

МЕТОД ВИЗУАЛЬНОЙ ИК-РАДИОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ

Н.И. Базалеев, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Б.Б. Бандурян, В.В. Брюховецкий
Научно-технический центр электрофизической обработки НАН Украины
г. Харьков, Украина

Рассматривается метод визуальной ИК-радиометрии, основанный на регистрации температурного поля поверхности тонкого металлического экрана, расположенного в зоне воздействия пучка электронов. Метод позволяет контролировать распределение энергии излучения непосредственно на выходе источника и в рабочей зоне.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных радиационно-технологических комплексах поле доз облучения создается, как правило, развернутым в полосу пучком ускоренных электронов; определяется такими характеристиками, как плотность тока по сечению пучка, угловое и энергетическое распределение частиц в пределах рабочей зоны; регулируется изменением режима работы ускорителя и скорости движения объекта облучения [1]. Распределение плотности тока в зоне облучения определяет дозное поле, при прохождении которого облучаемые изделия набирают требуемую дозу.

В условиях конвейерного облучения объектов необходимо учитывать влияние обратно рассеянных электронов. Степень этого влияния определяется наличием отражающих поверхностей как облучаемого изделия, так и конструктивных элементов конвейера, перемещающихся относительно выпускного окна ускорителя, и зависит от материала, из которого они изготовлены.

Многие ускорители имеют немонотонный спектр пучка электронов, который в зоне облучения объекта искажается, приобретая сложное спектральное распределение (особенно при работе с пучками электронов низких энергий) при прохождении через фольгу выпускного окна ускорителя и слой воздуха до поверхности объекта облучения.

Решение многих технологических задач требует создания дозных полей больших размеров с заданной неравномерностью. Для этого необходимо предварительно расширить пучок до нужных размеров, выровнять распределение частиц в поперечном сечении и в пределах зоны облучения. Создание равномерных дозных полей больших размеров является достаточно сложной задачей в связи с широким разбросом энергий электронов в пучке. Спектральный состав излучения может корректироваться путем использования фильтров-рассеивателей, компенсаторов и пр., которые позволяют создать дозные поля больших размеров при высокой равномерности облучения и незначительных потерях мощности дозы.

Дозовые функции, определенные расчетным путем, имеют значительные расхождения с данными экспериментальных измерений [2]. Поэтому использование экспериментальных данных о распределе-

нии плотности потока электронов непосредственно в рабочей зоне (зоне облучения объекта) является наиболее действенной мерой, позволяющей максимально упростить процедуру расчета и обеспечить заданную точность технологических режимов облучения.

Методы и средства, используемые для измерения распределения плотности потока электронов, весьма разнообразны. Они определяются типом ускорителя и видом реализуемых технологий. При измерении параметров пучков электронов и поля распределения электронов в рабочей зоне применяются различные датчики и многодетекторные системы с опрашивающими и сканирующими устройствами считывания и записи данных [1,3]. Используются различные методы, в том числе ионизационные, калориметрические, химические, фотографические, метод водных фантомов и пр. Однако до сих пор не решен вопрос о корректности измерения параметров облучения, в частности, распределения плотности потока электронов в зоне облучения объектов с учетом влияния атмосферы воздуха.

Исследования показывают [4], что характеристики полей излучения существенно зависят как от способа выравнивания дозного поля (коллиматор с управляемым окном, выравнивающие фильтры, изменение режима генерирования ускорителя и др.), так и методов и технических средств контроля плотности потока электронов. При измерении распределения плотности электронов с использованием коллекторных датчиков, имеющих на входе коллимирующие диафрагмы, возникают значительные погрешности, связанные как с качеством коллимации, так и с вынужденной работой коллекторного датчика в ионизационном облаке (в условиях воздействия вторичных электронов и ионов), значительно искажающей картину измерений. Использование магнитоиндукционных датчиков совместно с коллимирующими диафрагмами также неприемлемо из-за значительных по величине ложных сигналов, вызванных вторичными электронами. Датчики резонансного типа и их измерительная система чувствительны к действию наводок, влиянию разгруппировки пучка в процессе его движения в воздухе и в зоне пролетных отверстий, неточности коллимации элемента

разрешения, что ограничивает их применение в реальных условиях эксплуатации ускорителей.

