

МЕТОДИКА И ПРОГРАММА "BEAM SCANNING" РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ РАЗВЕРТКИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ШИРОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ

П.А. Быстров, Н.Е. Розанов

Московский радиотехнический институт Российской академии наук

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

Описана методика расчета процессов в системе развертки электронного пучка в стерилизационной установке на основе линейного СВЧ-ускорителя на стоячей волне. Написана компьютерная программа "BEAM SCANNING" на основе этой методики. Приведены результаты предварительных расчетов. Продемонстрированы некоторые важные эффекты, сопровождающие работу системы развертки стерилизационной установки и обусловленные широким энергетическим спектром пучка, рассеянием его на фольге раструба и большим углом отклонения при развертке.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время создается все больше установок для стерилизации медицинской продукции с помощью радиационных технологий, в том числе, с использованием ускоренных электронных пучков. Такая установка, с компактной местной биозащитой, создана в МРТИ [1]. Она базируется на линейном СВЧ-ускорителе на стоячей волне, с фокусировкой электронного пучка СВЧ-полем [2]. Характерные параметры ускоренного пучка следующие: средняя по спектру энергия – около 5 МэВ, импульсный ток ускоренного пучка – до 250 мА, длительность импульса ускоренного тока – 4...6 мкс, частота следования импульсов – 300 Гц, т.е. средняя по времени мощность ускоренного пучка – 1,5...1,7 кВт.

При работе стерилизационной установки ускоренный электронный пучок попадает в систему развертки и сканирует облучаемые объекты, расположенные на движущемся транспортере. Система развертки отклоняет ускоренный пучок поперечным магнитным полем, меняющимся во времени с частотой от 1 до 5 Гц. При этом ось ускорителя (ось z), направление развертки пучка (ось x) и направление движения ленты транспортера (ось y) являются взаимно перпендикулярными. А основная компонента магнитного поля системы развертки направлена вдоль оси y.

Особенностью ускоренного релятивистского пучка на выходе СВЧ-ускорителя на стоячей волне является наличие большого разброса частиц по энергии. Еще одной важной особенностью установки является большой угол отклонения пучка. Оба этих фактора заметно усложняют работу системы развертки. Поэтому расчет процессов в ней является важной практической задачей, решение которой включает в себя и решение ряда научных проблем.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Методика расчета процессов в системе развертки включает в себя несколько стадий. Прежде всего, это расчет динамики процесса ускорения электронов в самом СВЧ-ускорителе. Следующим этапом является ввод информации об ускоренных частицах из

программы расчета пучка в ускорителе в программу расчета динамики сгустков электронов в системе развертки. Относительно независимой задачей является создание информации о трехмерном профиле магнитного поля системы развертки. Главной составляющей частью программы "BEAM SCANNING" является расчет динамики сгустков ускоренных электронов в периодически меняющемся во времени магнитном поле системы развертки. Важным физическим процессом при расчете динамики сгустков в системе развертки является моделирование процесса рассеяния пучка на титановой фольге в выходном окне раструба системы развертки. Промежуточные результаты расчета динамики электронных сгустков формируются при вычислении дозы облучения на поверхности облучаемого объекта, а также в его объеме. Заключительной стадией работы программы "BEAM SCANNING" должны быть анализ результатов и выработка рекомендаций по оптимизации работы системы развертки стерилизационной установки.

Опишем каждый из этапов подробнее.

1.1. ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Прежде всего, опишем программы, из которых информация о характеристиках ускоренного пучка берется для расчета динамики пучка в системе развертки. Расчет процесса ускорения электронного пучка в ускорителе осуществляется по программам из комплекса программ "DINA" [3]. Программа "DINA_RoZ" – это 2,5-мерная программа для описания процессов группировки и ускорения электронных пучков в ускорителях заряженных частиц в установившемся периодическом во времени режиме. Она позволяет в качестве начальных характеристик пучка задавать как произвольные распределения различных видов, так и полученные в расчетах электронных пучков с помощью специализированных программ. Двумерные распределения ВЧ-полей в ускоряющих структурах также могут задаваться как произвольными, так и вводиться из расчетов специализированными программами. Программа "DINA_RoZ" вычисляет и учитывает поток электронов на стенки канала в

ускорителях с фокусировкой СВЧ-полем. Эта возможность позволяет объяснить баланс мощности в линейных ускорителях электронов на стоячей волне без внешнего фокусирующего магнитного поля. Только с учетом этих потерь мощности возможна существенная оптимизация работы таких ускорителей.

