

РАЗРАБОТКА МЕТОДА «РАДИАЦИОННОЙ ТЕНИ» ДЛЯ МОНИТОРИНГА РЕЖИМА СТЕРИЛИЗАЦИИ ПРОДУКЦИИ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

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

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: uvarov@kipt.kharkov.ua*

Разработан метод невозмущающего on-line мониторинга и визуализации режима стерилизации продукции сканирующим пучком электронов. Метод основан на временном анализе пространственно-энергетических характеристик электронного излучения за облучаемым объектом – «радиационной тени». В качестве монитора излучения используется секционированный свободновоздушный поглотитель в виде набора изолированных пластин из алюминия. Описаны приборный и графический интерфейсы, разработанные для реализации метода.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире годовой объем продукции, процесс производства которой на каком-либо этапе включает радиационную обработку, в стоимостных показателях оценивается в 80-85 млрд. долл. США при ежегодном приросте 10-15%. Целью такой обработки может являться модификация материалов (главным образом, полимерных и полупроводниковых), стерилизация изделий медицинского назначения, фармацевтического сырья и готовых форм, а также отдельных видов пищевой продукции.

Наиболее эффективно радиационная стерилизация реализуется на сильноточном ускорителе электронов с энергией до 10 МэВ. Этот вид обработки относится к процессам высокой степени ответственности, регламентируемым рядом национальных и международных нормативных документов. Так, стандарт [1] устанавливает процедуру квалификации радиационной установки путем измерения ее параметров, определяющих передаваемую обрабатываемой продукции величину дозы:

- энергии электронов,
- среднего тока пучка,
- ширины зоны сканирования пучка и ее однородности.

Кроме того, стандарт регламентирует порядок периодического контроля основных характеристик (квалификацию) процесса, которыми, помимо указанных, являются также скорость конвертера и поглощенная доза в обрабатываемой продукции. При этом стандарт не устанавливает конкретных методов и средств измерения этих параметров (кроме дозиметрии), а лишь указывает предъявляемые к ним общие требования.

В таких условиях наиболее приемлемым вариантом является создание системы online мониторинга параметров процесса на основе невозмущающих методов измерений. В частности, ранее методом математического моделирования было показано, что анализ распределения зарядов в размещенном за облучаемым объектом секционированном поглотителе электронного излучения (распределенный сво-

бодновоздушный цилиндр Фарадея) позволяет определить среднее значение энергии электронов и поглощаемую в объекте мощность излучения [2]. Результаты развития этого метода для мониторинга также других параметров радиационной обработки и его реализации в виде приборного и программного интерфейсов на радиационно-технологической установке с ускорителем электронов ЛУ-10 ННЦ ХФТИ [3] изложены в данной работе.

2. ОПИСАНИЕ ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВ УСКОРИТЕЛЯ

Состав и геометрия выходных устройств ускорителя ЛУ-10 в режиме обработки продукции приведены на Рис.1,2. Для перемещения изделий в зону облучения и обратно ускоритель имеет конвейер с 60-ю транспортными контейнерами размером 40×38×108 см каждый. Промежуток между контейнерами составляет 12 см. На оси зоны облучения непосредственно за конвейером размещен секционированный поглотитель (СП) пучка (10 пластин из алюминия шириной 75 и высотой 122 см, первая и последняя пластины толщиной 6 мм, остальные – 2 мм). Пластины закреплены на изоляторах с зазором 15 мм.

В процессе радиационной обработки СП воспринимает электронное излучение, прошедшее через обрабатываемый объект. При этом поток частиц, их энергетический спектр и пространственное распределение зависят от характеристик пучка, размеров и поверхностной плотности объекта. Чем выше плотность, тем большая часть пучка поглощается в объеме и, следовательно, меньшая достигает СП. В промежутке между контейнерами пучок свободно проходит на СП, и поглощенный в нем заряд возрастает. Таким образом, распределение токов с пластин СП в каждый момент времени несет информацию о режиме обработки и самом обрабатываемом объекте. Причем, для мониторинга режима представляет интерес как распределение постоянного тока с пластин, так и импульсного в зависимости от угла отклонения пучка.

Для получения и обработки этой информации создана схема, представленная на Рис.1. Сигналы от пластин СП поступают на вход восьмиканального интегратора, имеющего постоянную времени интегрирования – 100 мс. Далее, сигнал усиливается и подается на коммутатор, к выходу которого подключен 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Время преобразования АЦП составляет 3.5 мкс. Измерение сигналов на выходе интегратора производится с частотой 100 Гц. Данные с выхода АЦП поступают в ЭВМ для дальнейшей обработки и визуализации.

