

УДК 621.387.46:541.15

## Установка для аттестации пленочных дозиметров

### В интенсивных полях электронного излучения

БЕРЛЯНД В. А., ГЕНЕРАЛОВА В. В., ГУРСКИЙ М. Н., ЖАНЖОРА А. П.

Существует ряд технологических процессов, связанных с облучением материалов интенсивными пучками электронного излучения с энергией электронов 200—700 кэВ. При этом необходимо определять поглощенную дозу в органических материалах толщиной 100—500 мкм. С помощью пленочных дозиметров можно измерять поглощенные дозы в достаточно тонких слоях, а также определять распределение дозы по глубине облучаемого объекта. Значительный радиационный разогрев при большой мощности дозы (до  $10^7$  рад/с), активная среда (озон, продукты радиолиза), возможное накопление в диэлектрических материалах пространственного заряда [1] могут существенно повлиять на дозиметрические характеристики пленочных детекторов. Поэтому для получения с помощью пленочных дозиметров достоверных результатов необходимо тщательно градуировать их в реальных рабочих условиях с помощью абсолютного метода — калориметрического.

В работах [2—4] описан ряд калориметров, применявшихся для градуировки пленок при энергии электронов больше 1 МэВ. Экспериментальные работы по этой проблеме при энергии электронов меньше 1 МэВ очень мало. Одной из них является работа [5], в которой измерения проводились при энергии электронов 0,3—0,5 МэВ. Можно отметить работу А. К. Дмитриева и др. [6], где градуировка полиметилметакрилата и поливинилхлорида проводилась с помощью полудиабатического калориметра полного поглощения. Однако нигде не описана достаточно полно методика градуировки детекторов, не приводится подробный анализ погрешностей измерений, узок или вовсе не указан диапазон мощности доз, при которых проводилась градуировка.

**Описание калориметрической установки.** В настоящей статье разработаны калориметрическая установка (рис. 1) и методика градуировки пленочных химических дозиметров в интенсивных полях электронного излучения. Основным элементом установки — калориметр интегрального теплового потока, работающий в стационарном режиме и осуществляющий полное поглощение падающего на него пучка электронов. Применение калориметра такого типа позволяет избежать трудностей, связанных с

наличием температурных градиентов внутри поглотителя калориметра. Для уменьшения потерь энергии на тормозное излучение и вследствие обратного рассеяния электронов поглотитель калориметра изготавливается из легкоатомных материалов и имеет полость. Поглотитель калориметра комбинированный: графитовый стакан с толщиной стенок 1 мм помещен в тонкостенный алюминиевый стакан, внешняя поверхность которого покрыта оксидным слоем. Расчеты показали, что для поглотителя такой формы и такого состава при энергии электронов 300 кэВ потери на тормозное излучение не превышает 0,1%, потери в результате обратного рассеяния электронов не более 0,6%. Для градуировки калориметра джоулевым теплом внутри поглотителя помещен нагревательный элемент из манганиновой проволоки. Тепловой поток от поглотителя калориметра пропорционален в стационарном режиме мощности тепловыделения внутри поглотителя. Регистрируется тепловой поток с помощью термобатареи, которая содержит несколько тысяч соединенных последовательно дифференциальных медьконстантановых термопар. Алюминиевая фольга толщиной 10 мкм предотвращает конвекцию воздуха. Для уменьшения влияния флуктуаций температуры окружающей среды применяется дифференциальная схема: два идентичных калориметра включены навстречу друг другу.

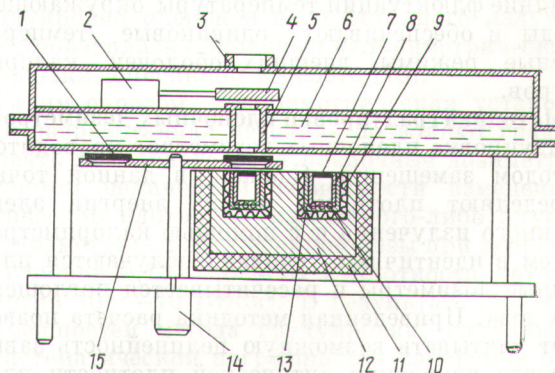


Рис. 1. Схема калориметрической установки:

1 — детекторы; 2 — электромагнит; 3 — коллектор электронов; 4 — затвор; 5 — коллиматор; 6 — экран с водяным охлаждением; 7 — алюминиевая фольга; 8 — графитовый стакан; 9 — термобатарея; 10 — нагревательный элемент; 11 — пенопласт; 12 — медный блок; 13 — алюминиевый стакан; 14 — двигатель; 15 — дисковый барабан

В процессе измерения один калориметр находится под пучком электронов, а другой защищен алюминиевым экраном. Изготовленные таким образом калориметры обладают высокой теплопроводностью, малой теплоемкостью и, как следствие, небольшой постоянной времени ( $\tau = 25 \div 27$  с). Калориметры градуировались при мощности тепловыделения  $10^{-3}$ – $10$  Вт. Чувствительность изготовленных калориметров  $\sim 40$  мВ/Вт. Калориметры являются также коллекторами электронов типа цилиндра Фарадея. С их помощью можно измерять плотность потока электронов и определять среднюю энергию электронов. В процессе работы ускорителя флюктуации плотности потока энергии падающих электронов могут превышать 10–15%. Поэтому необходимо постоянно контролировать выведенный пучок электронов. В качестве монитора электронного излучения использовался коллектор электронов в форме кольца. Коллиматор диафрагмирует пучок электронов, который затем падает либо на калориметр, измеряющий плотность потока энергии электронного излучения, либо на градуируемые детекторы. Детекторы размещаются в дисковом барабане, имеющем восемь отверстий. Пленки под пучком перемещаются дистанционно с помощью двигателя. Нужная экспозиция облучения достигается с помощью затвора, приводимого в движение электромагнитом. Последовательно с электромагнитом включен таймер. Таким образом, время облучения может быть определено с достаточно высокой точностью (0,01–0,2 с). Экран с водяным охлаждением служит для защиты всей конструкции от излучения.

Медный блок и слой пенопласта снижают влияние флюктуации температуры окружающей среды и обеспечивают одинаковые температурные режимы внешних оболочек калориметров.

**Методика градуировки пленочных дозиметров.** Градуировка пленочных дозиметров проводится методом замещения. Сначала в данной точке определяют плотность потока энергии электронного излучения  $\varphi$  с помощью калориметра. Затем в идентичных условиях облучаются пленочные дозиметры и рассчитывается поглощенная доза. Приведенная методика расчета позволяет учитывать возможную нелинейность зависимости изменения оптической плотности пленок (или каких-либо других ее параметров) от поглощенной дозы.

Расчет проводится следующим образом. В результате ряда измерений устанавливается соответствие между показаниями калориметра

полного поглощения и монитора  $I$ :

$$\varphi = kI, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

В процессе облучения пленок изменяющийся со временем сигнал монитора  $I(t)$  записывается на диаграммную ленту автоматического потенциометра. Проинтегрировав записанную функцию по времени, можно по показанию монитора определить перенос энергии электронного излучения за время облучения:

$$F = \int_0^{t_0} \varphi(t) dt = k \int_0^{t_0} I(t) dt. \quad (2)$$

Сначала при данных параметрах ускорителя облучается ряд одиночных пленок. Экспозиции задаются так, чтобы перекрыть весь диапазон поглощенных доз, в котором пленки применяются (для целлофана этот диапазон 2–25 Мрад). Для каждой облученной пленки определяется перенос энергии и измеряется ее оптическая плотность. Очевидно, что поглощенная в пленке доза излучения прямо пропорциональна переносу энергии излучения.

В результате этих операций можно построить в относительных единицах градуировочную зависимость — связь между дозой, поглощенной в пленке, и некоторым параметром пленки, в качестве которого целесообразно использовать отношение  $S/S_0$  ( $S_0$  — оптическая плотность необлученной пленки); при этом уменьшается погрешность, связанная с разбросом начальных оптических плотностей дозиметрических пленок:

$$\alpha D = f(S/S_0), \quad (3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности.