Компьютерная программа "DINA_TIME" позволяет моделировать 2,5-мерную временную эволюцию электронных пучков в переходных режимах без предположения о периодичности процессов во времени. Кроме процессов группировки и ускорения, она описывает динамику отраженных электронов, двигающихся в направлении инжектора. Такие электроны образуются в режимах, когда напряжение на инжекторе заметно меньше напряжений на первых ускоряющих зазорах. Кроме того, в ней моделируется работа инжектора (в режиме заданного тока) с учетом полей этих отраженных электронов и вычисляется мощность потока, попадающего на катод пушки. Характеристики инжектируемого пучка, искаженного полями этого потока, самосогласованным образом используются для расчета процессов группировки и ускорения. Расчет на интервале времени в несколько времен пролета ускоряющей структуры приводит к установлению (если влияние полей отраженных электронов мало) периодического во времени (с частотой СВЧ-полей) режима, описываемого программой "DINA_RoZ". Время расчета такого процесса в несколько раз больше времени расчета установившегося процесса.

Программа "DINA_3D" описывает трехмерную динамику электронного пучка в ускорителях в периодическом во времени режиме. Она позволяет учесть несоосность инжектируемого пучка и ускоряющей структуры, азимутальную неоднородность собственных полей пучка и СВЧ-полей в структуре и другие трехмерные эффекты. Время ее работы, естественно, заметно больше времени работы программы "DINA_RoZ".

В качестве примера на Рис.1 приведен энергетический спектр ускоренного электронного пучка.

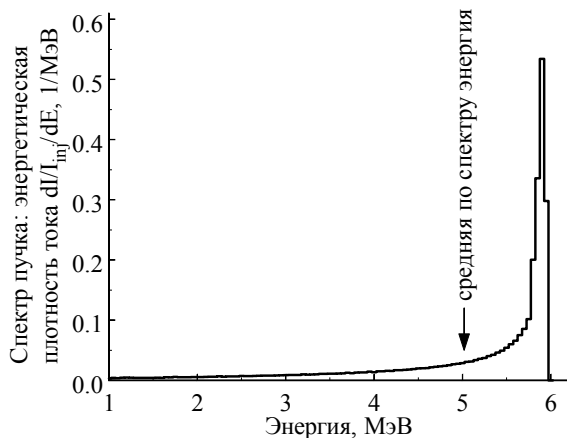


Рис.1. Энергетический спектр ускоренного пучка

Энергетический спектр – это зависимость энергетической плотности тока пучка (на рисунке – тока, нормированного на ток инжекции) от энергии. На рисунке стрелкой показано также значение средней по спектру энергии ускоренного пучка. Видно, что

она сильно отличается как от максимальной по спектру энергии, так и наиболее вероятной энергии (соответствующей максимуму энергетической плотности, или, другими словами, наибольшей вероятности). Такое сильное отличие связано, как можно показать, с наличием в спектре низкоэнергетичных электронов: относительно небольшое их число заметно снижает значение средней по спектру энергии. Отметим также, что приведенный расчетный спектр относится к режиму, соответствующему "полочке" ускоренного (примерно 6 мкс) импульса. Вклад электронов, ускоренных на фронтах импульса, дает дополнительное расширение энергоспектра электронов всего 6 мкс-импульса.

