

МОДЕЛЬ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ТРЕХМЕРНОГО ОБЪЕКТА В СТЕРИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ С МЕСТНОЙ БИОЗАЩИТОЙ

П.А. Быстров, Н.Е. Розанов

Московский радиотехнический институт Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: bpeter@mail.ru; nrozanov@mail.ru

Представлена разработанная модель процесса облучения трехмерного объекта электронным пучком в компактной стерилизационной установке с местной биологической защитой. Разработана методика описания этого процесса и модернизирована программа BEAM SCANNING для расчета характеристик облучения. Представлены результаты ряда тестов, показавшие хорошую точность расчетов. Проведено предварительное моделирование процесса облучения коробки в режиме реально работающей установки. Определены места коробки с минимальной дозой облучения. Выявлен механизм формирования немоногопрофильного профиля дозы вдоль оси системы, состоящий во вкладе соседних слоев непрерывного пучка или соседних ступеней модулированного пучка, создающих грушеобразные распределения дозы. Разработанный метод и написанная программа позволяют описывать процессы при работе установки, а также выдавать рекомендации по ее оптимизации.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация стерилизационной установки на основе линейного электронного СВЧ-ускорителя на стоячей волне с компактной местной биозащитой [1, 2] и поиск оптимальных режимов ее работы требуют разработки физико-математической модели процессов в ней. В работе [3] приведены результаты разработки такой модели в части облучения поверхности трехмерного объекта – коробки со стерилизуемым наполнением. Описана программа BEAM SCANNING, созданная на основе такой методики, и приведены некоторые результаты расчетов с ее помощью.

В данной работе представлена модель процесса облучения всего объема трехмерного объекта, методика его описания и модернизированная программа BEAM SCANNING для расчета характеристик облучения. Представлены результаты тестирования программы, а также предварительные расчеты дозы, создаваемой электронным пучком в объеме коробки.

Основа стерилизационной установки – ускоритель – расположен вертикально внутри колоколообразной биозащиты, пучок распространяется сверху вниз. Ускоритель заканчивается раструбом с магнитом системы развертки, который осуществляет сканирование электронного пучка в одной плоскости. На расстоянии около 15 см от выхода раструба, закрытого титановой фольгой толщиной 50 мкм, расположена поверхность облучаемой коробки, находящейся на конвейере. Для достижения дозы в 25...30 кГр коробка массой около 7 кг и размерами 30×40×60 см проходит четыре стадии облучения – по две с верхней и нижней (после переворота коробки специальным механическим устройством) сторон. Скорость конвейера составляет 1,5...2 см/с, частота сканирования – около 4 Гц, угол сканирования – до 28 градусов, частота следования 6 микросекундных импульсов пучка – до 300 Гц, средняя по спектру энергия пучка – 5 МэВ, энергия в максимуме спектра – около 6 МэВ, импульсный ток ускоренного пучка – около 250 мА.

1. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБЛУЧЕНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Электронный пучок, попадая на поверхность облучаемой коробки, проникает внутрь, создавая дозу. Электроны в процессе своего движения в веществе постепенно теряют свою энергию, затрачивая ее на процессы, приводящие к созданию требуемой дозы в стерилизуемом объекте (ионизация и возбуждение молекул и др.), а также испытывают рассеяние на атомах вещества. Часть электронов теряется, выходя из объема коробки вследствие попадания в нее под неоптимальными углами, а также из-за рассеяния на атомах вещества. Равномерность дозы вдоль оси системы (совпадающей с осью ускорителя) обеспечивается, в частности, за счет двухстороннего облучения.