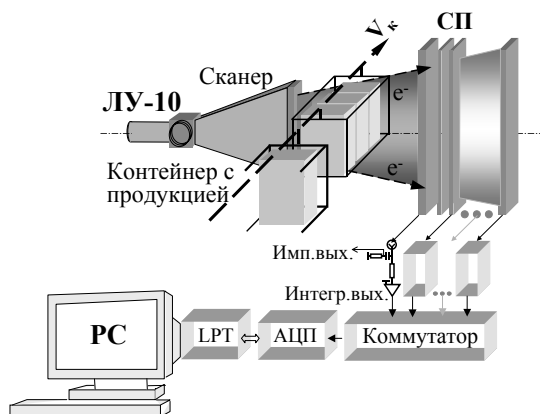


Рис.1. Выходные устройства ускорителя ЛУ-10



Рис.2. Положение СП в камере облучения ЛУ-10

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ МОНИТОРИНГА РЕЖИМА ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СП

Как было ранее установлено, при взаимодействии с объектом сканирующего пучка часть ускоренных электронов, приходящаяся на края развертки, проходит мимо объекта и поглощается в СП [2]. В свою очередь, низкоэнергетичные электроны, рассеянные под большими углами в результате взаимодействия с объектом или воздухом, минуют СП. Поэтому даже в отсутствие объекта суммарный ток пластин всегда меньше тока пучка.

На Рис.3 приведены результаты моделирования распределения тока с пластин СП – I_i (i – номер пластины) с учетом геометрии и состава оборудования в камере облучения, а также реального спектра пучка при амплитуде зоны его сканирования в плоскости выпускного окна ± 7.5 см для разных значений поверхностной плотности $\rho_{\text{пов}}$ облучаемого объекта.

Моделирование проводилось с использованием программной системы PENELOPE/2006 [4]. Из полученных данных следует, что в случае $\rho_{\text{пов}}=0$ (объект отсутствует) коэффициент сбора заряда пучка монитором составляет 68.3%.

коэффициент сбора заряда пучка монитором составляет 68.3%.

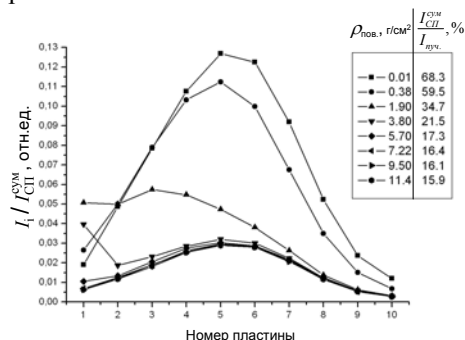


Рис.3. Распределение нормированного тока с пластин СП при различных поверхностных плотностях облучаемого объекта (сканирование ± 7.5 см)

В случае изменения энергии ускоренных электронов происходит смещение распределения поглощенного заряда в пластинах СП. Так, на Рис.4 приведены зависимости отношения суммарного тока с нескольких пластин I_{i-k} к полному току СП $I_{\text{СП}}^{\text{СУМ}}$ от энергии электронов. Оказывается, что в случае, когда пластины 1-5 соединены, суммарный относительный ток с них изменяется с энергией ускоренных электронов по закону, близкому к линейному (см. Рис.4).

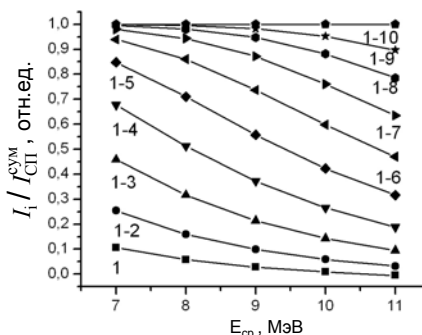


Рис.4. Зависимость нормированного тока с групп соединенных пластин СП от энергии электронов (пластины соединяются последовательно, начиная с первой; сканирование ± 7.5 см)

Как видно из Рис.4, такой метод имеет достаточно высокую разрешающую способность по определению средней энергии ускоренных электронов и может быть описан следующим математическим выражением:

$$E_{\text{cp}}(\text{МэВ}) = 14.27035 - 8.66153 \times (I_{1-5}/I_{\text{СП}}^{\text{СУМ}}). \quad (1)$$

Результаты компьютерного моделирования и эксперименты показали, что это соотношение не зависит от амплитуды сканирования пучка в практическом диапазоне 0...10 см. Следует также отметить, что этот метод измерения средней энергии электронов представляет собой упрощенный вариант стандартизованного метода клина [5].

Проведенные измерения показали, что по известным энергии электронов E_{cp} и току с первых 5 пластин I_{1-5} можно также определить среднее значение тока пучка:

$$I_{\text{пуч.}} = I_{1-5}/(1.4 - 0.1 \cdot E_{\text{cp}}). \quad (2)$$

На Рис.5 приведена зависимость полного тока СП, нормированного на ток пучка $I_{пуч.}$, от поглощенной мощности излучения в объекте $P_{полг.}$ при разной величине поверхностной плотности $\rho_{нов}$ последнего.