Дальнейшая задача состоит в определении  $\alpha$ . Для этого пакет пленок, осуществляющий полное поглощение пучка электронов, облучается и фотометрируется. Коэффициент  $\alpha$  находится из условия нормировки

$$\sum_{i=1}^n m_i D_i = E, \quad (4)$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -й пленки из пакета полного поглощения, отнесенная к единичной площади;  $n$  — количество пленок в пакете;  $E$  — энергия, поглощенная пакетом пленок, отнесенная к единичной площади. Поглощенная энергия равна переносу энергии за вычетом энергии обратно рассеянных от пакета электронов:

$$E = F(1 - p), \quad (5)$$

где  $p$  — энергетическое альbedo; для целлофана при энергии электронов 300 кэВ оно равно 0,03 [7]. Энергией, уносимой тормозным излуче-

нием, можно пренебречь. С учетом (3)—(5)

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} m_{if} (S/S_0)_i}{F(1-p)}. \quad (6)$$

**Анализ погрешностей градуировки пленочных дозиметров.** Случайная и систематическая погрешности измерений калориметром мощности тепловыделения не превышают 0,1%. Когда измеряется плотность потока энергии пучка электронов, возникают дополнительные систематические погрешности. Часть энергии электронного излучения уносится тормозным излучением и не регистрируется калориметром. Погрешность при энергии электронов 300 кэВ по этой причине не превосходит 0,1%. Погрешность в результате уноса части энергии обратно рассеянными электронами не превышает 0,3%. Погрешность, связанная с измерением площади поперечного сечения пучка электронов, попадающих в калориметр, не более 0,3%. Погрешность вследствие возможного отклонения оси калориметра от оси пучка электронов не превосходит 0,6%. Погрешность, связанная с вкладом рассеянных в коллиматоре электронов, не более 0,5%. Таким образом, суммарная погрешность измерения калориметром плотности потока энергии электронного излучения не превосходит  $\pm 1\%$  при доверительной вероятности 0,95. Коэффициент  $k$  из уравнения (1), связывающий показания калориметра и монитора, определяется из ряда измерений. Погрешность определения  $k$  составляет для шести измерений  $\pm 2\%$ , она обусловлена флуктуациями плотности потока и энергии электронов. При облучении в пакете пленок накапливается пространственный заряд, что может привести к увеличению обратного рассеяния электронов. Для уменьшения возможного влияния этого фактора пакеты пленок завертывали в алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм, которая заземлялась. Погрешность, вносимая в результате неопределенности коэффициента обратного рассеяния электронов от пакетов пленочных детекторов, не превышает 3%. Таким образом, при градуировке пленочных дозиметров перенос энергии и поглощенная пакетом энергия определяются с погрешностью  $\pm 2,3$  и  $\pm 4\%$  соответственно. Экспериментальные данные обрабатывались на ЭВМ «Мир-1» по методу наименьших квадратов с выбором оптимальной степени аппроксимирующего полинома по критерию Фишера [8].

**Экспериментальные результаты.** Градуировка пленочных химических дозиметров из целло-

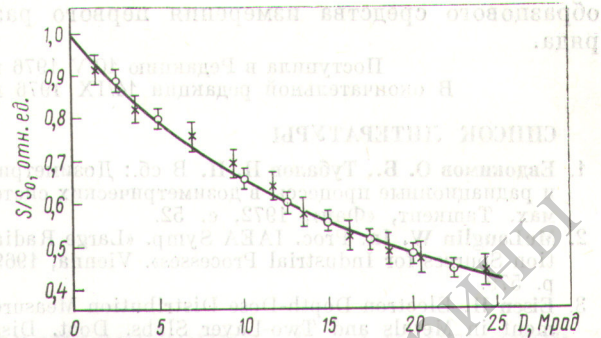


Рис. 2. Градуировочная зависимость  $S/S_0$  от поглощенной дозы электронного (×) и  $\gamma$ -излучения (○)

фана с добавлением тризинового красного красителя, изготовленного в Институте физической химии им. Л. В. Писаржевского АН УССР, проводилась на ускорителе ЭОЛ. Начальная энергия электронов 360 кэВ, ток ускорителя от 0,5 до 10 мА. Пленки облучались на расстоянии 13 см от выходного окна ускорителя. Средняя энергия падающих электронов по расчету [9], учитывающему поглощение энергии в фольге выходного окна ускорителя и в слое воздуха, составляет  $245 \pm 15$  кэВ. С помощью калориметра-коллектора была определена средняя энергия падающих электронов —  $235 \pm 10$  кэВ, что в пределах погрешности эксперимента совпадает с расчетными данными. Максимальная мощность поглощенной дозы в пленках при таких параметрах ускорителя составляла 1,2 Мрад/с. Градуировочные кривые, полученные при облучении пленок в полях  $\gamma$ - и электронного излучения, представлены на рис. 2. Градуировка пленок в поле фотонного излучения проводилась с помощью калориметрической установки, описанной в работе [10].