Основным методом измерения дозы облучаемых объектов на нашей установке является использование пластиковых пленок, изменяющих под действием облучающего электронного пучка свою световую проницаемость. Погрешность такого способа измерения дозы составляет 10...15%, которую мы приняли и для разрабатываемой модели. Поэтому для описания процессов потерь энергии и рассеяния электронов пучка в веществе мы использовали метод Монте-Карло по схеме так называемых "укрупненных соударений" [4]. Этот метод, наиболее часто используемый в практических расчетах дозы облучения, является некоторым упрощением по сравнению с классическим методом Монте-Карло. В последнем проводится расчет однократных актов рассеяния и торможения отдельных электронов в среде с использованием сечений соответствующих процессов с последующим усреднением по большому числу этих актов. В методе же с "укрупненными соударениями" используются функции распределения (вероятности) угловых и тормозных характеристик в результате многократных актов рассеяния на некотором участке облучаемого вещества. Решение задач такого рода производится путем моделирования траекторий большого числа электронов внутри

вещества. Электроны проникают в вещество, испытывая рассеяние и теряя энергию. Их траектории, таким образом, выглядят как ломаные линии, на каждом из звеньев которых потери энергии и угол отклонения вычисляются в соответствии с используемыми функциями распределения. В результате суммирования доз, создаваемых всеми электронами, получается картина распределения дозы, создаваемой всем электронным пучком в трехмерном объеме.

В нашей модели проводится расчет прохождения густоты пучка до поверхности коробки, а затем рассчитываются рассеяние и потери энергии электронов внутри вещества коробки, создающаяся доза и потери пучка за счет выхода частиц через все грани коробки. В созданной программе для ускорения расчетов использовались табличные функции для тормозной и рассеивающей способностей вещества, а также разработанная авторами функция распределения по углу, приближающаяся к наиболее часто используемому распределению Мольера [4], которая дает хорошее совпадение расчетов с экспериментальными данными по рассеянию на тонкой титановой фольге [3]. Использование таких функций хоть и не обеспечивает очень высокую точность соответствия с результатами экспериментов, но позволяет получить качественную картину распределения дозы и вписаться в допустимую погрешность. Для тестирования модели использовались экспериментальные данные, а также результаты расчетов с помощью программы, основанной на методике, предложенной Т. Tabata и др. [5 - 7].

Ниже представлены результаты некоторых расчетов с помощью программы BEAM SCANNING, в которой была реализована описанная выше методика.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

2.1. ОБЛУЧЕНИЕ ТОНКИМ ПУЧКОМ БЕЗ СКАНИРОВАНИЯ

Трехмерная конфигурация дозы в объекте создается вкладом большого количества падающих в разные места под разными углами густот пучка относительно малого диаметра. Поэтому в качестве первого теста опишем результаты моделирования экспериментальных данных [8], описанных в [9], по измерению дозы, создаваемой электронным пучком с малым диаметром – около 5 мм – и малым углом расходимости – до 3 градусов. Энергия пучка – 22 МэВ, разброс по энергии – до 50 кэВ, доза создается в воде.

На Рис. 1 показаны результаты расчетов в трехмерном представлении в виде сеток, соответствующих фиксированным уровням относительной дозы. Пучок на этом рисунке падает сверху на поверхность коробки. Как видно, на некотором участке изодозы имеют форму цилиндров постоянного диаметра, а далее диаметр цилиндров меняется, формируя характерную грушеобразную форму изодозы.

На Рис. 2 показаны (справа) те же результаты расчетов, но в виде изодоз в плоскости симметрии системы. В аналогичном виде на левой части рисунка показаны экспериментальные результаты. Изображены изодозы для уровней 2, 5, 10, 20 и 50% от максимального значения.

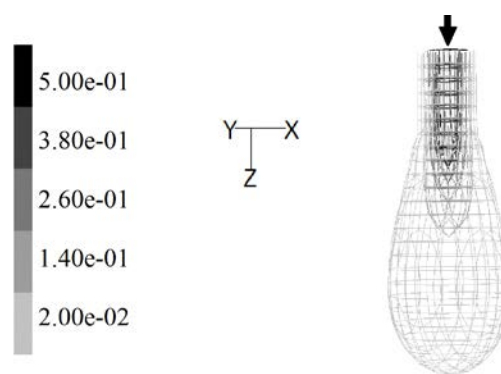


Рис. 1. Относительные изодозы облучения объекта, представленные в виде трехмерных сеток. За единицу принята доза на глубине 2 см по оси системы

