

СТЕНД ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*В.И. Никифоров, Р.И. Помацалюк, А.Э. Тенишев, В.Л. Уваров, В.А. Шевченко,
И.Н. Шляхов, С.А. Ванжа*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: uvarov@kipt.kharkov.ua

На базе технологического ускорителя электронов ЛУ-10 (10 МэВ, 10 кВт) создан стенд, позволяющий производить облучение образцов продукции развернутым потоком тормозного излучения. Методом компьютерного моделирования на основе программной системы PENELOPE-2008 исследованы характеристики смешанного поля e, X -излучения вдоль тракта его формирования для реального и оптимизированного вариантов выходных устройств ускорителя. Определены условия обеспечения максимума фактора вторичного излучения и требуемых геометрических размеров последнего. Проведено экспериментальное исследование профиля потока тормозного излучения и мощности поглощенной дозы. В области рабочего поля 20×40 см ее среднее значение составляет $6,8 \text{ кГр/ч}$ при неоднородности не более 8%. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования. В качестве примера приведено использование стенда для испытаний радиационной стойкости образцов электротехнического оборудования атомных станций.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым этапом разработки радиационных и ядерных технологий является проведение испытаний с целью установления режимов обработки продукции, радиационного ресурса оборудования и т.д. Такие испытания важны, в частности, для ядерной энергетики Украины в связи с проблемой повышения надежности АЭС и продления срока их службы. Поскольку основным дозообразующим фактором при эксплуатации ядерных реакторов является γ -излучение, то представительные экспресс-испытания материалов и оборудования должны проводиться с применением излучения той же природы, но с интенсивностью, большей на 2-3 порядка величины. Этим требованиям удовлетворяют источники тормозного излучения на основе сильноточных ускорителей электронов (см., например, [1,2]). В работе представлены результаты разработки и исследования выходных устройств ускорителя ЛУ-10 ННЦ ХФТИ для обеспечения радиационных испытаний в поле тормозного излучения.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ

Особенностью выходных устройств технологических ускорителей электронов с мощностью пучка $>10 \text{ кВт}$ является наличие сканирующего устройства. Как правило, такие машины являются специализированными по виду генерируемого излучения – электронного либо тормозного. В последнем случае сканирующий пучок электронов воздействует на встроенный конвертер тормозного излучения. Поскольку ускоритель ЛУ-10 эксплуатируется преимущественно как источник электронов, то конвертер был выполнен в виде автономного узла, размещаемого вне вакуумного объема ускорителя.

Предварительная оценка параметров поля тормозного излучения для условий испытаний образцов электротехнических материалов была проведена методом компьютерного моделирования на основе программной системы PENELOPE-2008 [3]. Описа-

ние выходных устройств при моделировании соответствовало их фактической конфигурации при испытаниях (Рис.1,2).



Рис.1. Выходное устройство ускорителя

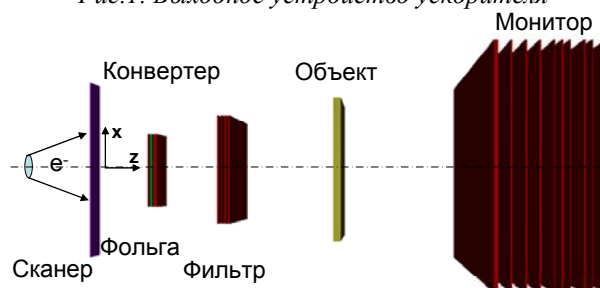


Рис.2. Конфигурация моделируемой установки

Так, предполагалось, что пучок электронов диаметром 15 мм инжектируется в центр магнита сканера, находящийся на расстоянии 51 см от выпускного окна ускорителя. Амплитуда развертки пучка на выходной фольге (титан 50 мкм) составляет 7 см. Спектр электронов был максимально приближен к реальному с величиной энергии в максимуме $E_0=8,2 \text{ МэВ}$ при ее среднем значении 8,98 МэВ. Следует отметить, что при данной энергии электронов величина средней энергии фотонов в тормозном спектре близка к энергии γ -квантов радионуклида Cs-137, являющегося основным дозообразующим

источником в случае аварий на реакторах [2]. Влияние энергии электронов E на амплитуду угла их сканирования α учитывалась с помощью формулы $\alpha = \frac{E_0}{E}$. Величина среднего тока пучка в процессе

облучения образцов составляла 800 мкА.