В последние годы интенсивно ведутся работы по созданию термоакустических дозиметров импульсных пучков электронов на основе тонких одномерных проволочных мишеней [5] и двумерных детекторных систем картирования полей излучения электронов. Использование двумерных детекторных систем, устанавливаемых в плоскости сечения исследуемых потоков электронов, позволяет представлять считываемую информацию в виде карт пространственного распределения плотности электронов, что значительно упрощает процедуру расчета, контроля и формирования полей излучения больших размеров и заданной конфигурации. Высокие пространственное и энергетическое разрешения таких систем могут быть обеспечены выполнением условия минимального искажения (возмущения) детекторной системой регистрируемых пучков электронов. Таким требованиям удовлетворяют тонкие плоские экраны (например, металлические фольги),

обеспечивающие незначительное возмущение и уменьшение энергии электронов. Информация о поглощенной экраном энергии ускоренных электронов и их распределении в плоскости экрана может считываться методами бесконтактного (дистанционного) контроля некоторых физических параметров поверхности экрана, изменение значений которых пропорционально поглощенной энергии и энергии воздействующих пучков электронов.

В качестве примера можно привести голографический метод регистрации распределения плотности энергии по сечению пучка ускоренных электронов [6]. В этом методе считывание информации о распределении электронов производится с помощью голографического интерферометра, регистрирующего величину плотности плазмы, генерируемой тонкой мишенью под воздействием энергии ускоренных электронов. Величина плотности плазмы пропорциональна величине плотности энергии пучка электронов в зоне воздействия.

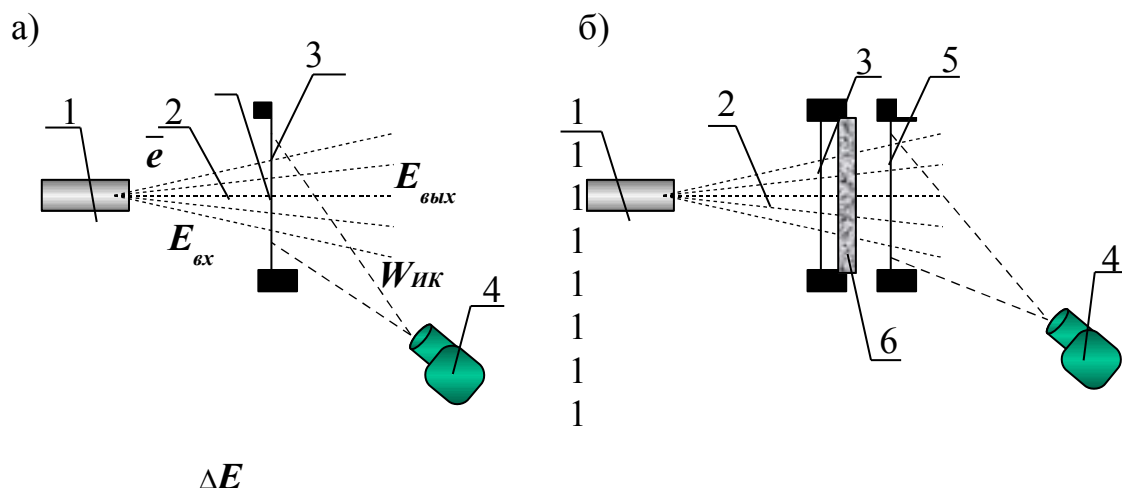


Рис. 1. Метод тепловизионного контроля/измерения:

а – поля доз облучения; б – поля поглощенных доз;

1 – источник пучка ускоренных электронов; 2 – пучок ускоренных электронов; 3 – зондирующий экран для определения доз облучения (устанавливается во фронтальной плоскости зоны облучения объекта); 4 – тепловизор; 5 – зондирующий экран для определения доз поглощения (устанавливается за объектом облучения); 6 – объект облучения; $E_{вх}$ – энергия падающих электронов; ΔE – энергия электронов, поглощенная экраном; $E_{вых}$ – энергия электронов, прошедших сквозь экран; $W_{ИК}$ – энергия ИК-излучения

2. ВИЗУАЛЬНАЯ ИК-РАДИОМЕТРИЯ

Рассмотрим возможность использования ИК-радиометрического метода для визуального контроля энергетических характеристик полей излучения и распределения электронов, основанного на регистрации температурного поля поверхности металлического экрана, расположенного в зоне воздействия пучков электронов (рис. 1).

