

Об оценке неравномерности поглощенной дозы излучения при облучении материалов ускоренными электронами

Л. В. ЧЕПЕЛЬ

УДК 621.039.83

Для эффективного использования на производстве излучения электронных ускорителей в непрерывных радиационных процессах необходимо, чтобы глубина проникновения электронов была близка к толщине облучаемого материала. Однако при этом ввиду специфики взаимодействия быстрых электронов с веществом неравномерность распределения поглощенной дозы по толщине облученного материала будет близка к 100% (рис. 1) [1]. Поэтому на практике часто применяют непрерывную транспортировку облучаемого материала [2] с многократным прохождением под развернутым в «ливню» [3] пучком электронов. Это позволяет эффективно использовать энергию электронов и одновременно улучшить равномерность облучения материала по толщине. В качестве примера можно указать на облучение тонкого материала (толщина которого значительно меньше по сравнению с длиной пробега в нем электронов данной энергии) при намотке его на бобину, вращающуюся с постоянной линейной скоростью, или при движении материала «змейкой» через ряд валков. При этом должно соблюдаться вышеуказанное соответствие между длиной пробега электронов и суммарной толщиной облучаемого материала.

На рис. 1 показано распределение поглощенной дозы по толщине материала при его облучении электронами в зависимости от их длины пробега R . Тогда при толщине облучаемого материала h энергия электронов будет полностью использована, если материал пройдет под пучком n раз таким образом, что каждый раз будет иметь новое дискретное значение поглощенной дозы, определяемое кривой рис. 1. При этом величина n определяется соотношением $n = \frac{R_m}{h}$, а нерав-

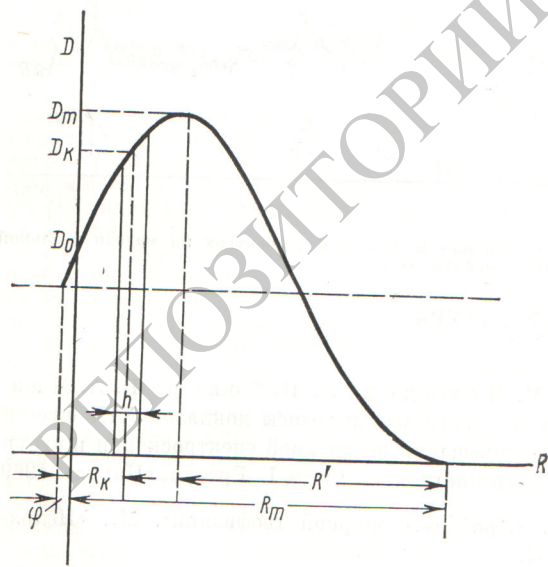


Рис. 1. Распределение поглощенной дозы по толщине материала при его облучении электронами в зависимости от длины пробега электронов.

номерность облучения материала по толщине должна уменьшаться с увеличением n .

В работе [4] была сделана попытка оценить неравномерность поглощенной дозы излучения, когда в качестве источника электронов использовался импульсный ускоритель. При этом предполагалось, что поглощенная энергия электронов распределяется равномерно по толщине материала на отрезке, равном $2/3 R_m$.

Рассмотрим более точное решение этой задачи, когда распределение поглощенной дозы по толщине материала может быть представлено в аналитической форме. Кривая рис. 1 для веществ с плотностью, близкой к единице, и для энергии электронов в диапазоне от нескольких десятых до нескольких мегаэлектрон-вольт может быть с хорошей степенью точности представлена в виде отрезка синусоиды с периодом $T = 2R'$ и фазой $\varphi = \arcsin(2 \frac{D_0}{D_m} - 1)$,

т. е.

$$D = 0,5D_m \left[1 + \sin \left(\frac{2\pi}{T} R + \varphi \right) \right] = 0,5D_m \left\{ 1 + \sin \left[\frac{\pi}{R'} R + \arcsin \left(2 \frac{D_0}{D_m} - 1 \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

Выражение (1) учитывает изменение формы кривой поглощения при снижении энергии электронов (в области ниже 1 МэВ), когда за счет поглощения заметной части энергии пучка в мембране выходного окна ускорителя отношение D_0/D_m будет возрастать. То же самое будет при введении в пучок поглощающих фильтров для выравнивания дозы на участке от D_0 до D_m .