1.2. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ УСКОРЕННОМ ПУЧКЕ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Результаты расчета динамики пучка в ускорителе передаются в программу "BEAM SCANNING" в виде файла с характеристиками макрочастиц, моделирующих импульс электронов длительностью до 6 мкс (который далее для краткости будем называть "сгустком"). Именно информация о "сгустках" необходима для моделирования работы системы развертки. При этом формируемый файл, описывающий такой "сгусток", должен учитывать реальную "осциллограмму" импульса ускоренных частиц. В частности, он должен содержать характеристики частиц, ускоренных на "полочке" импульса, а также частиц, ускоренных менее эффективно на переднем и заднем фронтах 6 мкс-импульса. Программа "BEAM SCANNING" использует полученную информацию о 6 мкс-сгустках ускоренных частиц и производит их трехмерный расчет, точнее, составляющих их электронов, динамики, предполагая, что "сгустки" поступают из ускорителя в систему развертки с частотой до 300 Гц. Эти сгустки, отклоняемые периодически меняющимся во времени поперечным магнитным полем, проходят раструб системы развертки, рассеиваются на фольге в выходном окне раструба и "покрывают" поверхность облучаемого объекта, перемещаемого относительно плоскости раструба с помощью конвейера.

1.3. РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ РАЗВЕРТКИ

Для расчета трехмерных профилей всех трех компонент магнитного поля системы развертки используются различные методы. Наиболее простым является задание одной, основной, компоненты магнитного поля B_y , в области, имеющей вид простого параллелепипеда в пространстве $\{x, y, z\}$. Напомним, что ось z – это ось ускорителя, ось x – направление сканирования лучом электронов, ось y – направление движения ленты конвейера с облучаемыми объектами.

Одной из основных задач, решаемых с помощью программы "BEAM SCANNING", является оптимизация пространственного распределения компонент магнитного поля с целью повышения КПД работы системы развертки и всей стерилизационной уста-

новки. Для этого на одном из начальных этапов необходимо расчет процесса облучения, в котором используется профиль магнитного поля в реально существующей установке с учетом всех его особенностей и недостатков. Он вводится в программу на основе данных из измерений распределения компонент магнитного поля в существующей системе развертки.

Для выработки рекомендаций по модификации магнитного поля будут проводиться расчеты его трехмерной (или двумерной – в упрощенных ситуациях) конфигурации по различным имеющимся, а также созданным самостоятельно, компьютерным программам.

Еще одним методом улучшения работы системы развертки является выбор временной зависимости магнитного поля. В настоящее время эта зависимость является пилообразной и двухполярной. При ее практической реализации возникли отклонения от идеальной "пилы", поэтому планируется исследование их влияния на процесс облучения по созданной программе. Кроме того, очевидным представляется необходимость отказа от такой осциллограммы тока, питающего электромагнит системы развертки, так как необходима компенсация эффекта увеличения скорости сканирования электронным лучом (по оси x) при его отклонении на большие углы. Еще одним эффектом, который нужно и можно скомпенсировать выбором временной зависимости тока электромагнита, является гистерезис в ферромагнитных элементах при работе на частотах порядка нескольких герц [4].

1.4. РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ

Расчет динамики электронов, составляющих сгусток примерно 6 мкс-длительности, основан на численном решении релятивистских уравнений движения в заданном, меняющемся во времени пространственно неоднородном магнитном поле, содержащем, в общем случае, все три компоненты. Собственными полями релятивистского пучка пренебрегается. Расчет построен таким образом, что вычисляются траектории электронов в серии сгустков, следующих с частотой 300 Гц в течение нескольких периодов изменения магнитного поля системы.

Важным этапом динамики электронов в системе развертки пучка является процесс их рассеяния при прохождении 50 мкм-титановой фольги в выходном окне раструба. Для его моделирования используется следующий метод. Полагая, что рассеяние пучка является многократным и на малые углы, используем формулу для среднеквадратичного угла рассеяния [5, 6], характеризующего такой процесс. А при пролете электронами сквозь фольгу присваиваем их поперечным импульсам добавку, обусловленную рассеянием, с использованием датчика случайных чисел. Он имитирует случайность процесса рассеяния и определяет распределение электронов по углам [7] как в пространстве импульсов, так и в конфигурационном пространстве. Тестовые расчеты показали, что такой способ удовлетворительно точно описывает экспериментально зафиксированное увеличение диаметра пятна с нескольких миллимет-

ров на внутренней поверхности фольги, оставленного нерассеянным пучком, до нескольких сантиметров на расстоянии около 5 см после фольги – рассеянным на фольге пучком.

