

УДК 62-83: 531.3

## ПОВЫШЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ УСКОРИТЕЛЯМИ ЭЛВ

**Н.К. Куксанов, С.Н. Фадеев, Д.А. Когут**

*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск*

*N.K.Kuksanov@inp.nsk.su*

Рассмотрена проблема равномерности распределения поглощенной дозы в ускорителях ЭЛВ. Величина поглощенной дозы определяется скоростью сканирования электронного пучка вдоль выпускного окна ускорителя (т. е. поперек движения конвейера). Предложен простой способ повышения величины дозы на краях выпускного устройства ускорителя (т. е. уменьшения неравномерности дозы). Система облучения, использующая данный метод, обеспечивает неравномерность не более 4 %.

*Ключевые слова:* ускорители электронов, ЭЛВ, радиационная модификация, высоковольтный выпрямитель.

### 1. Введение

Ускорители серии ЭЛВ, выпускаемые Институтом ядерной физики имени Будкера, прочно занимают лидирующие позиции среди предлагаемого оборудования для радиационной обработки материалов. Высокие эксплуатационные характеристики, широкий модельный ряд, покрывающий практически все потребности современных промышленных технологий, надежность и сравнительная простота эксплуатации и обслуживания формируют устойчивый спрос на данное оборудование в жестких рыночных условиях. Развитие технологий радиационной модификации повышает требования к параметрам выпускаемых промышленных ускорителей, стимулируя создание более мощных и эффективных моделей [1]. В ряде промышленных применений возникают и повышенные требования к другим характеристикам ускорителей ЭЛВ, таким как стабильность энергии, ток пучка, равномерность облучения [4]. Примером таких требований может служить и условие обеспечения равномерности распределенной дозы не более 4 % при использовании выпускного окна увеличенной длины.

### 2. Постановка задачи

В ускорителях семейства ЭЛВ величина дозы облучения определяется плотностью тока и линейной скоростью сканирования пучка по оси выпускного устройства [2, 3]. Рассмотрим простейший вариант геометрии магнитов для разворачивания пучка электронов вдоль окна выпускного устройства ускорителя. На рис. 1 показано отклонение электронов в поле магнитов в виде неограниченной вдоль оси  $x$  полосы шириной  $L$ .

Ускоренный вдоль оси  $z$  пучок электронов  $e^-$  попадает в перпендикулярное движению магнитное поле, отклоняющие его на угол  $\varphi$ , вычисляемый как

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

$$\sin(\varphi) = \frac{\int_l H dl}{(H\rho)}, \quad (1)$$

где  $(H\rho)$  – приведенный релятивистский импульс электрона. Представляя интеграл в виде  $\int_l H dl = K \cdot I(t)$ , где  $K$  – некоторая константа, получим следующие формулы для скорости и дозы:

$$V = h \frac{K}{(H\rho)} \frac{1}{\cos^3(\varphi)} \frac{dI}{dt}; \quad D \sim \frac{1}{V} \frac{1}{\cos(\varphi)} = \cos^2(\varphi). \quad (2)$$

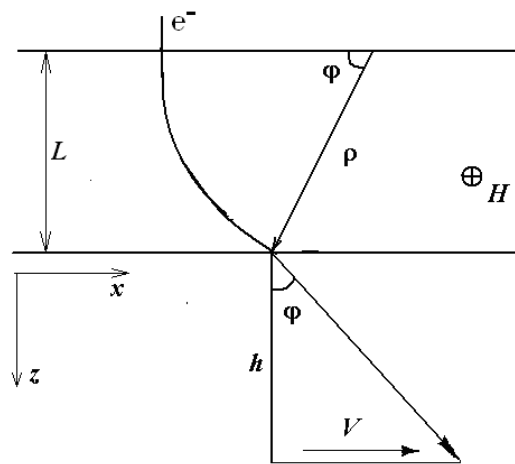


Рис. 1. Отклонение пучка полюсами в виде бесконечной ленты шириной  $l$

Для последующего сравнения приведем данные формулы к нормальному виду через отношение к величинам в момент, когда угол равен нулю  $\varphi=0$ :

$$Y_V = \frac{V(\varphi)}{V(\varphi=0)} = \frac{1}{\cos^3(\varphi)}; \quad Y_D = \cos^2(\varphi). \quad (3)$$