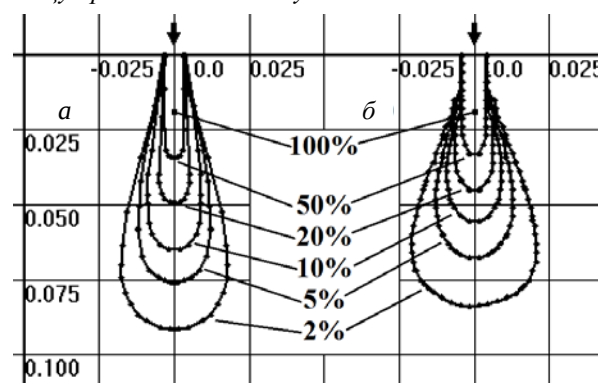


Рис. 2. Изодозы облучения объекта в его плоскости симметрии: экспериментальные (а) и расчетные (б). Значения координат – в метрах

Видно, что форма расчетных и экспериментальных изодоз качественно совпадает и имеет хорошо известный грушеобразный вид. В то же время видны количественные отличия, проявляющиеся в большей ширине и меньшей длине рассчитанных "груш". Объясняется это тем, что наша модель ориентирована на описание пучков с энергией порядка 5 МэВ, в то время как энергия пучка в данном моделируемом эксперименте была заметно больше. При такой энергии требуется точный учет вторичного тормозного излучения и его вклада в дозу облучения объекта.

2.2. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПУЧКА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗЫ

Анализ результатов расчетов с разной толщиной падающего пучка позволил выявить ее влияние на вид распределения дозы в направлении распространения пучка.

На Рис. 3,а-г представлены двухмерные распределения относительной дозы в плоскости симметрии системы для четырех значений толщины пучка. Расчеты проведены для пучков с энергией 5 МэВ, облучаемое вещество имеет характеристики стерилизуемого на нашей установке объекта. На рисунках пучок падает на поверхность объекта сверху. Ширина рисунков соответствует ширине объекта и равна 30 см. Плотность объекта однородна. На Рис. 3,е показаны одномерные распределения доз вдоль оси системы для тех же четырех толщин пучка, что и на Рис. 3,а-г. Заметим, что разная ширина облучающего пучка моделировалась с помощью задания разно-

го максимального угла отклонения пучка в системе развертки, в то время как остальные параметры – ток и мощность пучка, число сгустков – оставались неизменными. Ширина пучка варьируется от очень тонкой при отсутствии угла развертки (см. Рис. 3,а) до покрывающей весь объект (см. Рис. 3,г).

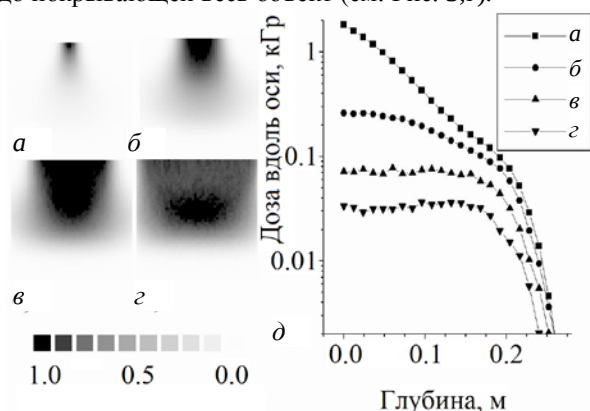


Рис. 3. Относительные двухмерные распределения дозы в плоскости симметрии системы для разной ширины падающего пучка (а-г) и профили дозы в логарифмическом масштабе (д) вдоль оси системы для них

Можно видеть, что с ростом ширины пучка меняется профиль дозы вдоль оси системы. Монотонный спад при малой ширине пучка (см. Рис. 3,а,б) сменяется похожим на "полочку" профилем со спадом в ее конце (см. Рис. 3,в. А затем (см. Рис. 3,г) профиль (см. также далее этот профиль в линейном масштабе – кривую б на Рис. 4,в) становится немонотонным, а именно имеющим участок роста и максимум на некотором расстоянии от поверхности объекта. Как показывает анализ, этот максимум появляется не только из-за разворота траекторий некоторых электронов в сторону поверхности объекта, а, прежде всего, из-за вклада электронов, "приходящих" в плоскость симметрии из соседних плоскостей. Можно сказать, что он является следствием сложения нескольких грушеобразных распределений дозы.