Известно, что энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым веществом (материалом), расходуется на нагрев вещества и на его физико-химические превращения. При достаточно малых значениях толщины облучаемого экрана распределение температур на его поверхности будет

отражать распределение плотности пучков электронов, взаимодействующих с веществом экрана. Снятие с экрана информации о распределении абсолютных и относительных значений температуры (карты температурного поля) осуществляется с помощью ИК радиометрической системы – тепловизора.

Современные цифровые тепловизоры обеспечивают разрешающую способность по температуре не хуже 0,1 К (в спектральном диапазоне ИК-излучения 8...14 мкм), угловое разрешение – до 0,0002 рад, угол зрения – до 0,5 рад, что может быть использовано для построения карт пространственного распределения плотности пучков электронов, карт изодоз и дозных полей, полей рассеяния и пр. Учи-

таявая возможность цифровых тепловизоров производить необходимые расчеты и обработку данных непосредственно в процессе съемки температурной карты, метод позволяет как на этапе калибровки, так и в рабочем (технологическом) режиме работы ускорителя обеспечивать непрерывный контроль распределения потока электронов, оперативно формировать (перестраивать) дозные поля необходимой конфигурации.

Произведем оценку чувствительности метода. При расчете предполагаем, что зондирующий (измерительный) экран представляет собой тонкую металлическую фольгу, каждый элемент ΔS которой находится под действием потока электронов с плотностью ϕ . Толщина экрана $d \ll R$ (где R – глубина проникновения электронов в вещество (материал экрана)) выбирается из условия допустимого поглощения энергии электронов в фольге, обеспечивающей на поверхности экрана оптимальный температурный режим. Поглощенная энергия ΔE в некотором объеме ΔV , соответствующем элементу поверхности ΔS и содержащем вещество экрана массой Δm , определяется как

$$\Delta E = E_{ax} - E_{вых} + E_o, \quad (1)$$

где E_{ax} – энергия падающих электронов; $E_{вых}$ – энергия прошедших сквозь экран электронов; E_o – энергия всех частиц, испускаемых источниками, находящимися внутри данного объема. При этом предполагается, что потери энергии на физико-химические превращения незначительны.

Поглощенная доза в точке внутри данного объема определяется как [7]

$$D = \lim \Delta E / \Delta m = k - 1 / \rho \operatorname{div} \mathbf{J}, \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества экрана; $k = \lim E_o / \Delta m$; $\Delta m \rightarrow 0$; \mathbf{J} – вектор потока энергии через единицу площади поверхности, охватывающей данный объем за время формирования дозы. Для моноэнергетического потока электронов поглощенная доза за время t равна:

$$D = L \phi t, \quad (3)$$

где L – величина линейной передачи энергии (ЛПЭ) заряженной частицы веществу, выраженной в массовых единицах; ϕ – плотность потока частиц.

Температуру T , элемента ΔS облучаемой поверхности экрана можно определить, предполагая, что основным видом потерь являются потери на лучеиспускание в ИК-диапазоне спектра излучения, величина которых определяется законом Стефана-Больцмана. В установившемся режиме энергия пучка ускоренных электронов, поглощаемая элементом ΔS , равна энергии приращения ИК-излучения $W_{ИК}$ относительно энергии излучения элемента при температуре окружающей среды, т.е. при

$$T_s = T_{cp} \Delta E = W_{ИК} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{cp}^4) \Delta S_{изл}. \quad (4)$$

Температура T_s , облучаемого элемента поверхности ΔS определяется из выражения

$$T_s = (\Delta E / \epsilon \sigma \Delta S_{изл} + T_{cp}^4)^{1/4}, \quad (5)$$

где T_{cp} – температура окружающей среды, K ; $\Delta S_{изл} = 2\Delta S$; ϵ – коэффициент излучения поверхности экрана; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $(5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4)$

Время переходного процесса $\tau_{пер}$ установления T_s определяется как:

$$\tau_{пер} = (T_s - T_{cp}) / \Delta T_V = (T_s - T_{cp}) C_p \Delta m / \Delta E, \quad (6)$$

где $\Delta T_V = \Delta E / C_p \Delta m$ – скорость нарастания температуры элемента ΔS , K/c ; C_p – теплоемкость вещества (материала) экрана, $\text{Дж/кг} \cdot K$; Δm – масса элемента ΔS , $кг$.