Приведенный метод эффективен, но при его использовании присутствует эффект краевой фокусировки пучка, заключающийся в том, что магнитное поле на краях магнитных полюсов имеет вертикальную составляющую и отклоняемый вдоль оси  $x$  пучок сжимается в направлении, перпендикулярном сканированию, что, в свою очередь, приводит к перегреву и прожиганию фольги выпускного устройства. В связи с этим было предложено показанное на рис. 2 отклонение пучка электронов с использованием цилиндрических полюсов отклоняющих магнитов, в которых отсутствует эффект краевой фокусировки пучка. В этом случае зависимости скорости и дозы от угла  $\varphi$  представляются как

$$V = h \frac{K}{(H\rho)} \frac{\cos^2(\varphi/2)}{\cos^2(\varphi)} \frac{dI}{dt}; \quad D \sim \frac{\cos(\varphi)}{\cos^2(\varphi/2)}, \quad (4)$$

а приведенные значения как

$$Y_V = \frac{V(\varphi)}{V(\varphi=0)} = \frac{\cos^2(\varphi/2)}{\cos^2(\varphi)}; \quad Y_D = \frac{\cos(\varphi)}{\cos^2(\varphi/2)}. \quad (5)$$

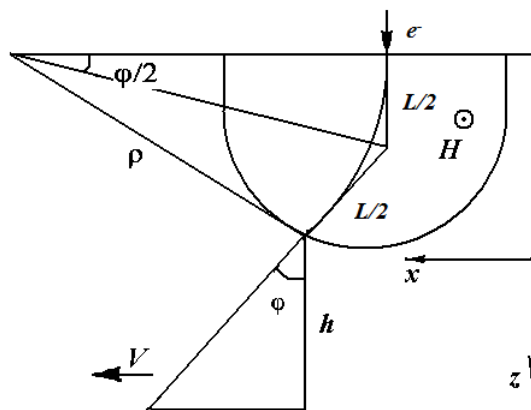


Рис. 2. Отклонение пучка цилиндрическими магнитными полюсами

Реальная форма сканирующих электромагнитов (рис. 3) определяется изложенными выше соображениями и представляет собой промежуточный вариант между приведенными вариантами.

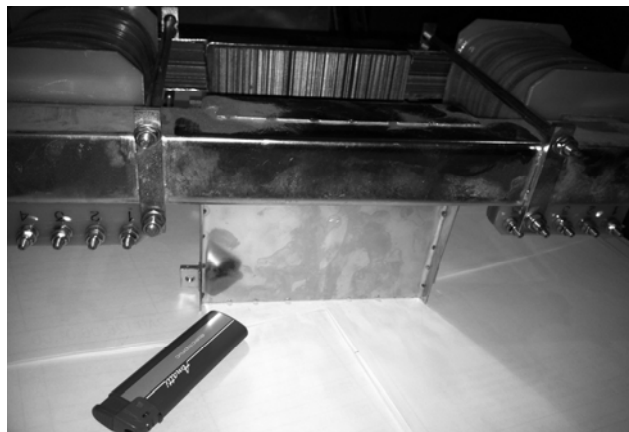


Рис. 3. Система магнитов, отклоняющих пучок вдоль выпускного окна

На рис. 4 показаны зависимости от угла расчетных значений распределения приведенных доз для рассмотренных вариантов полюсов, а также данные, полученные в результате реальных измерений при различных энергиях (0,4 МэВ; 0,6 МэВ; 0,8 МэВ). Различия обусловлены рассеянием пучка электронов как в фольге выпускного устройства, так и в воздухе [7]. Свой вклад вносит также реальная форма сканирующих электромагнитов (рис. 4).

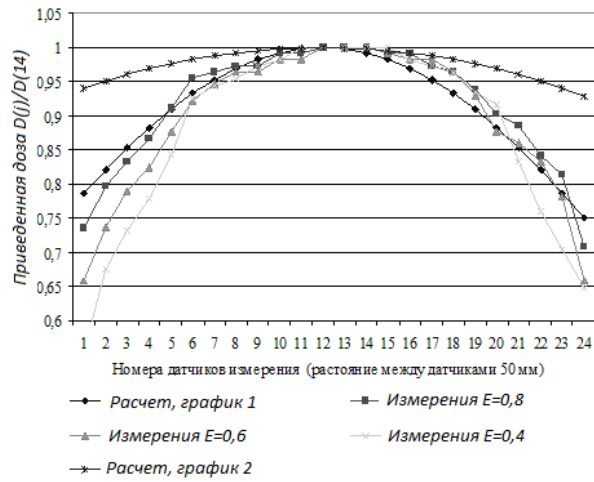


Рис. 4. Сопоставление вычислений и реальных измерений линейной однородности дозы

### 3. Изменение формы тока отклоняющих магнитов

Из сравнения графиков на рис. 4 видно, что доза распределена по длине выпускного окна неравномерно, поэтому необходимо снижать скорость сканирования пучка на краях раструба (при больших углах отклонения). Питательное напряжение имеет прямоугольную форму, и функциональная зависимость тока по времени может быть представлена в виде ряда:

