

УДК 536.6+539.12.04

ДИАГНОСТИКА МОЩНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ КАЛОРИМЕТРОВ ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

А. П. Степовик, Д. В. Хмельницкий

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, 456770 Снежинск

С целью исследования динамических эффектов в материалах при облучении на мощных ускорителях электронов рассмотрена возможность диагностики выведенного в атмосферу пучка с использованием калориметров полного поглощения. Приведена схема кольцевого калориметра, с помощью которого выполнены измерения переноса энергии на ускорителях ИГУР-3 и ЭМИР-М до значений $(2,0 \div 2,5) \cdot 10^2$ Дж/см². Рассчитана доля поглощаемой в калориметре энергии падающих электронов, показано влияние их спектра на результаты измерений, рассмотрены вопросы теплопередачи. Установлено, что по результатам измерений можно определить среднюю по объему калориметра температуру в момент окончания действия электронного импульса, которая однозначно связана с поглощенной в калориметре энергией электронов.

Ключевые слова: электронные пучки, мощный ускоритель, поглощенная энергия, диагностика, калориметр.

Одним из способов нагружения материалов коротким импульсом механического напряжения является облучение мощным электронным пучком (длительность $10^{-8} \div 10^{-7}$ с, полный ток пучка составляет десятки килоампер) [1]. Поглощение энергии за время, много меньшее механической инерционности материала, приводит к возникновению в нем термоупругих напряжений, что позволяет изучать откольные явления, а также измерять термодинамические и упругие параметры материалов [2, 3]. Связь между возникающим тепловым давлением P и поглощенной энергией электронов E_a выражается известным соотношением [4] $P = \Gamma d E_a$ (Γ — коэффициент Грюнайзена материала; d — его плотность).

Поглощенная энергия электронов зависит от спектра и значения переноса энергии падающих электронов, которое необходимо измерять при расчете давления. (Термин “перенос энергии ионизирующих частиц” означает отношение суммарной энергии (исключая энергию покоя) всех ионизирующих частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы.) Распределение энергии по сечению выведенного в атмосферу пучка электронов в мощных ускорителях [1] недостаточно однородно, поэтому требуется разработка метода диагностики, обеспечивающего минимальное затенение чувствительным элементом поверхности облучаемых образцов (пленочная дозиметрия, фольговая калориметрия и т. д.).

Для измерения переноса энергии пучка электронов, которым облучались образцы материалов, применялись калориметры двух типов: фольговый и полного поглощения [5]. К достоинствам калориметрического метода следует отнести возможность регистрации нагрева калориметров после окончания действия помех, сопровождающих работу установок такого рода [6], а также малые размеры чувствительного элемента, что существенно из-за неоднородности излучения в сечении пучка.

Результаты измерений с помощью фольговых калориметров более подробно изложены в [5]. С использованием этих калориметров можно измерять величину переноса энергии

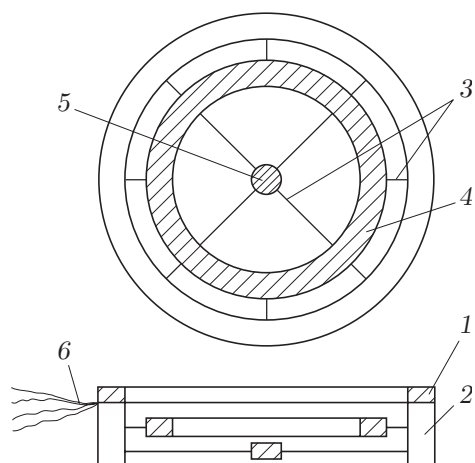


Рис. 1. Схема кольцевого калориметра:
1 — стальное кольцо; 2 — корпус; 3 — растяжки; 4 — кольцевой калориметр; 5 — центральный калориметр; 6 — термопары

электронов, падающих непосредственно на образец. Однако показания фольговых калориметров сильно зависят от материала образца (по данным наших измерений, показания могут различаться в 2–3 раза) из-за вклада в разогрев калориметров энергии отраженных от него электронов.

Использование калориметров полного поглощения позволило существенно уменьшить влияние отраженных электронов, однако с их помощью можно измерять величину переноса энергии только в окрестности образца. Погрешность измерений, обусловленная этим фактором, в значительной мере определяется степенью и видом неоднородности распределения энергии в поперечном сечении пучка электронов.

При отработке методики диагностики с помощью указанных калориметров на установках ИГУР-3 и ЭМИР-М [1] применялись локальные калориметры из меди и стали диаметром $3,5 \div 6$ мм и толщиной $2 \div 3$ мм. В тело калориметров с тыльной (по отношению к потоку электронов) стороны впаивались термопары, затем они приклеивались к пластине из текстолита (по сравнению с другими органическими материалами его стойкость к действию электронов наибольшая). При величине переноса энергии до 10 Дж/см^2 такие калориметры можно использовать неоднократно. Однако при больших значениях этого параметра (вследствие теплового удара) калориметры отлетали от платы, а при сильном разогреве отпаивались и разрушались термопары. В результате исследуемая область амплитуд динамических напряжений сужалась (до 100 МПа в алюминии).

С целью повышения стойкости калориметров к действию мощных импульсных пучков электронов разработана конструкция, схема которой представлена на рис. 1. Заземленное кольцо предназначено для защиты корпуса от действия электронов. Растяжки изготовлены из стальной проволоки диаметром 0,4 мм. В центральный калориметр запрессована одна термопара, в кольцевой — четыре (равномерно по окружности). Затенение образца диаметром $50 \div 60$ мм, определяемое площадью центрального калориметра, при его диаметре 6 мм было несущественным. Термопары проложены в проточке в корпусе и выведены в виде жгута. В экспериментах с образцами диаметром $10 \div 15$ мм в корпусе размещались несколько кольцевых калориметров (для каждого образца свой), центральные калориметры отсутствовали.

