

К вопросу о внедрении радиационных технологий на ускорителе ЛУЭ-300

В.С.Балагура, Л.А.Махненко, П.М.Рябка

ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ, г. Харьков

1. ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения прикладных работ на ЛУЭ-300 после первой секции создан радиационный стенд, включающий системы вывода, формирования и диагностики пучка, устройство для дистанционной установки образцов на пучок при неподвижном облучении и конвейерную систему [1]. На стенде возможно плавное изменение энергии электронов в диапазоне от 2 до 25 МэВ и среднего тока пучка от 0 до 50 мкА.

Целью настоящей работы является определение поглощенной дозы и оптимизация конвейерного режима облучения объектов на примере стерилизации рассасывающейся хирургической нити (кетгут).

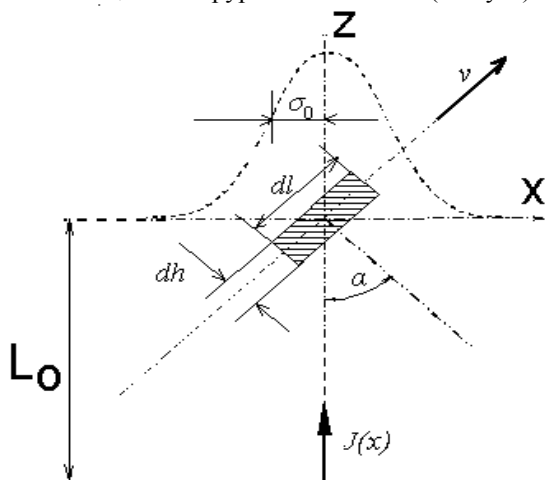


Рис.1. Ось Oy перпендикулярна плоскости рисунка.

РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

Допустим, в общем случае, элемент облучения $dV=dl \cdot dh \cdot dy$ пересекает ось электронного пучка под углом α , перемещаясь со скоростью v (рис. 1). Тогда за время $dt = dx/v \cdot \cos\alpha$, захватывая часть электронного потока с плотностью $J(x)$, он получит дозу

$$dD = \frac{J(x) \cdot \varepsilon}{e \cdot v} \cdot dt, \quad \varepsilon = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dh}, \quad (1)$$

где ε —массовая тормозная способность вещества, практически постоянная величина в диапазоне энергий 0.5÷100 МэВ [1], e —заряд электрона.

Плотность потока на расстоянии L_0 от выходной фольги канала до элемента dV равна

$$J(x) = \frac{I_0}{2\pi \cdot \sigma_0^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_0^2}\right), \quad (2)$$

где I_0 и σ_0 — ток и среднеквадратичный радиус пучка. Перемещаясь под углом к оси пучка, элемент проходит сечения с различными значениями $\sigma(x)=\sigma_0 \cdot (1+x \cdot \operatorname{tg}\alpha/L_0)$. При $L_0 \cdot \operatorname{tg}\alpha \gg \sigma_0$ этой зависимостью можно пренебречь и, используя (1) и (2), поглощенную дозу на разных уровнях по длине объекта y представить в виде

$$D = \frac{I_0 \cdot \varepsilon}{e \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot v \cdot \cos\alpha} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

На оси конвейера доза максимальна. При допустимой неравномерности дозы η вертикальный размер симметрично расположенного объекта связан со среднеквадратичным радиусом пучка соотношением $y_{\max} \leq \sigma [2\ln(\eta+1)]^{1/2}$.

3. МЕТОДИКА СТЕРИЛИЗАЦИИ КЕТГУТА

Обрабатываемый объект представляет собой тонкую нить, изготавливаемую из кишок животных, свёрнутую в моток размером 35 мм, помещенную в стеклянную ампулу с толщиной стенок 0.5 мм, диаметром $d=10$ мм и длиной $l=105$ мм, частично заполненную раствором спирта в дистиллированной воде. По условиям стерилизации требуется облучение ампулы электронным пучком до набора дозы в пределах 2÷3 Мрад каждым содержащимся внутри её элементом. Верхняя граница дозы определяется возможностью нарушения механических свойств нити. Многокомпонентность объекта (стекло, раствор, кетгут, воздух) значительно усложняет эту задачу, если учесть, что при этом необходимо обеспечить максимальное использование мощности пучка и производительности облучения на стенде в целом.

Ампулы укладывались в картонные коробки (внутренние размеры 400x110x50 мм) упорядоченно, кетгутом в одну и ту же сторону, слоями в среднем по 40 шт. Коробки устанавливались на конвейере так, чтобы ампулы располагались вертикально, кетгутом вниз.