2.3. ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Представленные выше результаты относятся к расчетам и экспериментам с электронным пучком, имеющим пренебрежимо малый разброс энергий. Однако реальный спектр пучка ускорителя стерилизационной установки является достаточно широким.

Роль ширины энергетического спектра пучка иллюстрируют результаты расчетов, представленные на Рис. 4. На нем изображены характеристики дозы, полученной трехмерным объектом при облучении широким (плоскопараллельным) пучком со всеми параметрами, перечисленными в предыдущем разделе, и с фронтом пучка, соответствующим Рис. 3,г для двух различных энергетических спектров пучка. На Рис. 4,а,б представлены двухмерные распределения относительной дозы в плоскости симметрии системы, на Рис. 4,в – одномерные распределения дозы вдоль оси системы. Рис. 4,а соответствует расчету с моноэнергетическим пучком (5 МэВ), Рис. 4,б – с пучком с "реальным" спектром, описанным в [10].

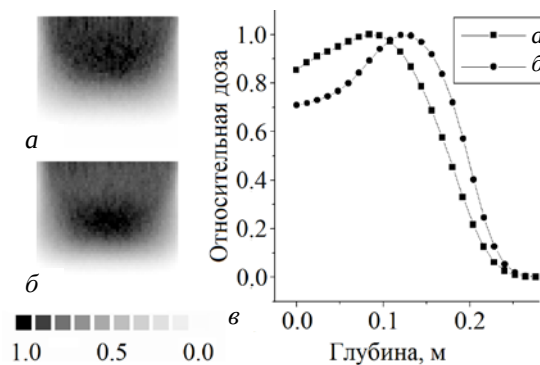


Рис. 4. Распределения относительной дозы в плоскости симметрии системы (а,б) и вдоль оси системы (в), созданные моноэнергетическим пучком (а) и пучком с реальным спектром (б)

Из графиков следует, что распределение дозы, создаваемой реальным пучком, является более равномерным, чем в случае моноэнергетического пучка. Причина состоит в том, что электроны с малой энергией создают максимум дозы ближе к поверхности коробки, чем электроны с большой энергией. В результате сложения доз, создаваемых фракциями пучка с разными энергиями, суммарная доза оказывается более равномерной по глубине облучаемого объекта.

2.4. ТЕСТОВЫЙ РАСЧЕТ ДЛЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПУЧКА

Важным для работы стерилизационной установки является тест на создание дозы плоскопараллельным фронтом пучка.

На Рис. 5 представлены распределения дозы вдоль оси системы, созданной плоскопараллельным пучком с энергией 10 МэВ в полистироле. На нем изображены результаты измерений на ускорителе IMPELA [11] в сравнении с результатами расчетов по методике [5, 6] и по программе BEAM SCANNING.

Как видно, результат, полученный при помощи нашей программы BEAM SCANNING, отличается от экспериментального результата не более чем на удовлетворяющие нас 10...15% и превосходит по точности результат, полученный по методике [5, 6].

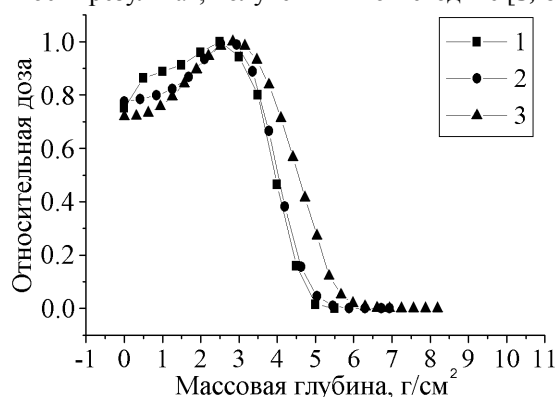


Рис. 5. Относительная доза в зависимости от массовой глубины проникновения плоскопараллельного пучка с энергией 10 МэВ в мишень из полистирола. 1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по программе BEAM SCANNING; 3 – расчет по методике [5, 6]

Еще один тестовый расчет сделан для сравнения с экспериментальным результатом, полученным на нашей стерилизационной установке по облучению широким пучком мишени, состоящей из алюминиевых пластин, между которыми были расположены пленочные измерители дозы. В действующей установке облучающий электронный пучок не является моноэнергетическим, поэтому потребовалась предварительная работа по восстановлению и моделированию энергетического спектра пучка (по методике, изложенной в [10]). На Рис. 6 представлены зависимости измеренной и рассчитанной дозы от глубины проникновения электронного пучка в алюминиевую мишень.