Конвертер тормозного излучения размещался в выполненном из алюминия корпусе с входным и выходным окнами толщиной 1,6 и 6,6 мм соответственно. Конвертирующим элементом является пластина из тантала толщиной 2,4 мм, размещенная в корпусе посередине между окнами и отделенная от них промежутками в 3 мм для охлаждающей воды. Узел конвертера располагался на расстоянии 10 см от выпускного окна ускорителя.

Размещенный на расстоянии 11,5 см от конвертера **фильтр** состоит из 4-х алюминиевых пластин толщиной 2 мм каждая, разделенных воздушными зазорами по 4 мм.

Испытуемым объектом являлся набор образцов силовых кабелей и элементов электротехнического оборудования АЭС. Для испытаний образцы были скомпонованы таким образом, что их наиболее радиационно чувствительные части находились в пределах области шириной 20 и высотой 40 см. Эти параметры определяли выбор размеров рабочего поля излучения.

В качестве модели облучаемых образцов был взят объект в виде медной пластины размером 100×20×1 см (x-y-z), покрытый слоем полиэтилена толщиной 1 мм (Cu-объект), имитирующий параметры силового кабеля. Для сравнения были также проделаны расчеты дозных распределений в однородной пластине тех же размеров из полиэтилена (PE-объект).

Для контроля интенсивности тормозного излучения в процессе облучения образцов использовался **монитор** в виде набора изолированных пластин из алюминия [4]. В данном случае он использовался в режиме толстоэлектронной свободновоздушной ионизационной камеры.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис.3 приведены результаты моделирования распределения мощности поглощенной дозы в Cu- и PE-объектах

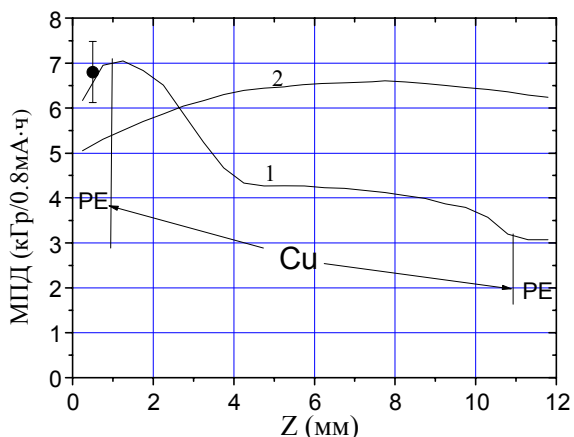
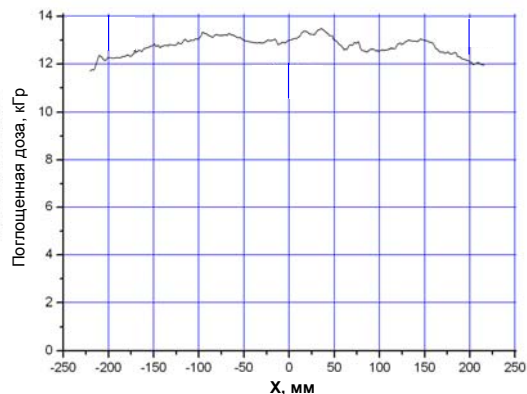


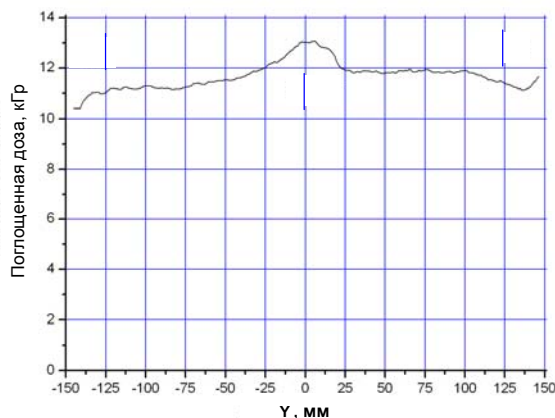
Рис.3. Распределение мощности поглощенной дозы по глубине (усреднённое по высоте и ширине). Кривая 1 – Cu-объект. Кривая 2 – PE-объект

за 1 час облучения, а также данные дозиметрии образцов с использованием детекторов Red Perpex 4034.