Таким образом, объект облучения состоял из двух разных по плотности и размеру частей: нижней с $l_2=35$ мм, $\rho_2 \approx 1,3$ г/см³ (кетгут в растворе спирта) и

верхней: $l_1=70$ мм, $\rho_1 \approx 0,24$ г/см³ (незаполненные части ампул). Средняя плотность оценивалась с учётом плотности вещества и коэффициента заполнения коробок $k_s \approx 0,81$. Для более полного использования мощности электронного пучка и выравнивания поглощенной дозы по глубине объекта, коробки складывались в блоки попарно и облучение проводилось с двух сторон. Количество слоёв в каждой коробке находилось из соотношения

$$n \leq \frac{C_1 \cdot E_0 \cdot \cos \alpha}{k_s \cdot \rho_1 \cdot \varepsilon \cdot d} \quad (4)$$

где $C_1 \approx 1,1$ – коэффициент, определяющий глубину чистого вещества, на которой поглощённая доза составляет 40% от максимальной величины [2]. При энергии пучка $E_0=15$ МэВ (ограничение сверху обусловлено опасностью наведенной активности), $\alpha=55^\circ$ и $\varepsilon \approx 2$ расчетное значение $n \approx 4,6$ (использовалась четырёхслойная упаковка).

В режиме двухстороннего облучения появляется дополнительная возможность увеличения эффективности за счёт уменьшения среднеквадратичного радиуса пучка и оптимального расположения ампул на конвейере, при котором на обоих их концах набирается одинаковая доза. Параметр σ в этом случае может быть вычислен по формуле

$$\sigma = l \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \ln \gamma} \left(1 - \frac{\ln m}{\ln \gamma} \right)} - l \cdot \frac{\sqrt{-2 \ln m}}{2 \ln \gamma} \quad (5)$$

где $\gamma=2-\rho_2/\rho_1$ – коэффициент, учитывающий увеличения дозы в верхних относительно “прозрачных” для электронов частях коробок при двухстороннем облучении блока. Предполагается, что в нижней части каждой коробки со средней плотностью ρ_1 происходит практически полное поглощение энергии пучка. $m=D/D_0$ – отношение дозы на концах ампулы к максимальному значению на оси. Оптимальное смещение коробки относительно оси пучка определяется выражением

$$\Delta y = \sigma^2 \cdot \ln \gamma / l \quad (6)$$

На рис. 2 приведены результаты расчётного распределения относительной величины дозы по высоте ампулы при одностороннем (тонкая кривая) и двухстороннем (толстая кривая) облучении ($\sigma=5,3$ см, $\Delta y=1,5$ см при $m=0,8$, $\gamma=1,82$).

Рабочие параметры облучения были выбраны достаточно близкими к расчётным. Согласно (3), заданная величина максимальной дозы на оси системы 2,5 Мрад обеспечивается в режиме ускорителя по току ~ 40 мкА, при среднеквадратичном радиусе пучка ~ 6 см и скорости конвейера $\sim 0,36$ см/сек. На рис. 3 показано распределение дозы по глубине блока, где обозначены данные для одностороннего (штриховая кривая) и двухстороннего (сплошная кривая) облучения, рассчитанные по методу, изложенному в [2]. Здесь также приведены результаты измерений с помощью дозиметрической плёнки ДРД04-4 и спектрофотометра СФ-46

(кружочки соответствуют одностороннему, заштрихованные – двухстороннему облучению).

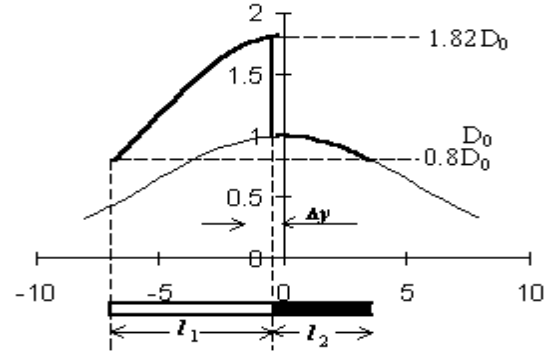


Рис. 2

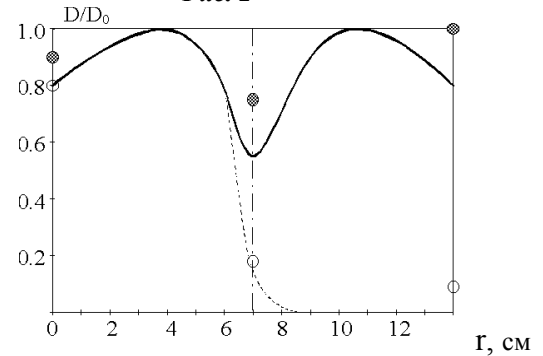


Рис. 3

В заключение отметим, что

- хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по определению абсолютного значения поглощенной дозы свидетельствует о достаточной точности (в пределах 10%) описания процесса обработки изделий на конвейере;
- использование двухстороннего облучения кетгута в ампулах позволило на 60% уменьшить среднеквадратичный радиус пучка и соответственно производительность работ;
- коэффициент эффективности использования пучка $\sim 65\%$ можно увеличить за счет применения дополнительного рассеивателя перед объектом.

Литература

1. П.М. Рябка, В.Г. Солодовник. Труды 12 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М. Т. 26, с.67.
2. Доклад 35 МК РЕ, Радиационная дозиметрия электронных пучков 1-50 МэВ, М. Атомиздат, 1988.

Статья поступила в редакцию 25 мая 1998 г.,
в издательство 3 июня 1998 г.