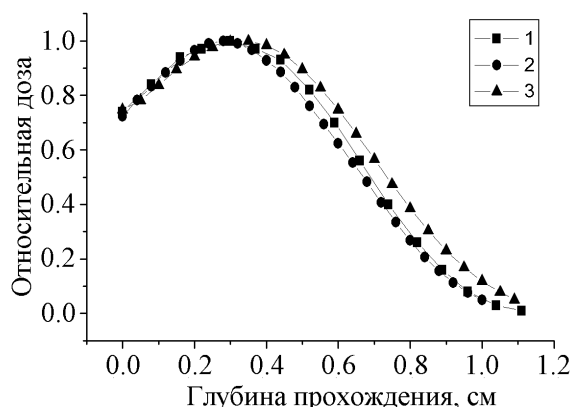


Рис. 6. Зависимость дозы от глубины проникновения широкого электронного пучка на стерилизационной установке в алюминиевую мишень.

- 1 – экспериментальные данные;
2 – расчет по программе BEAM SCANNING;
3 – расчет по методике [5, 6]

Из сравнения экспериментальной и рассчитанных кривых видно, что их отличие находится в пределах экспериментальной ошибки измерений, составляющей 10...15%. Видно также, что методика [5, 6] дает немного большее отличие от измерений.

2.5. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКА ПУЧКА

Одним из основных оперативных способов измерения энергии ускоренного пучка является использование коэффициента токопрохождения пучком алюминиевой пластины. Для этого измеряется ток, попадающий на пластину, и ток, проходящий ее и попадающий в цилиндр Фарадея, находящийся за пластиной. Отношение тока цилиндра Фарадея к сумме этих токов называется коэффициентом токопрохождения. Его вычисление производится по значениям этих токов, снимаемых с осциллограмм, чаще всего, для значений на "полочке" 6-микросекундных импульсов. Характерная энергия пучка получается с использованием известного графика зависимости коэффициента токопрохождения от энергии моноэнергетического пучка. Поэтому одним из тестовых расчетов является сравнение зависимостей токопрохождения пучка через алюминиевую пластину. На Рис. 7 представлены графики зависимости коэффициента токопрохождения моноэнергетического электронного пучка с энергией 5 МэВ алюминиевой пластины различной толщины, полученные в ре-

зультате расчетов и из данных эксперимента [12], описанного в [7].

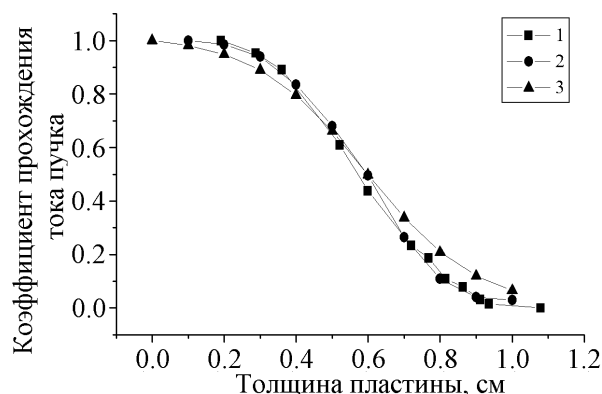


Рис. 7. Коэффициент прохождения тока пучка электронов с энергией 5 МэВ через алюминиевую пластину в зависимости от ее толщины:

- 1 – данные эксперимента; 2 – расчет по программе BEAM SCANNING; 3 – расчет по методике [7]

Видно, что результат расчета по программе BEAM SCANNING отлично согласуется с экспериментальными данными.