1.5. ВЫДАВАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В качестве результатов расчета программа выдает следующую информацию. Прежде всего, это величина кинетической энергии электронного потока, поступившей в систему развертки из ускоряющей структуры за время расчета. Характерное значение энергии одного 6 мкс-сгустка электронов составляет 5...7 Дж. Общая энергия электронных сгустков за время облучения, равное, например, 1 с, при частоте следования сгустков в 300 Гц, составит, следовательно, 1,5...2 кДж. Программа вычисляет полную энергию пучка, попавшую на поверхность облучаемого объекта за время облучения. Отношение этих величин дает общий КПД использования электронного пучка в установке. Программа анализирует каналы потерь электронов в процессе облучения. Так, вычисляются потери на стенках раструба, в промежутках между облучаемыми объектами, расположенными на ленте транспортера, потери электронов, отклоненных (по оси x) на расстояние, превышающее размер объекта в направлении развертки пучка, а также в областях, лежащих одновременно между объектами на конвейере и вне объектов в направлении развертки. Отметим, что необходимость использования впустую части сгустков обусловлена требованиями к однородности облучения стерилизуемых объектов, в частности, в областях, близких к границам объекта. Значения поверхностной плотности энергии, выделяемой электронным пучком, ее распределение по поверхности объекта и степень неоднородности, являются одними из основных результатов работы программы. Информация об этом выдается как графически, так и численно (см. ниже).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

На Рис.2 показан след, оставленный одним сгустком на внутренней поверхности фольги раструба.

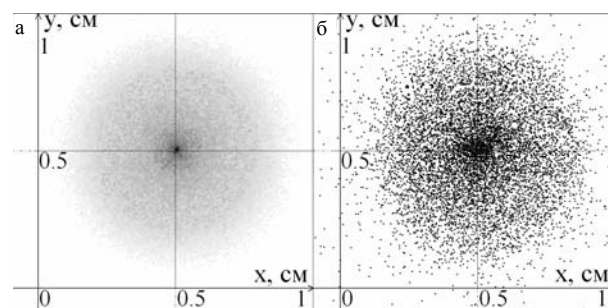


Рис.2. Следы от электронного сгустка на внутренней поверхности фольги

След оставлен сгустком, еще не испытавшим рассеяния на фольге. На Рис.2,а показана поверхностная плотность кинетической энергии электронов, на Рис.2,б – положения макрочастиц, моделирующих сгусток электронов (точнее, некоторых из них). Рисунок демонстрирует различные способы пред-

ставления информации об облучении объектов электронным пучком. Заметим, что величина поверхностной плотности кинетической энергии электронов пропорциональна степени потемнения изображения. Максимальная величина плотности на приведенном рисунке имеет порядок 100 Дж/см^2 .

На этом рисунке, а также на всех последующих рисунках, перекрестье тонких вертикальной и горизонтальной линий указывает положение оси ускорителя. В зависимости от вида расчета оно оказывается разным в плоскости (x, y) . На Рис.2 ось ускорителя имеет координаты x и y , равные $0,5 \text{ см}$.

Рис.2 соответствует ситуации с нулевым магнитным полем в системе развертки. Видно, что характерный размер пятна составляет несколько миллиметров. В то же время очевиден пик плотности на оси системы. Причина его появления связана с отсутствием магнитной фокусировки в ускорителе с фокусировкой СВЧ-полем [8].

Следующий рисунок иллюстрирует роль процесса рассеяния электронного пучка в титановой 50 мкм -фольге, расположенной в выходном окне раструба системы развертки и служащей для отделения вакуумированной части установки от атмосферы. На Рис.3 показаны два пятна, оставленные сгустком, прошедшим рассеивающую фольгу, на расстояниях 5 и 10 см от ее плоскости.