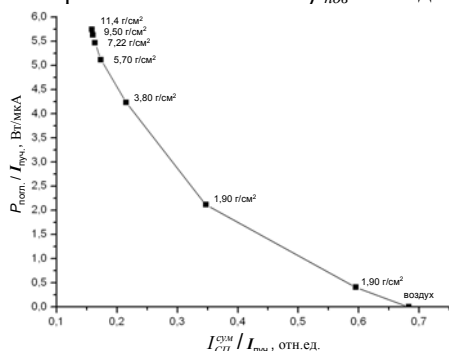


Рис.5. Зависимость поглощенной мощности излучения в объекте от нормированного тока СП (цифрами на графике указана поверхностная плотность объекта)

В практическом диапазоне значений $0 < \rho_{нов} \leq 5.7 \text{ г/см}^2$ из этой зависимости можно получить выражение для поглощенной мощности в объекте, нормированной на 1 мкА среднего тока пучка,

$$P_{полг.} (\text{Вт} / \text{мкА}) = 9.7 - 29.6 \left(\frac{I_{СП}^{сум}}{I_{пуч.}} \right) + 22.9 \left(\frac{I_{СП}^{сум}}{I_{пуч.}} \right)^2 \quad (3)$$

Время облучения τ объекта определяется его длиной L вдоль конвейера и скоростью V_k последнего

$$\tau = \frac{L}{V_k} \quad (4)$$

Отсюда, зная массу объекта m , с учетом формулы (3) можем определить усредненную по объему объекта поглощенную дозу излучения:

$$\bar{D} = I_{пуч.} (\text{мкА}) \cdot P_{полг.} \cdot \frac{L}{V_k \cdot m} \quad (5)$$

Это позволяет путем измерения полного тока СП - $I_{СП}^{сум}$, тока пучка $I_{пуч.}$ и скорости конвейера V_k контролировать поддержание заданного среднего значения поглощенной дозы в продукции при её обработке.

4. КАЛИБРОВКА СП

Для оценки точности мониторинга режима обработки измерительным каналом, имеющим СП в качестве первичного измерительного преобразователя, были выполнены независимые измерения основных параметров пучка другими аттестованными методами. Так, измерение средней энергии электронов проводилось в разных режимах ускорителя с использованием рабочего эталона мощности сканируемого пучка на основе проточного калориметра УДФТ-1 [6]. Полученные результаты приведены в Табл.1.

Таблица 1

Результаты измерения средней энергии электронов (МэВ)

№ измер.	УДФТ-1	СП	Станд. неопр., %
1	9.50	9.45	1.2
2	10.02	9.80	
3	10.06	10,02	

В Табл. 2 приведены результаты калибровки СП в режиме измерения тока пучка, проводившейся с использованием встроенного в электропровод магнитоиндукционного преобразователя (МИП) с интегратором выходного сигнала.

Таблица 2

Результаты измерения среднего тока пучка (мкА)

№ измер.	МИП	СП	Станд. неопр., %
1	820.0	803.35	1.8
2	820.0	811.33	
3	860.0	879.32	
4	860.0	869.70	

В настоящее время ведутся работы по калибровке измерительного канала на основе СП по поглощенной дозе.

5. ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

Для визуализации режима радиационной обработки продукции разработан графический интерфейс АРМ оператора (Рис.6).

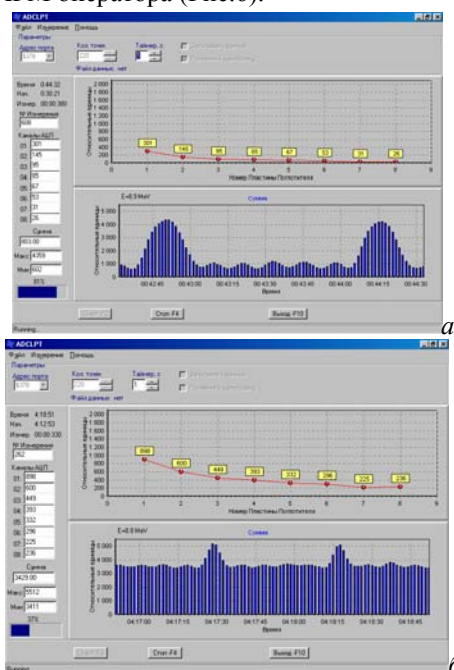


Рис.6. Графический интерфейс АРМ оператора: а - $\rho_{нов} = 7.63 \text{ г/см}^2$; б - $\rho_{нов} = 2.79 \text{ г/см}^2$

На основное рабочее окно выводится следующая информация: распределение тока с пластин СП (верхняя часть), суммарный ток с пластин СП $I_{СП}^{сум}$ (нижняя часть), средняя энергия ускоренных электронов (по центру). Картина в нижнем окне отражает степень «затенения» излучения ускорителя облучаемым объектом и в наглядном виде отражает в online режиме информацию об условиях обработки. В частности, максимумы соответствуют просветам между транспортными контейнерами, а неровности между ними – изменению поверхностной плотности, в частности, вблизи стенок ящиков с продукцией. Такое представление режима обработки с использованием получаемой от СП информации о характеристиках поля электронного излучения за обрабатываемым объектом было нами названо методом «радиационной тени».