$$I(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sum_{k=2n+1} \frac{\sin(wkt + \phi_k)}{\sqrt{(kwL)^2 + R^2}}; \quad \phi_k = \arctg\left(\frac{wL}{R}\right), \quad (6)$$

где  $R$  – суммарное последовательное сопротивление катушек и проводов, а  $L$  – индуктивность катушек сканера. Ток сканирующей системы имеет симметричную пилообразную форму (рис. 4) в связи с тем, что соотношение  $wL/R \approx 35 \gg 1$ .

При такой форме тока неравномерность дозы облучения по длине выпускного окна 1800 мм составила ~10...12% [5, 6]. Чтобы увеличить значение дозы на краях выпускного устройства, необходимо уменьшить скорость изменения тока при больших углах отклонения. Для этого было предложено включить последовательно со сканирующими катушками конденсаторы. Форма тока в этом случае определяется как

$$I(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sum_{k=2n+1} \frac{kwsin(wkt + \phi_k)}{\sqrt{(kwRC)^2 + \eta^2}}; \quad \phi_k = -\arctg\left(\frac{\eta}{kwRC}\right); \quad \eta = 1 - (kwLC),$$

где  $C$  – некоторая емкость, включенная последовательно с обмоткой электромагнита.

На рис. 5 показаны расчетные формы тока для обоих случаев.

Расчетная емкость находилась в диапазоне от 240 до 300 мкФ. Данная простая методика была использована при модернизации ускорителя для облучения широкого полиэтиленового листа в марте 2012 года. Измерения неоднородности дозы проводились в диапазоне энергий от 0,4 до 0,8 МэВ при токе пучка 1 мА. Результаты измерения неоднородности облучения при различных параметрах емкости и энергии показаны

ны на рис. 6. При настройке в реальных условиях дополнительная емкость составила 250 мкФ. В результате удалось достичь неравномерности дозы менее 4 %.

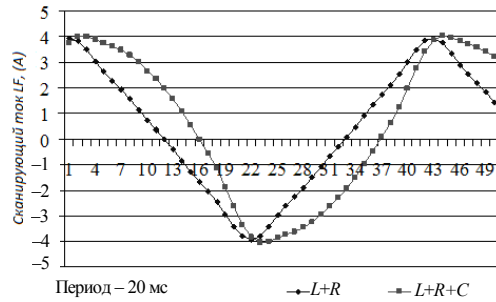


Рис. 5. Формы сканирующего тока

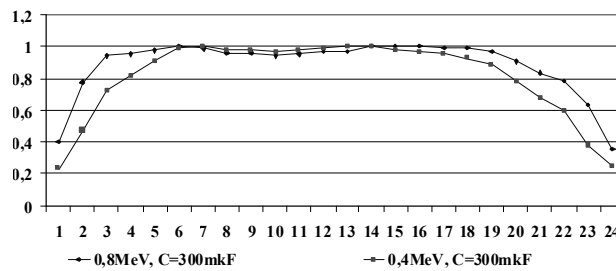
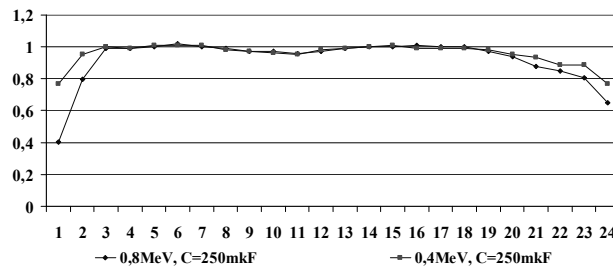
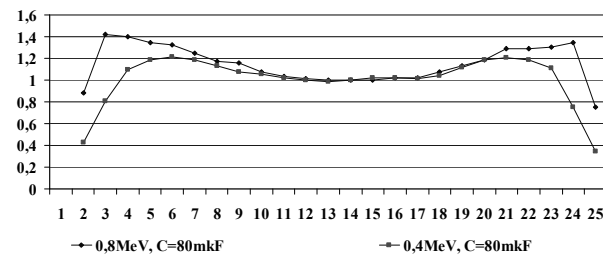