На Рис.4 приведены результаты измерения распределения поглощенной дозы на поверхности образцов при помощи дозиметрической пленки RISO В3. Среднее значение мощности поглощенной дозы (МПД) в пределах рабочего поля составляет 6,8 кГр/ч при неравномерности не более $\pm 8\%$.



а



б

Рис.4. Распределение поглощенной дозы (2 часа облучения): по вертикали (а) и по горизонтали (б)

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВ

В работе [5] изложен метод анализа выходных устройств ускорителя электронов, основанный на концепции тормозной толщины их отдельных элементов вдоль тракта формирования смешанного e,X-излучения. Согласно этому методу вводится обобщенная толщина каждого элемента, определяемая в виде отношения его линейной толщины к длине пробега электронов в данном материале. Такая обобщенная толщина является безразмерной, а ее единицу измерения назвали stu (stopping thickness unit). Введен также набор безразмерных базовых характеристик e,X-излучения в виде различных отношений энергии первичного пучка электронов E_{beam} , а также энергии электронного E_{el} и γ -компонента E_{ga} -излучения. Показано, что в приближении бесконечных поперечных размеров элементов (LAM-приближение) базовые характеристики e,X-излучения непрерывны вдоль тракта его формирования, в то время как при учете реальных размеров элементов эти характеристики становятся прерывистыми (RAM-приближение). В настоящем разделе этот метод применен для выбора оптимальных па-

раметров элементов тракта ускорителя ЛУ-10 с целью обеспечения максимальной интенсивности и «чистоты» тормозного излучения в пределах рабочего поля.

В таблице приведены результаты расчета тормозной толщины элементов выходных устройств ускорителя, соответствующей средней энергии электронов 8,98 МэВ.

Толщина выходных устройств ускорителя ЛУ-10 (в stu)

Фольга	Конвертер	Фильтр	Си-объект
0,0041	1,2460	0,4089	1,6470

Таким образом, общая длина выходного тракта ускорителя равна 3,306 stu

На Рис.5 приведены результаты расчета распределений энергетического коэффициента конверсии E_{ga}/E_{beam} и фактора вторичного излучения E_{ga}/E_{el} .

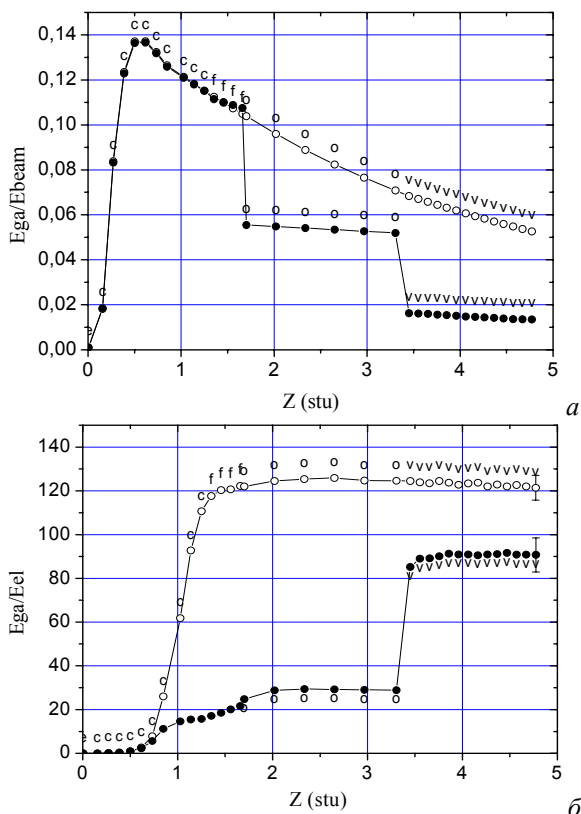


Рис.5. Распределение коэффициента конверсии (а) и фактора вторичного излучения (б) вдоль выходных устройств ускорителя ЛУ-10 (исходный вариант)

Буквы вблизи точек показывают принадлежность абсциссы точки расчета к определенному выходному устройству: с – конвертер, f – фильтр, о – облучаемый объект, v – монитор. Светлыми точками указаны результаты расчетов в LAM-, а черными – в RAM-приближении.