2.6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ДОЗЫ В ТРЕХМЕРНОМ ОБЪЕКТЕ

Опишем результаты предварительных расчетов распределения дозы, создаваемой электронным пучком в трехмерной мишени (коробке) при моделировании реального режима работы стерилизационной установки. Расчет был проведен для коробки с размерами 30×40×10 см, т. е. с длиной в направлении движения конвейера меньше реальной. Результаты при облучении пучком с рассчитанным для рабочего режима спектром представлены на Рис. 8. В левой части рисунка показана коробка целиком с распределением дозы на ее видимых гранях. В правой части рисунка показаны распределения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через центр коробки. Неотклоненный электронный пучок движется вдоль оси Z и попадает на верхнюю и нижнюю грани коробки, таким образом, моделируется процесс двухстороннего облучения. Развертка пучка идет вдоль оси X, конвейер движется вдоль оси Y.

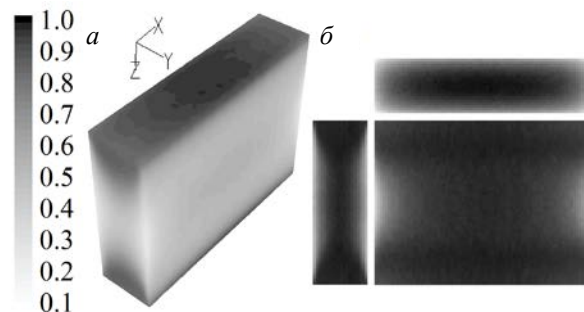


Рис. 8. Относительная доза облучения в реальных условиях работы установки на поверхности коробки (а) и в трех различных центральных сечениях коробки (б)

Видна относительно небольшая неравномерность дозы в направлении развертки пучка (вдоль

оси X), обусловленная увеличением линейной скорости движения луча по поверхности коробки с ростом угла его отклонения при пилообразной форме тока магнита системы развертки. Она может быть устранена оптимизацией осциллограммы тока магнита.

Наибольшая неравномерность дозы имеет место в центре ребер, соединяющих узкие и широкие боковые поверхности коробки. Она обусловлена следующим эффектом, проявляющимся сильнее всего в плоскости, расположенной в середине коробки по оси Z. Эффект состоит в том, что в этой плоскости объем коробки через боковые грани покидает наибольшее количество электронов. Неравномерность в этой области коробки выходит за рамки допустимой и требует поиска решений по ее устранению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана модель процесса облучения электронным пучком трехмерных объектов в компактной стерилизационной установке на основе линейного электронного СВЧ-ускорителя на стоячей волне с местной биозащитой. Разработана методика описания этого процесса и модернизирована программа BEAM SCANNING для расчета характеристик облучения. Представленные результаты тестирования программы показывают хорошую точность расчетов.

Продемонстрирована возможная положительная роль разброса пучка по энергиям, проявляющаяся в выравнивании дозы в объеме облучаемой коробки.

Выявлен механизм формирования немонокотонного профиля дозы вдоль оси системы. Он заключается во вкладе в осевой профиль дозы соседних слоев непрерывного пучка или соседних электронных сгустков модулированного пучка, каждый из которых создает грушеобразную форму дозы. Вклад этих соседних "груш" в дозу и приводит к появлению максимума, расположенного на некотором удалении от поверхности объекта (а именно, в области расширения "груш").

Проведено предварительное моделирование процесса облучения коробки в режиме реально работающей стерилизационной установки. Выявлены места коробки с минимальной дозой.