В частном случае для кривой рис. 1 коэффициенты, входящие в выражение (1), имеют значения $D_0 \approx 0,6 D_m$ и $T = 2R' \approx 1,4 R_m$, а распределение поглощенной дозы будет иметь вид *

$$D \approx 0,5D_m \left[1 + \sin \left(\frac{4,5R}{R_m} + 0,2 \right) \right]. \quad (2)$$

Величина дозы D_Σ , поглощаемой в материале при его многократном прохождении через пучок в предположении, что зазоры между слоями отсутствуют, в общем случае, когда $h < R_m$, определяется формулой

$$D_\Sigma = \sum_{k=1}^{k=n} D_k \approx 0,5D_m \sum_{k=1}^{k=n} \left[1 + \sin \left(\frac{4,5R_k}{R_m} + 0,2 \right) \right], \quad (3)$$

где

$$R_k = kh - \frac{h}{2}. \quad (4)$$

Отсюда после суммирования с использованием известных формул [6] получим

$$D_\Sigma \approx 0,5D_m n \left(1 + \frac{0,5}{n \sin \frac{2,25}{n}} \right). \quad (5)$$

* Это выражение по своим коэффициентам близко к аналогичному выражению, полученному в работе [5].

Формулы для оценки неравномерности (η) поглощенной дозы излучения при облучении материала одинаковой толщины

Вид намотки	Вид общего члена суммирования	Неравномерность значений поглощенной дозы излучения в материале	
		общий вид	частный случай
Бобина	$D_k \approx 0,5D_m \left[1 + \sin \left(\frac{4,5}{R_m} hk + 0,2 \right) \right]$	$\eta = \frac{\sum_{k=0}^{k=n-1} D_k - \sum_{k=1}^{k=n-1} D_k}{\sum_{k=0}^{k=n-1} D_k + \sum_{k=1}^{k=n-1} D_k}$	$\eta \approx \frac{1,2 \operatorname{tg} \frac{2,25}{n}}{2n \operatorname{tg} \frac{2,25}{n} + 1}$
«Змейка» (n — четное)	$D_{2k} \approx 0,5D_m \left[1 + \sin \left(\frac{4,5}{R_m} h2k + 0,2 \right) \right]$	$\eta = \frac{2 \left(\sum_{k=0}^{k=\frac{n}{2}-1} D_{2k} - \sum_{k=1}^{k=\frac{n}{2}} D_{2k-1} \right) - D_0}{2 \left(\sum_{k=0}^{k=\frac{n}{2}-1} D_{2k} + \sum_{k=1}^{k=\frac{n}{2}} D_{2k-1} \right) - D_0}$	$\eta \approx \frac{\operatorname{tg}^2 \frac{2,25}{n}}{2n \operatorname{tg} \frac{2,25}{n} + 1}$
«Змейка» (n — нечетное)	$D_{2k-1} \approx 0,5D_m \times \left\{ 1 + \sin \left[\frac{4,5}{R_m} h(2k-1) + 0,2 \right] \right\}$	$\eta = \frac{2 \left(\sum_{k=0}^{k=\frac{n-1}{2}} D_{2k} - \sum_{k=1}^{k=\frac{n-1}{2}} D_{2k-1} \right) - D_0}{2 \left(\sum_{k=0}^{k=\frac{n-1}{2}} D_{2k} + \sum_{k=1}^{k=\frac{n-1}{2}} D_{2k-1} \right) - D_0}$	