Анализ данных на Рис.5 показывает, что в конвертере рассматриваемого тракта максимум коэффициента конверсии (0,138) достигается в танталовой пластине при тормозной толщине тракта 0,559 stu. В оставшейся части танталовой пластины, во втором слое воды и в выходной толстой (0,66 см) алюминиевой фольге происходит падение конверсии на 17 % вследствие самопоглощения фотонов. Таким образом, конвертер является слишком толстым для данной энергии пучка.

Оптимизацию конвертера следует начинать с минимизации необходимых для отвода тепла материальных сред на его входе и выходе. С этой целью установлены толщины двух алюминиевых фольг по 1 мм каждая (0,0508 stu). Толщины первой и второй воды оставлены без изменений (по 3 мм каждая – 0,0667 stu).

Оптимальную тормозную толщину танталовой пластины Lta можно определять с помощью уравнения:

$$0,559 = Ls + Lair + Lal + Lwa + Lta, \quad (1)$$

где Ls – тормозная толщина фольги сканера (0,0041 stu), $Lair$ – толщина слоя воздуха между сканером и конвертером (0,0026 stu), Lal – толщина входной алюминиевой фольги конвертера, Lwa – толщина первого слоя воды конвертера.

Отсюда $Lta = 0,4348$ stu или 0,1522 см.

Завершает узел конвертера его выходная часть, состоящая из второго слоя охлаждающей воды и выходной алюминиевой фольги.

В рассматриваемом тракте (см. Рис.5,б) при заданной энергии электронов пучка область динамически равновесного электронно-фотонного излучения начинается при толщине тракта, равной 1,5 stu. Отсюда получаем уравнение для определения толщины фильтра:

$$1,5 = 0,559 + 0,1175 + Lair + Lal, \quad (2)$$

где $Lair$ – толщина воздуха, складывающаяся из расстояния фильтра от конвертера и трёх воздушных зазоров между четырьмя пластинами фильтра. Следовательно, оптимальная толщина фильтра составляет $Lal = 0,8203$ stu или 1,616 см.

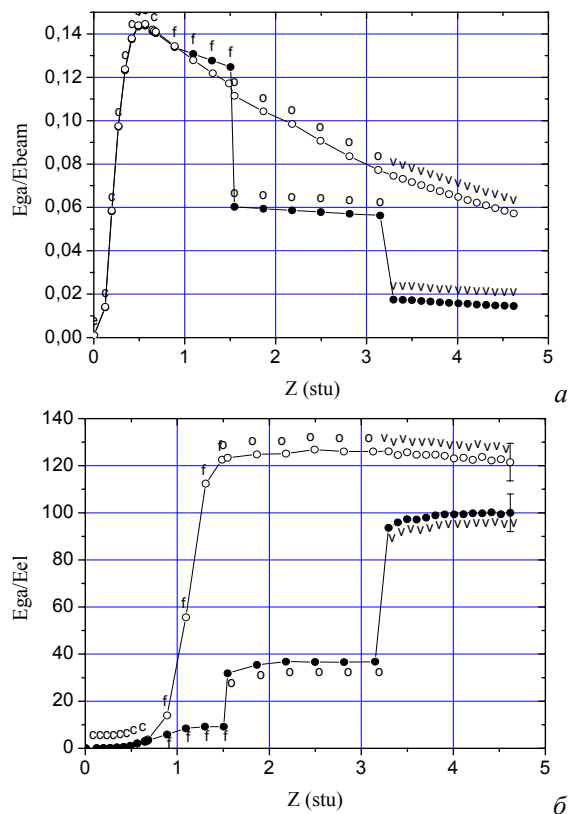


Рис.6. Распределение коэффициента конверсии (а) и фактора вторичного излучения (б) вдоль выходных устройств ускорителя ЛУ-10 (оптимизированный вариант)

Результаты расчётов оптимизированного варианта выходных устройств приведены на Рис.6. Обозначения те же, что и на Рис.5.

ВЫВОДЫ

Моделирование на основе транспортного кода PENELOPE источника тормозного излучения, создаваемого в результате конвертирования сканируемого пучка электронов со сложным спектром, обеспечивает получение адекватной информации о параметрах поля излучения и поглощенной дозе в облучаемом объекте.