Пространственное (линейное) разрешение δ_L метода можно оценить, исходя из данных расчета градиента температуры ∇T , возникающего вследствие разности температуры между элементом ΔS и прилегающей к нему поверхности экрана, а также значений температурной чувствительности T_w и линейного разрешения δ_T тепловизора:

$$\nabla T = q / \lambda = \Delta E / \lambda l_p d, \quad (7)$$

где $q = \Delta E / \Delta S_p$; λ – теплопроводность материала экрана, Вт/мК ; q – плотность теплового потока, (Вт/м^2) ; ∇T – градиент температуры вдоль поверхности экрана, K/m ; $\Delta S_p = l_p d$ – площадь сечения элемента ΔS по его периметру, m^2 ; l_p – периметр элемента ΔS .

Для ΔS , имеющего форму квадрата со стороной l , при условии $\nabla T l = T_w$ и $l > \delta_T$,

$$\delta_L = l = T_w / \nabla T. \quad (8)$$

Величина (плотность) энергии излучения E_{ax} , действующего на элемент ΔS , определяется по данным измерения температуры T_s элемента:

$$E_{ax} = T_s / f(\Delta S, \Delta E, p_1, p_2), \quad (9)$$

где $f(\Delta S, \Delta E, p_1, p_2)$ – функция (коэффициент) перевода радиационной температуры элемента ΔS в энергетические характеристики пучка электронов, воздействующих на ΔS ; p_1, p_2 , – функциональные параметры зондирующего экрана, характеризующие его теплофизические, радиационные и конструктивные характеристики.

3. ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА

На рис.2 и 3 показаны зависимости приращения температуры элемента ΔS экрана от поглощенной энергии ΔE и коэффициента излучения ϵ экрана, рассчитанные по формуле (4). Предельное значение температуры экрана $T_s = 373 \text{ K}$ ($\sim 100^\circ C$) ограничива-

ется исходя из условия минимального влияния влажности воздуха на характер (карту) распределения температуры на поверхности экрана. В этом случае область максимальных значений энергии электронов, поглощенной элементом ΔS , ограничивается значениями $\Delta E_{max} < 2 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² в зависимости от значения ϵ экрана (см. рис.2).

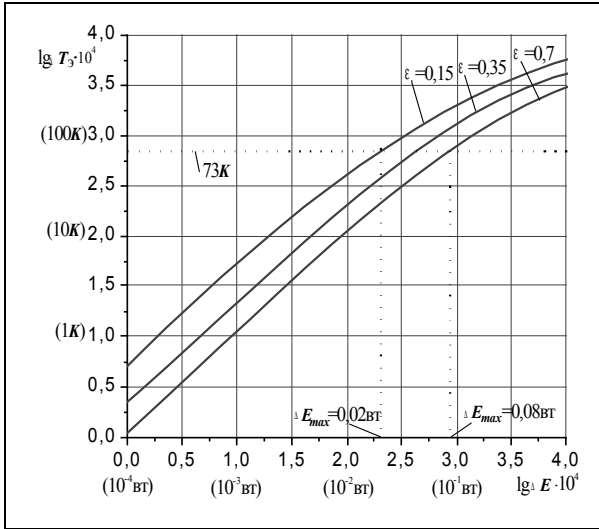


Рис.2. Зависимость приращения температуры элемента экрана ΔS от поглощенной энергии ΔE (при $T_{cp} = 300K$). $\Delta E_{max} < 2 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² область максимальных значений поглощенной энергии (зависит от величины ϵ экрана), при которой температура элемента экрана достигает 373 K ($\sim 100^\circ C$)