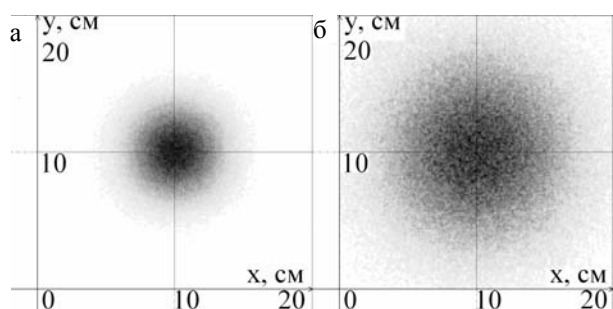


Рис.3. Поверхностная плотность энергии сгустка, испытавшего рассеяние на фольге: на расстоянии 5 см (а) и 10 см (б) за фольгой

Видно, что размер пятен заметно вырос из-за рассеяния пучка: примерно до 7 и 10 см в диаметре на расстояниях 5 и 10 см соответственно. Видно также, что вследствие рассеяния электронов исчезла осевая пик плотности пучка.

Для иллюстрации влияния разброса частиц по энергии проводились расчеты с искусственным моноэнергетическим сгустком. Он создавался простым присвоением продольным компонентам импульса макрочастиц одного значения, соответствующего средней по спектру энергии сгустка. При этом сгусток сохранял значения суммарной кинетической энергии и заряда исходного моноэнергетического сгустка.

На Рис.4 показано два пятна: от сгустка с "реальным" расчетным энергетическим спектром и от искусственного моноэнергетического сгустка, в ситуации с отклонением магнитным полем на угол порядка 30 градусов. Координаты оси ускорителя равны $x=30 \text{ см}$, $y=5 \text{ см}$. Для наглядности расчет сделан для фольги меньшей толщины. Изображения соответствуют расстоянию 5 см от фольги.

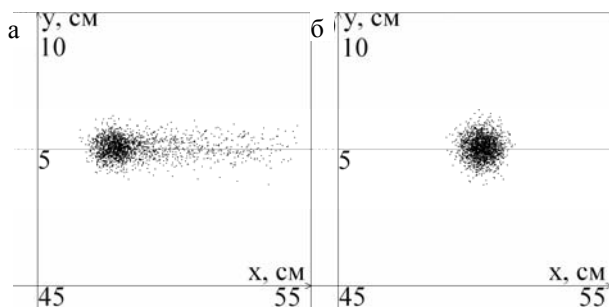


Рис.4. Изображения электронных сгустков, отклоненных магнитным полем в системе развертки: сгустка с реальным спектром (а) и моноэнергетического сгустка (б)

Видно, что изображение сгустка с реальным спектром (см. Рис.4,а) оказывается более размытым: отчетливо видны частицы с малыми энергиями, отклоненные на большие расстояния по оси x . Видно также, что центральная часть сгустка с реальным спектром отклонена на меньшее расстояние, чем центральная часть моноэнергетического сгустка, так как она содержит заметную часть частиц с энергиями, превышающими среднюю по спектру энергию.

Следующий рисунок иллюстрирует работу системы развертки электронного пучка.

На Рис.5 показано распределение поверхностной плотности энергии электронов на облучаемой поверхности в режиме движущейся мишени. Скорость движения мишени равна 20 см/с , частота развертки – 4 Гц .

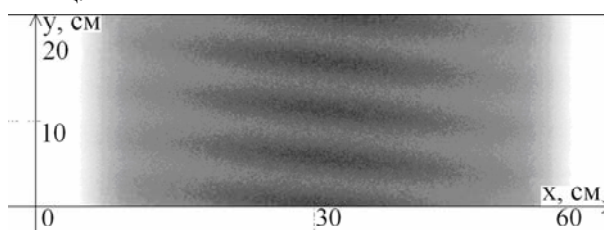


Рис.5. Поверхностная плотность энергии электронов в режиме облучения объекта на движущемся транспортере

На рисунке в плоскости $\{x, y\}$ показано, как распределена поверхностная плотность кинетической энергии электронов вдоль направления сканирования электронным лучом (ось x) и вдоль направления движения транспортера (ось y), на котором располагаются облучаемые объекты. Показан участок транспортера, облученный примерно за время $4...5$ пробогов электронного луча вдоль оси x . За время одного пробога луча система развертки оставляет следы примерно 75 сгустков (при частоте изменения магнитного поля развертки 4 Гц и частоте следования сгустков 300 Гц). На рисунке следы этих 75 сгустков слились и практически неразличимы.