Разработанный метод анализа выходных устройств ускорителя с использованием базовых характеристик e, X -излучения [5] позволил четко разделить функции выходных устройств ускорителя электронов при его работе в режиме генерации тормозного излучения. Так, элементы конвертера образуют область трансформации электронного излучения в смешанное e, X -излучение с повышенным содержанием фотонного компонента, а фильтр формирует область с динамически равновесным содержанием обоих компонентов.

Оптимизация выходных устройств ускорителя ЛУ-10 на основе разработанного метода позволяет увеличить коэффициент конверсии электронного излучения в тормозное на 23 % при увеличении фактора вторичного излучения на облучаемом объекте на 26 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.L. Auslender, A.D. Bukin, L.A. Voronin, et al. Bremsstrahlung Converter for Powerful Industrial Electron Accelerators // *Rad. Phys. Chem.* 2004, v.71, iss.1-2, p.297-299.
2. L.V. Yeran, S.P. Karasyov, R.I. Pomatsalyuk, et al. Target Unit for Radiation Test of Materials under Bremsstrahlung of Electron Accelerator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»* (39), 2001, №5, p.206-208.
3. F. Salvat, J.M. Fernández-Varea and J. Sempau. "PENELOPE-2008. A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport". OECD, NEA, Issy-les-Moulineaux, France, 2008.
4. С.А. Ванжа, В.И. Никифоров, Р.И. Помацалок и др. Разработка метода «радиационной тени» для мониторинга режима стерилизации продукции пучком электронов // *Вопросы атомной науки и техники Сер. «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №2, с.150-153.
5. В.И. Никифоров, В.Л. Уваров. Метод анализа и оптимизации выходных устройств ускорителя электронов в режиме генерации тормозного излучения // *Вопросы атомной науки и техники Сер. «Ядерно-физические исследования»*. 2012, №3, с.207-210.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

A BENCH FOR RADIATION TEST WITH THE USE OF BREMSSTRAHLUNG

V.I. Nikiforov, R.I. Pomatsalyuk, A.Eh. Tenishev, V.L. Uvarov, V.A. Shevchenko, I.N. Shlyakhov, S.A. Vanzha

On the basis of the technological accelerator электронов ЛУ-10 (10 MeV, 10 kW) it is created the stand, allowing to make an irradiation of product samples the developed stream of brake radiation. The method of computer modelling on the basis of program system PENELOPE-2008 investigates characteristics of the mixed field e, H -radiations along a path of its formation for the real and optimised variants of target devices of the accelerator. Conditions of maintenance of a maximum of the factor of secondary radiation and are defined its demanded geometrical sizes. The experimental research of a profile of a stream of brake radiation and capacity of the absorbed dose is spent. In the field of a working field 20×40 cm its average value makes sm 6.8 kgr/hour at heterogeneity no more than 8 %. The received experimental data will well be co-ordinated with results of modelling. As an example use of the stand for tests of radiating firmness of samples of the electrotechnical equipment of nuclear stations is resulted.

СТЕНД ДЛЯ РАДІАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В.І. Нікіфоров, Р.І. Помацалюк, А.Е. Тенішев, В.Л. Уваров, В.А. Шевченко, І.М. Шляхов, С.А. Ванжа

На базі технологічного прискорювача електронів ЛУ-10 (10 МеВ, 10 кВт) створено стенд, що дозволяє проводити опромінювання зразків продукції розгорнутим потоком гальмівного випромінювання. Методом комп'ютерного моделювання на основі програмної системи PENELOPE-2008 досліджені характеристики змішаного поля e, X -випромінювання уздовж тракту його формування для реального і оптимізованого варіантів вихідних пристроїв прискорювача. Визначені умови забезпечення максимуму фактору вторинного випромінювання і його необхідних геометричних розмірів. Проведено експериментальне дослідження профілю потоку гальмівного випромінювання і потужності поглинутої дози. В області робочого поля 20×40 см її середнє значення складає 6,8 кГр/год. при неоднорідності не більше 8 %. Отримані експериментальні дані добре узгоджуються з результатами моделювання. Як приклад наведено використання стенду для випробувань радіаційної стійкості зразків електротехнічного устаткування атомних станцій.