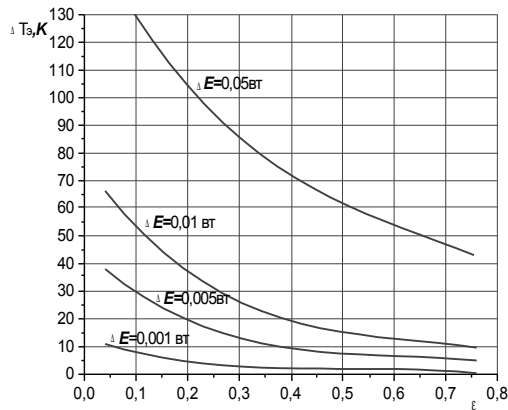


Рис.3. Зависимость приращения температуры элемента экрана ΔS от коэффициента излучения ϵ экрана (при $T_{cp} = 300K$; $\Delta E = 0,001$ Вт; $\Delta E = 0,005$ Вт; $\Delta E = 0,01$ Вт; $\Delta E = 0,05$ Вт)

Нижний порог величины поглощенной энергии ΔE_{min} определяется исходя из допустимого значения линейного (пространственного) разрешения δ_L зондирующего экрана, установленного в плоскости сечения воздействующего пучка электронов.

На рис.4 и 5 приведены расчетные данные δ_L и $\tau_{пер}$ зондирующего экрана, изготовленного из фольги

толщиной 10 мкм для различных металлов (Fe; Al; Cu; нержавеющая сталь 10X18H9ТЛ).

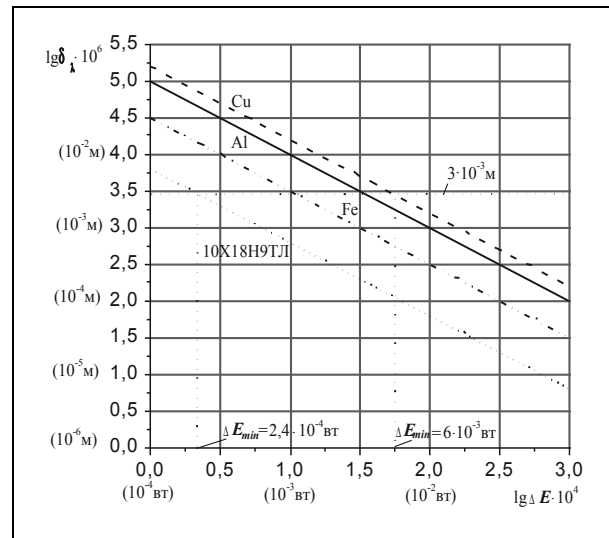


Рис.4. Зависимость линейного (пространственного) разрешения δ_L метода от материала зондирующего экрана (Cu; Al; Fe; сплав 10X18H9ТЛ). $T_{cp} = 300K$; толщина экрана $d = 10^{-5}$ м; $\Delta E_{min} > 2,4 \cdot 10^{-4} \dots 6 \cdot 10^{-3}$ Вт/см² – нижний порог величины поглощенной энергии ΔE_{min} , при которой $\delta_L < 3 \cdot 10^{-3}$ м

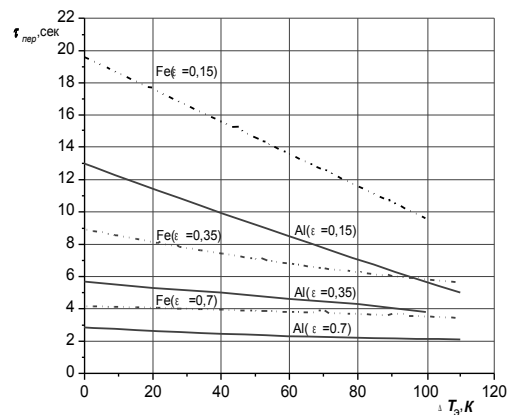


Рис.5. Зависимость времени переходного процесса $\tau_{пер}$ установления температуры T , облучаемой поверхности экрана от приращения температуры $\Delta T = (T - T_{cp})$, материала и коэффициента излучения ϵ экрана ($T_{cp} = 300K$; $d = 10^{-5}$ м)