Изменение температуры калориметров регистрировалось с помощью самопишущих потенциометров ЭПП-09М3 или миллиамперметров постоянного тока Н-37 с усилителем И-37. Выбор аппаратуры обусловлен ее устойчивостью (вследствие значительной инерционности) к возникающим на установках электрическим помехам нано- и микросекундного диапазона длительности. При этом термоЭДС термопар измерялась примерно через 1 с после облучения электронами.

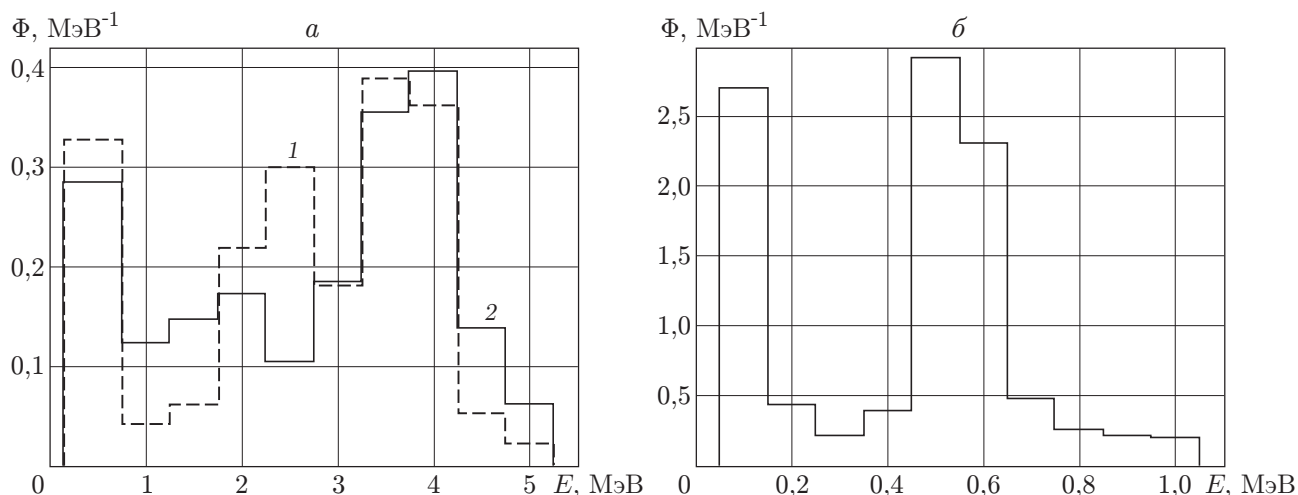


Рис. 2. Энергетические спектры электронов:

a — $E_{\text{max}} = 5,2 \text{ МэВ}$ (1 — $t' \approx 90 \text{ нс}$, $\langle E \rangle = 2,59 \text{ МэВ}$; 2 — $t' \approx 25 \text{ нс}$, $\langle E \rangle = 2,68 \text{ МэВ}$);

b — $E_{\text{max}} = 1,05 \text{ МэВ}$

При использовании разработанной конструкции для диагностики пучка электронов необходимо оценить тепловые характеристики калориметра, а также влияние спектра электронов и условий облучения на результаты измерений. При этом необходимо учитывать следующие обстоятельства. Во-первых, часть падающих на калориметр электронов отражается от его поверхности, часть электронов вылетает из объема калориметра через его боковые поверхности вследствие рассеяния и, наконец, часть энергии электронов при их торможении в веществе затрачивается на излучение фотонов. В результате на нагрев калориметра расходуется не вся энергия падающих электронов. Во-вторых, поскольку калориметр находится в атмосфере, необходимо учитывать изменение его температуры за счет охлаждения и перераспределения поглощенной энергии по объему. Для корректного учета влияния указанных выше факторов на точность диагностики пучка электронов рассмотрим их более подробно.

Для определения доли энергии электронов, поглощенной в материале калориметра, методом Монте-Карло по программе MCNP4A проведены расчеты распространения электронов в телах разной формы из железа ($d_{\text{Fe}} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ г/м}^3$). В качестве тел рассматривались кольца и диски из стали марки ст.3 толщиной $h = 0,3 \text{ см}$, в том числе с такими же размерами, как у изготовленных калориметров (радиус диска $R_0 = 0,3 \text{ см}$; внутренний радиус кольца $R_1 = 2,0; 2,25 \text{ см}$, внешний $R_2 = 2,6; 2,85 \text{ см}$). Источник электронов представлял собой плоскость, параллельную торцевой поверхности тела, и располагался на расстоянии 100 см от нее. Направление вылета электронов совпадало с направлением нормали к поверхности тела. На рис. 2 представлены три вида энергетического спектра электронов $\Phi(E)$: два “жестких” с одинаковыми значениями максимальной энергии $E_{\text{max}} = 5,2 \text{ МэВ}$ для разных режимов работы установки ИГУР-3 (длительность импульса $t' \approx 90; 25 \text{ нс}$) [1] и более “мягкий” с $E_{\text{max}} = 1,05 \text{ МэВ}$. Учитывался совместный перенос электронов и фотонов.

Результаты расчетов приведены в табл. 1 ($\langle E \rangle$ — средняя энергия электронов в пучке; E_a — энергия электронов и образовавшихся фотонов, поглощенных в калориметре; E_e , E_p — энергии электронов и фотонов, вылетевших из системы, в том числе E_{e1} , E_{e2} — энергии электронов, вылетевших из системы через другую торцевую поверхность и боковые поверхности соответственно; $\chi = E_a/\langle E \rangle$ — доля поглощенной в калориметре энергии). Все приведенные результаты нормированы на один электрон источника.