В случае, когда $h \ll R_m$,

$$D'_\Sigma = \bar{D}n \approx \frac{1}{h} \int_0^{R_m} D dR, \quad (6)$$

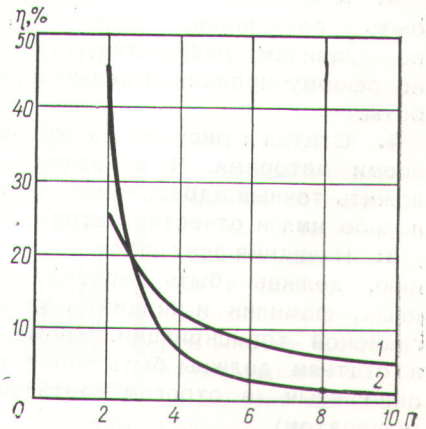
где \bar{D} — усредненное значение поглощенной дозы на отрезке R_m . После интегрирования с учетом соотношения (2) получим

$$D'_\Sigma \approx 0,61D_m n. \quad (7)$$

Легко показать, что в пределе, когда $n \rightarrow \infty$, формула (5) переходит в формулу (7) и различие в D_Σ и D'_Σ уже при $n > 6$ не превышает 1%.

Однако доза, вычисленная по формуле (5), является, согласно выражению (4), «средним» (ближким к среднеарифметическому) значением между величинами доз на противоположных поверхностях облучаемого материала, и при малых значениях n неравномерность поглощенной дозы излучения по толщине облучаемого материала может быть значительной.

В таблице приведены формулы для оценки неравномерности поглощенной дозы излучения в материале по его толщине, выведенные из выражения (2) для частного случая. На рис. 2 представлена зависимость неравномерности поглощенной дозы излучения от n , полученная для одного и того же материала одинаковой толщины при его облучении в случае намотки на бобину (кривая 1) и движения «змейкой» (кривая 2). Можно



Р и с. 2. Зависимость неравномерности поглощенной дозы излучения (η) от n .

видеть, что второй способ перемещения материала под пучком для $n > 3$ является более предпочтительным. В целом рассмотренный способ расчета может быть использован в границах пригодности выражения (1) для описания с заданной степенью точности реального распределения поглощенной дозы по толщине облучаемого материала.

Поступило в Редакцию 13/1 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Чарлзби. Ядерные излучения и полимеры. М., Изд-во иностр. лит., 1962, стр. 42.
2. D. Trageser. Nucl. Instrum. and Methods, **11**, 248 (1961).
3. Д. М. Марголин и др. «Приборы и техника эксперимента», **3**, 186 (1967).
4. Л. В. Чепель, А. Х. Брегер, В. Л. Карпов. В сб. «Электронные ускорители». М., Атомиздат, 1966, стр. 399.
5. К. И. Никулин, Г. А. Образцов. «Атомная энергия», **23**, 50 (1967).
6. И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1960, стр. 43.

К сведению авторов

Авторы, направляющие свои рукописи в журнал «Атомная энергия», должны руководствоваться следующими требованиями:

1. Тексты и иллюстративные материалы представляются в трех экземплярах в окончательно обработанном для печати виде.

Содержание статьи должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков одновременно.

2. Объем обзорных статей, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей — 10—12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

3. К статьям и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов с четко сформулированной целью и результатами работы.

4. Статья и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. К рукописи необходимо приложить точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

5. Названия всех работ, присылаемых в редакцию, должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции. Кроме того, рефераты к статьям должны быть переведены на английский язык (в строгом соответствии с русским рефератом).

6. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей: инициалов и фамилий авторов, названия журнала, номера тома (подчеркнуть) или выпуска, страницы и года (в круглых скобках);

б) для книги: инициалов и фамилий авторов, полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

в) для статей в сборниках: инициалов и фамилий авторов статьи, название сборника, инициалов и фамилии составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Текст рукописей должен быть напечатан на машинке через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

8. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудно различимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

9. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовок.

10. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15×20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографии 12×18 см.

11. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

12. Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

КАК ПРАВИЛО, В ЖУРНАЛЕ МОЖЕТ БЫТЬ НАПЕЧАТАНО НЕ БОЛЕЕ ДВУХ ПУБЛИКАЦИЙ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ АВТОРА В ГОД.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.