\chi^2 = 0,082$)

ВЫВОДЫ

В ходе решения поставленной задачи методика оптимизации параметров однослойных конверторов, описанная в более ранних работах, была расширена, уточнена и отработана для случаев использования двухкомпонентных конверторов.

С применением разработанной методики были получены характеристики двухкомпонентного конвертора, позволяющего решить задачу имитации внешнего излучения вентилируемого контейнера хранения ОЯТ.

Авторы статьи выражают благодарность создателям программного пакета PENELOPE, господам F.Salvat, J.M.Fernández-Varea, J. Baró, J.Sempau за предоставление международно сертифицированного программного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицкий А.В., Письменецкий С.А., Рудычев В.Г. Методика имитации аварийных радиационных полей на АЭС. Возможности формирования спектров тормозного излучения //Вісник Харківського університету, серія фізична «Ядра, частинки, поля». – 2000. - № 481, вип.2. - С. 66-70.
2. Климов С.П., Лазурик В.Т., Лучная А.Е., Письменецкий С.А., Рудычев В.Г., Рудычев Е.В. Характеристики излучения при сухом хранении отработавшего ядерного топлива на Запорожской АЭС //Вісник Харківського університету, серія фізична «Ядра, частинки, поля». – 2009. - № 845, вип.1. - С. 31-38.
3. Baro J., Sempau J., Salvat F., Fernandez-Varea J. PENELOPE: an algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter. //Nucl. Instr.& Meth. – 1995. – Vol. B100. - P.31-46.
4. Лисицкий А.В., Письменецкий С.А., Рудычев В.Г. Методика имитации аварийных радиационных полей на АЭС. Характеристики аварийных излучений //Вісник Харківського університету, серія фізична «Ядра, частинки, поля». – 2000. - № 469, вип.1. - С.49-52.
5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1991. – 304 с.
6. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 296 с.