Таким образом, создан физико-математический инструмент (компьютерная программа), позволяющий изучать физику процессов в стерилизационной установке, в частности, описать механизмы образования дозы в глубине объема. Появляется возможность совершенствовать установку, облегчить ее настройку и тестирование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.M. Belugin, A.V. Mischenko, V.M. Pirozhenko, N.E. Rozanov, A.A. Zavadtsev, A.N. Korolev, K.G. Simonov. Compact electron linacs for radiation technology systems // *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*. 2001, v. 4, p. 2515-2517.
2. V.M. Belugin, V.M. Pirozhenko, N.E. Rozanov. Self-shielded electron linac accelerators for radiation technologies // *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*. 2009, v. 12, iss. 9, p. 1-8.
3. П.А. Быстров, Н.Е. Розанов. Методика и программа BEAM SCANNING расчета процессов в системе развертки релятивистского электронного пучка с широким энергетическим спектром // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 2012, №4(80), с. 87-91.
4. А.Ф. Аккерман, Ю.М. Никитушев, В.А. Ботвин. Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе. Алма-Ата: "Наука", 1972, с. 50-68, 166 с.
5. T. Tabata, R. Ito, et al. Simple method of Evaluating Absorbed Dose in Electron Beam Processing // *Radiation Physics and Chemistry*. 1989, v. 33, №5, p. 411-416.
6. T. Tabata, R. Ito, et al. Semiempirical Algorithms for Dose Evaluation Absorbed in Electron Beam Processing // *Radiation Physics and Chemistry*. 1990, v. 35, №4-6, p. 821-825.
7. T. Tabata, R. Ito. A generalized empirical equation for the transmission coefficient of electrons // *Nuclear Instruments and Methods*. 1975, v. 127, №3, p. 429-434.
8. A. Brahme, H. Svensson. Radiation beam characteristics of a 22 MeV microtron // *Acta Radiologica Oncology*. 1979, v. 18, №3, p. 244-272.
9. Радиационная дозиметрия: электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ // *Доклад №35 Международной Комиссии по радиационным единицам и измерениям*. Москва: "Энергоатомиздат", 1988, с. 81.
10. М.А. Алексеев, П.А. Быстров, Н.Е. Розанов. Моделирование процесса измерения энергетического спектра электронного пучка методом магнитного анализатора на основе системы развертки стерилизационной установки // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2013, т. 4, №4, с. 361-364.
11. Guidelines for Electron Beam Radiation Sterilization of Medical Devices // *Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI)*, Arlington, VA, 1990, p. 159.
12. D. Harder, G. Porshet // *Physics Letters B*. 1967, v. 24, iss. 10, p. 519-521.

Article received 07.11.2013

THE MODEL OF THE IRRADIATION OF A THREE-DIMENSIONAL OBJECT BY THE ELECTRON BEAM IN THE STERILIZATION INSTALLATION WITH THE LOCAL RADIATION SHIELDING

P.A. Bystrov, N.E. Rozanov

The developed model of the process of three-dimensional object irradiation by electron beam in a compact installation with a local radiation shielding is presented. A methodology of description of this process is developed and the computer code BEAM SCANNING for calculation of irradiation characteristics is modernized. Results of some the tests shown good calculation accuracy, are submitted. A preliminary modeling of a sterilized box irradiation process in the real operating regime of the installation is carried out. Places of sterilized box with minimal irradiation dose are determined. The mechanism of formation a nonmonotonous dose profile along an axis of system, consisting in the contribution of neighborhood layers of a continuous beam or neighborhood bunches of modulated beam creating pear-shaped distributions of a dose is revealed. The developed method and the created computer code allow to describe processes at work of installation, and also to give out recommendations on its optimization.

МОДЕЛЬ ОПРОМІНЕННЯ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ ТРИВИМІРНОГО ОБ'ЄКТА В СТЕРИЛІЗАЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ З МІСЦЕВИМ БІОЗАХИСТОМ

П.А. Бистров, Н.Є. Розанов

Представлено розроблену модель процесу опромінення тривимірного об'єкта електронним пучком у компактній стерилізаційній установці з місцевим біологічним захистом. Розроблена методика опису цього процесу і модернізована програма BEAM SCANNING для розрахунку характеристик опромінення. Представлено результати ряду тестів, що показали хорошу точність розрахунків. Проведено попереднє моделювання процесу опромінення коробки в режимі реально працюючої установки. Визначені місця коробки з мінімальною дозою опромінення. Виявлено механізм формування немонотонного профілю дози уздовж осі системи, що полягає у вкладі сусідніх шарів безперервного пучка або сусідніх згустків модульованого пучка, що створюють грушоподібні розподіли дози. Розроблений метод і написана програма дозволяють описувати процеси при роботі установки, а також видавати рекомендації з її оптимізації.