Рис. 6. Зависимость приведенной дозы облучения от энергии и емкости по длине выпускного окна. По вертикальной оси отложена приведенная доза  $D(j)/D(12)$ , где  $j$  – номер датчика измерения от 1 до 24 (расстояние между датчиками 50 мм)

#### 4. Заключение

Предлагаемая простая методика повышения величины дозы на краях выпускного устройства ускорителя (т. е. уменьшения неравномерности дозы) позволила удовлетворить технологическому процессу при использовании существующего оборудования без существенного изменения систем управления сканированием пучка, что в условиях существующего мелкосерийного производства (а в настоящее время инсталлировано и работает более 150 ускорителей ЭЛВ) унифицирует и упрощает поддержку оборудования со стороны поставщика.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] **Kuksanov N.K.** High Power ELV Accelerators for Industries Application / N.K. Kuksanov, S.N. Fadeev, Y.I. Golubenko, D.A. Kogut, A.I. Korchagin, A.V. Lavrukhin, P.I. Nemytov, R.A. Salimov // Proceeding of RuPAC-2010, Protvino, Russia. – С. 313–315.

[2] **Kuksanov N.K.** High Voltage ELV Accelerators for Industrial Application (Family of Accelerators and Tendency of Development) / N.K. Kuksanov, R.A. Salimov, B.S. Han, W.G. Kang, S.M. Kim // Proceeding of RuPAC-2012, Peterhof, Russia – С. 227–229.

[3] **Бублей А.В.** Запуск системы четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий на ЗАОр НП «Подольскабель» / А.В. Бублей, М.Э. Вейс, Н.К. Куksанов, В.Е. Долгополов, А.В. Лаврухин, П.И. Немытов, Р.А. Салимов, Н.И. Громов, В.Г. Ванькин, А.И. Ройх, М.Н. Степанов // Электротехника. – 2004. – № 3. – С. 24–29.

[4] **Вейс М.Э.** Усовершенствованный промышленный ускоритель электронов для облучения кабельной изоляции / М.Э. Вейс, Н.К. Куksанов, В.Е. Долгополов, А.В. Лаврухин, Р.А. Салимов, П.И. Немытов и др. // Кабели и провода. – М., 2004. – № 4 (287). – С. 16–19.

[5] **Фадеев С.Н.** Подпучковое оборудование для расширения технологических возможностей ускорителей ЭЛВ / С.Н. Фадеев, Р.А. Салимов, П.И. Немытов и др. // Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1–4 октября, 2001. – С. 68. См. также Вестник «Радтех-Евразия», Новосибирск, 2002. – С. 8–13.

[6] **Fadeev S.** «Underbeam equipment to expand technological capabilities ELV accelerators», Proceedings of the X International Workshop on the Application of Charged Particle Accelerators in industry and medicine / S. Fadeev, R. Salimov et al. // St. Petersburg, October 1–4, 2001. 68. See also Bulletin «Radteh – Eurasia». – Novosibirsk, 2002. – P. 8.

[7] **Kuksanov N.** The development of the model range and the improvement of the performance accelerators / N. Kuksanov, S. Fadeev et al. // VANT № 3 March 2012. – P. 15 (1996); <http://vant.kipt.kharkov.ua>

**Kuksanov N.K., Fadeev S.N., Kogut D.A.**

#### THE IMPROVING OF UNIFORMITY OF THE ELECTRON-BEAM TREATMENT OF MATERIALS BY ELV ACCELERATORS

The problem of the absorbed dose distribution during the EB treatment by ELV accelerator is considered. The value of the absorbed dose is determined by the speed of scanning electron beam along the accelerator exit window (i.e. the movement across the conveyor). It is determined both by the shape of scanning current and by the geometry of scanning magnets. A simple way to improve the dose distribution near the edges of the extraction device of accelerator is suggested. It allows to provide the non-uniformity less 4 %.

*Keywords:* ELV; Industrial accelerator; Electron beam; Radiation.

*Статья поступила 24 декабря 2012 г.*