Из графиков видно, что, например, для обеспечения $\delta_L \leq 3$ мм нижний порог поглощенной энергии ΔE_{min} для указанных материалов должен быть не менее $2,4 \cdot 10^{-4} \dots 6 \cdot 10^{-3}$ Вт/см². Использование более тонких фольг, а также сплавов железа, алюминия, меди, алюминизированной полимерной (лавсановой) пленки, имеющих малые значения теплопроводности λ , позволяет увеличить разрешающую способность δ_L до 100 мкм. Оценку относительной погрешности ξ_E измерения энергии электронов E_{ex}

можно произвести, исходя из выбора оптимального диапазона значений температуры экрана T_s , в пределах которого обеспечивается минимальное значение относительной погрешности измерения температуры ξ_T . Для значений $T_s = 310 \dots 350 \text{ K}$, $T_{cp} = 300 \text{ K}$ и $T_w = 0,1 \text{ K}$, при уровне поглощенной энергии $\Delta E = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$, погрешность измерения температуры ξ_T составляет (0,2...1)%, что соответствует измерению поглощенной энергии с точностью $10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/см}^2$. При сохранении стабильности коэффициентов поглощения (электронов) и излучения (ИК-излучения) зондирующего экрана относительная погрешность ξ_E измерения энергии электронов E_{ex} может составлять $\sim 0,5\%$.

4. ВЫВОДЫ

Особенностью метода визуальной ИК-радиометрии является бесконтактный съем информации об энергетических параметрах пучков электронов и их распределении в зоне облучения. Зондирующий экран, располагаемый в области воздействия потока электронов, практически не влияет на энергетические характеристики поля излучения и является эффективным инструментом для исследования полей излучения и поглощения электронов.

Метод позволяет определять топографию дозных полей для различных конфигураций облучаемых объектов, контролировать распределение электронов непосредственно в пространстве зоны облучения, строить карты полей рассеивания, изодоз, доз излучения и поглощения, обеспечивая высокое пространственное и энергетическое разрешение полей. Обработка и визуализация данных может

производиться как в процессе калибровки, так и в рабочем (технологическом) режиме работы ускорителя электронов, что обеспечивает возможность непрерывного контроля распределения потока электронов и измерения их энергетических показателей, оперативно формировать и перестраивать конфигурацию поля излучения электронов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Н.И. Базалеев, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко. *Электрофизические радиационные технологии*. Харьков: «Акта», 1998, 206 с.
- 2.В.А. Шишов, А.Т. Ершов. Дозовые функции электронного пучка линейного ускорителя // *Доклады IV Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве*. г. Ленинград, 1982, т. 4, с. 61–65.
- 3.А.Н. Рогоза, В.П. Шестак. Измерение разбросанных в воздухе электронов // *Доклады II Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве*. г. Ленинград, 1976, т. 2, с. 172–177.
- 4.В.И. Иванов. *Курс дозиметрии*. М.: «Энергоиздат», 1988, 400 с.
- 5.А.И. Калиниченко, Г.Ф. Попов. Термоакустическая дозиметрия импульсных пучков электронов с использованием тонких мишеней // *Тезисы докладов XV Международного семинара по линейным ускорителям* (г. Алушта). Харьков, 1997, с. 62.
- 6.А.Г. Толстолуцкий. Голографический метод регистрации распределения плотности энергии по сечению пучка ускоренных частиц // *Тезисы докладов XV Международного семинара по линейным ускорителям* (г. Алушта). Харьков, 1997, с. 70.

МЕТОД ВИЗУАЛЬНОЇ ІК-РАДІОМЕТРІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ПОТОКІВ

Н.І. Базалєєв, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Б.Б.Бандурян, В.В. Брюховецький

Розглядається метод візуальної ІЧ-радіометрії, заснований на реєстрації температурного поля поверхні тонкого металічного екрану, розташованого в зоні впливу пучка електронів. Метод дозволяє контролювати розподіл енергії випромінювання безпосередньо на виході джерела та в робочій зоні.

METHOD OF VISUAL IR-RADIOMETRY OF ELECTRON FLUX

N.I. Basaleev, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenco, B.B. Banduryan, V.V. Brukhovetskiy

Method of visual IR-radiometry based on the registration of temperature field in thin metallic screens located within zone electron beam is considered. This method permits to control the irradiation energy distribution directly at the source exit and technological zone.