Таким образом, калориметрическая установка и разработанная методика позволяют градуировать различного рода пленочные дозиметры с учетом нелинейной зависимости изменения оптической плотности (или какого-либо другого параметра) от поглощенной дозы при энергии электронов 0,15—2,5 МэВ и плотности потока энергии  $10^{-3}$ — $10$  Вт/см<sup>2</sup>. В результате анализа погрешностей метода градуировки, случайной и систематической погрешностей измерения оптической плотности самой пленки было установлено, что целлофановые пленки могут быть использованы для измерения поглощенных доз электронного излучения с погрешностью  $\pm (15-20)\%$ . Установка аттестована в качестве

образцового средства измерения первого разряда.

Поступила в Редакцию 10/V 1976 г.  
В окончательной редакции 14/IX 1976 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов О. Б., Тубалов Н. П. В сб.: Дозиметрия и радиационные процессы в дозиметрических системах. Ташкент, «Фан», 1972, с. 52.
2. McLaughlin W. In: Proc. IAEA Symp. «Large Radiation Sources for Industrial Processes». Vienna, 1969, p. 579.
3. Eisen H. Electron Depth-Dose Distribution Measurement in Metals and Two-Layer Slabs. Doct. Diss. University Maryland, 1971.
4. Puig J. In: Proc. IAEA Symp. «Colloque la Radiosterilisation des Produits Medicaux et des Tissus Biologiques». Bombay, 9—13 Dec. 1974, SM-129/18.
5. Radak B. In: Proc. IAEA Symp. on Dosimetric Techniques as Applied to Agriculture, Industry, Biology and Medicine. Vienna, 17—21 Apr. 1972, SM-160/31.
6. Дмитриев А. К. и др. [1], с. 57.
7. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. М., Атомиздат, 1974.
8. Бранд З. Статистические методы анализа наблюдений. М., «Мир», 1975.
9. Berger M., Seltzer S. Studies in penetration of charged particles in matter. Washington, D. C., 1964.
10. Берлянд В. А., Генералова В. В., Гурский М. Н. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 4, с. 253.

### ПОРЯДОК ДЕПониРОВАНИЯ СТАТЕЙ

Депонирование статей осуществляется или по просьбе авторов, или по решению редакционной коллегии журнала.

В журнале печатаются подробные аннотации статей, а полные тексты хранятся в редакции в течение пяти лет и высылаются читателям по их требованию наложенным платежом. Объем аннотации не должен превышать 2 стр. машинописного текста, а объем депонируемого текста — 12 стр. В отдельных случаях в аннотацию можно включить рисунок, таблицу, основные формулы и т. п. (уменьшив соответственно объем текстового материала аннотации).

Депонированные статьи являются научными публикациями и учитываются при защите диссертаций.

При подготовке рукописей авторы должны руководствоваться следующими правилами:

1. Тексты (среди них обязательно должен быть первый машинописный экземпляр) и иллюстрированные материалы представляются в четырех экземплярах в окончательно обработанном для печати виде. Текст должен быть отпечатан через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

2. 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.

3. Единицы всех физических величин должны быть обозначены в системе СИ.

4. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовок. Допускается в виде исключения печатать отдельные большие таблицы на неформатных листах (вклейках).

5. Рисунки выполняются черной тушью на ватманской бумаге или на кальке размером не более 15×18 см; наклеивать их не следует. Рисунки должны быть достаточно отчетливыми для фотографического воспроизведения. Включение в рукопись тоновых рисунков не допускается в связи с трудностью их копирования.

В необходимых случаях тоновый рисунок выполняется штриховым методом. Обозначения и нумерацию позиций необходимо давать в соответствии со стандартами.

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

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

а) для журнальных статей — фамилий и инициалов авторов, названия журнала, года, номера тома, выпуска и страницы;

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

в) для статей в сборниках — фамилий и инициалов авторов статей, названия сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

8. Названия депонированных статей должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции.

9. Тексты и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. Необходимо указывать точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

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

В случае несоблюдения указанных правил оформления статей рукописи возвращаются авторам.

Копии текстов депонированных статей рассылаются читателям по их запросам без ограничений. При оформлении заказа на тексты необходимо указывать регистрационный номер статьи, который помещен в конце аннотации. Советским читателям копии высылаются наложенным платежом; цена одной копии 40 коп.

Заказы направлять в редакцию журнала по адресу: 101876, Москва, Центр, ул. Кирова, 18. Тел. 223-51-89.