Видно, что присутствует эффект увеличения скорости движения луча электронов по мере роста угла отклонения, т.е. увеличения координаты x . Он выражается в спаде поверхностной плотности энергии (т.е. степени затемнения на рисунке) по x в левой и правой границах облученной области. Этот эффект обусловлен большим углом отклонения в системе развертки.

Рисунок демонстрирует также неоднородность плотности дозы вдоль направления движения транспортера (ось y) при данной скорости его движения. Нетрудно оценить максимально допустимую скорость движения ленты транспортера, при которой обеспечивается допустимая неоднородность плотности облучения. Ясно, что для этого необходимо знать размер пятна сгустка на расстоянии, соответствующем расстоянию между фольгой раструба и поверхностью облучаемого объекта.

Отметим, что приведенные результаты являются предварительными. Так, в них используется информация о сгустке без фронтов, т.е. полагается, что в течение всего 6 мкс-импульса характеристики ускоренного пучка одинаковы. Учет реальных значений фронтов импульса дает дополнительное размытие спектра энергий сгустка. Разработанная методика позволит учесть этот эффект. Кроме того, приведенные выше результаты получены при использовании упрощенного пространственного распределения магнитного поля системы развертки.

Таким образом, создан "компьютерный инструмент", который позволит как интерпретировать экспериментальные данные по работе стерилизационной установки, так и выдавать рекомендации по совершенствованию режимов ее работы, а также по модернизации ее конструкции, прежде всего, системы развертки электронного пучка.

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, issue 9 (090101), p.1-8.
3. Н.Е. Розанов. Компьютерные программы «DINA» для расчета динамики сильноточных пучков в линейных ускорителях // *Научная сессия МИФИ-2003*, Москва: МИФИ, 2003, т.7, с.167-168.
4. П.А. Быстров. Учет гистерезиса ферромагнитных элементов при разработке системы развертки пучка // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2011, т.2, №5, с.1-4.
5. Дж. Лоусон. *Физика пучков заряженных частиц*. М.: «Мир», 1980, с.254-261.
6. E.P. Lee, R.K. Cooper. General envelope equation for cylindrically symmetric charged-particle beams // *Particle Accelerators*. 1976, v.7, №1, p.83-95.
7. Е.Г. Шейкин. Модельное дифференциальное сечение упругого рассеяния электронов на атомах для моделирования прохождения электронов в веществе методом Монте-Карло // *Журнал технической физики*. 2010, т.80, в.1, с.3-11.
8. Н.Е. Розанов. Приосевая локализация плотности немагнитного пучка // *Научная сессия МИФИ-2005*, Москва: МИФИ, 2005, т.7, с.213-214.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

METHODOLOGY AND THE COMPUTER CODE "BEAM SCANNING" FOR CALCULATION OF PROCESSES IN SCANNING SYSTEM OF THE RELATIVISTIC ELECTRON BEAM WITH THE WIDE ENERGY SPECTRUM

P.A. Bystrov, N.E. Rozanov

Methodology of calculation of processes in scanning system of sterilizing installation based on linear standing-wave RF accelerator is described. Computer code "BEAM SCANNING" based on this methodology is created. Results of preliminary calculations with the use of this code are presented. Some important effects accompanied the work of scanning system of sterilizing installation and caused by the wide energy spectrum of electron beam, by beam scattering in a titanite foil of an output window of scanning system and by the large angle of a deviation of the beam at the scanning processes are demonstrated.

МЕТОДИКА І ПРОГРАМА "BEAM SCANNING" РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ РОЗГОРТКИ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ З ШИРОКИМ ЕНЕРГЕТИЧНИМ СПЕКТРОМ

П.О. Бистров, М.Є. Розанов

Описана методика розрахунку процесів у системі розгортки електронного пучка в стерилізаційній установці на основі лінійного НВЧ-прискорювача на стоячій хвилі. Написана комп'ютерна програма "BEAM SCANNING" на основі цієї методики. Наведено результати попередніх розрахунків за допомогою цієї програми. Продемонстровані деякі важливі ефекти, що супроводжують роботу системи розгортки стерилізаційної установки і зумовлені широким енергетичним спектром пучка, розсіюванням його на фользі розтруба і великим кутом відхилення при розгортці.