Анализ полного тока СП позволяет также независимо определять значение V_k . Так, разработан алгоритм определения временного интервала между максимумами $I_{СП}^{сум}$, откуда величина V_k измеряется по формуле (4) в автоматическом режиме.

Информацию о положении и ширине зоны сканирования пучка относительно объекта можно получить из анализа распределения амплитуд импульсов тока с 1-й пластины СП, синхронизовав измерения с величиной тока в сканирующем магните (см.Рис.7).

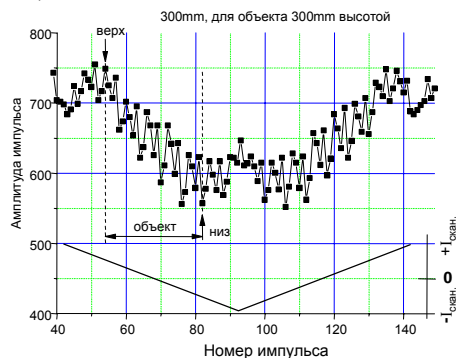


Рис.7. Зависимость амплитуд импульсов тока с 1-й пластины СП от тока возбуждения сканирующего магнита

Наблюдаемые колебания амплитуд связаны с межимпульсной нестабильностью тока пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный в работе невозмущающий метод мониторинга основных параметров сканируемого пучка электронов с использованием эффекта «радиационной тени» позволяет с помощью одного измерительного преобразователя получать информацию об основных параметрах радиационной обработки, регламентируемых нормативными документами [1]. В частности, в отсутствие облучаемого объекта метод обеспечивает возможность оператив-

ного измерения параметров пучка ускорителя (режим квалификации излучателя), а при наличии объекта – проводить мониторинг условий его обработки (квалификация процесса). Разработанные приборный и графический интерфейсы обеспечивают визуальное online представление условий обработки в удобном для оператора виде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Standard ISO 11137-2006. Sterilization of health care products – Radiation sterilization.
2. S.P. Karasyov, V.I. Nikiforov, R.I. Pomatsalyuk, et al. On a Possibility of Nondisturbing Monitoring of Electron-Radiation Absorbed Dose in Radiation-Technological Processes // *Problems of Atomic Science & Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2006, №2(46), p.201-203.
3. В.Н. Борискин, С.А. Ванжа, В.Н. Верещака и др. Развитие радиационных технологий и испытаний в НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №5(50), с.150-154.
4. F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea and J. Sempau. "PENELOPE-2006 A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport" / *OECD Nuclear Energy Agency, Issyles-Moulineaux, France, 2006*.
5. Standard ISO/ASTM 51649-2001(E). Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies between 300 keV and 25 MeV.
6. V.L. Uvarov, S.P. Karasyov, V.I. Nikiforov, et al. Beam Power Calibration system for Industrial Electron Accelerators // *Proc. Of EPAC 2004. Lucerne, Switzerland. 2004, p.2167-2169*.

Статья поступила в редакцию 03.11.2009 г.

DEVELOPMENT "RADIATION SHADOW" TECHNIQUE FOR REGIME MONITORING OF PRODUCT STERILIZATION BY ELECTRON BEAM

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

The nonperturbative method for online monitoring and visualization of the regime of product sterilization by scanning electron beam has been worked out. The method is based on the time analysis of space-energy structure of the electron radiation behind irradiated object – "radiation shadow". The sectionized air-free absorber composed of the set of plates from aluminum is used as the monitor of radiation. The instrument and graphic interfaces developed for the realization of the method are described.

РОЗРОБКА МЕТОДУ "РАДІАЦІЙНОЇ ТІНІ" ДЛЯ МОНІТОРИНГУ РЕЖИМУ СТЕРИЛІЗАЦІЇ ПРОДУКЦІЇ ПУЧКОМ ЕЛЕКТРОНІВ

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

Розроблено метод незбурюючого on-line моніторингу і візуалізації режиму стерилізації продукції скануючим пучком електронів. Метод засновано на аналізі у часі просторово-енергетичних характеристик електронного випромінювання за об'єктом, що опромінюється, – "радіаційна тінь". Як монітор випромінювання використовується секціонований вільноповітряний поглинач у вигляді набору ізольованих пластин з алюмінію. Описано приладовий та графічний інтерфейси, що розроблені для реалізації методу.