

## ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВОК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева, А.В. Гайдучек

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко  
и членом редколлегии спецвыпуска профессором С.В. Пономаревым*

**Ключевые слова и фразы:** терморadiaционные характеристики; тепловое излучение; степень черноты; энергоэффективное покрытие; угловой коэффициент излучения; преобразователь теплового потока; тепловой поток.

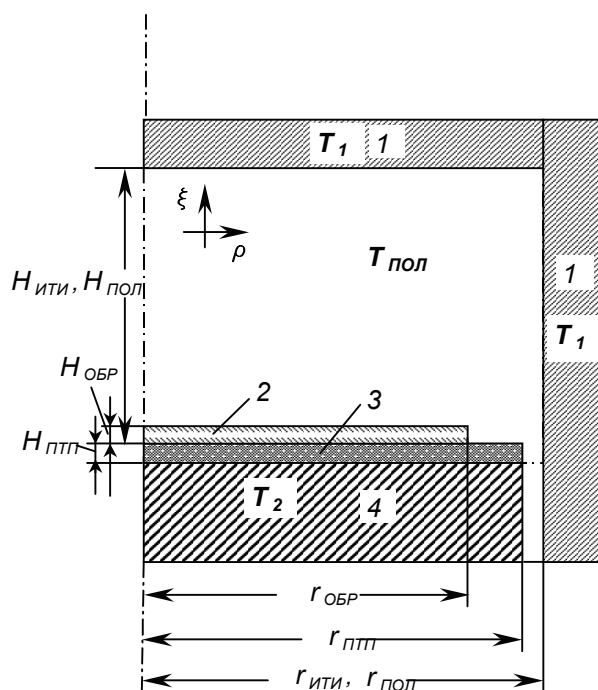
**Аннотация:** Теоретически обоснован и подтвержден вычислительным экспериментом выбор оптимального соотношения геометрических параметров исследуемого образца, полости и источника теплового излучения в установке для измерения интегральных полусферических терморadiaционных характеристик.

Обозначения	
$q$ - плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup> ; $R$ - термическое сопротивление, К/Вт; $T$ - температура, К; $z, r$ - цилиндрические координаты; $\varepsilon$ - степень черноты; $\lambda$ - теплопроводность, Вт/(мК); $\sigma$ - постоянная Стефана-Больцмана, $5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> К <sup>4</sup> ).	<b>Индексы</b> 0 – бесконечная пластина; бок – боковая поверхность образца; верх – верхний торец образца; ИТИ – источник теплового излучения; обр - образец исследуемого материала; пол - полость излучателя; ПТП - преобразователь теплового потока.

Необходимость контроля качества при производстве и приобретении стеклопакетов из стекол с энергоэффективным покрытием делает актуальной разработку и проектирование установок для измерения терморadiaционных характеристик (ТРХ).

Разработанная в ИТТФ НАН Украины установка модели ИТРС-1 предназначена для измерения интегральных полусферических ТРХ (коэффициентов излучения, поглощения и отражения) в длинноволновой области спектра инфракрасного излучения различных материалов и покрытий. Особенностью этой установки является то, что в ней реализован калориметрический метод измерения, который предусматривает получение первичной измерительной информации с применением термоэлектрических преобразователей теплового потока (ПТП) [1].

Точность измерения в приборах такого типа зависит от степени одномерности измеряемой плотности теплового потока. Однако, вследствие замкнутости пространства и определенных граничных условий поля температур и тепловых потоков преобладают искажения. Поэтому задачу их определения для осесимметричного случая следует рассматривать в двухмерной постановке. Тем не менее, как показывают многочисленные исследования, искажения в некоторых случаях могут распространяться не на всю площадь контакта ПТП с образцом. В таком случае существует зона, в которой плотность теплового потока является одномерной величиной. Величина этой зоны зависит в каждом конкретном случае от многих факторов как геометрических, так и тепловых. Если установка будет спроектирована таким образом, что чувствительный элемент ПТП будет находиться в зоне одномерности теплового потока, измеренная плотность теплового потока будет равна величине плотности входящего в образец теплового потока, и точность измерения будет определяться точностью прибора.



**Рис. 1** Схема теплового блока установки для определения интегральных полусферических ТРХ

На рис. 1 приведена схема теплового блока, который состоит из полостного излучателя 1, исследуемого образца 2, преобразователя теплового потока 3 и теплостока 4. Полость имеет форму кругового цилиндра, на внешних поверхностях его верхнего торца и боковой цилиндрической поверхности поддерживается постоянная температура  $T_1$ , а на внешней поверхности нижнего торца поддерживается температура  $T_2 = 0$ . На внутренней стороне нижнего торца помещен исследуемый образец материала с нанесенным на него покрытием. Внутренняя поверхность полости, имеющая форму перевернутого «стакана», является излучающей и служит источником теплового излучения (ИТИ). Заданный посредством ИТИ поток теплового излучения, в общем случае, частично отражается в сторону его источника, а частично, пронизывая исследуемый образец, регистрируется преобразователем теплового потока. Степень отражаемого в сторону источника теплового потока характеризует качество энергоэффективного покрытия.

В тепловом блоке приведенной конструкции может быть несколько факторов, влияющих на искажение теплового потока. К ним относятся геометрические размеры исследуемого образца, полости и ИТИ, степень черноты нанесенного покрытия, термическое сопротивление ПТП.

### Влияние размеров полости

Полость представляет собой ограниченный круговой цилиндр. Отношение плотности локального теплового потока к плотности локального теплового потока для неограниченной пластины характеризует степень искажения теплового потока вследствие ограниченности пространства. Согласно [2] двумерное распределение поля температуры  $T$  при  $T_2 = 0$  и граничных условиях 1-го рода на верхнем торце и боковой поверхности в ограниченном цилиндре определяется следующей формулой:

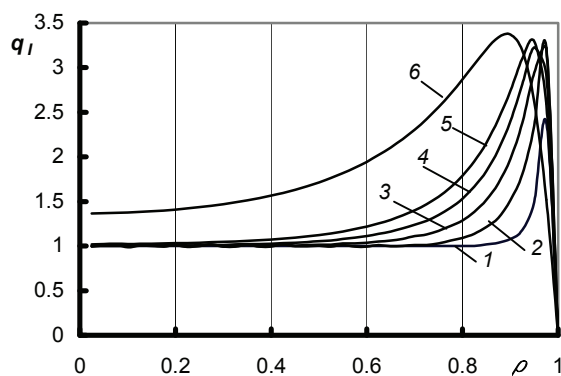
$$\theta = \frac{T}{T_1} = 1 - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_m J_1(\mu_m) \cdot \text{sh}(\mu_m h_{\text{пол}})} \cdot J_0(\mu_m \rho) \cdot \text{sh}(\mu_m h_{\text{пол}} (1 - \xi)), \quad (1)$$

где  $0 \leq \xi = z/H_{\text{пол}} \leq 1$ ,  $0 \leq \rho = r/r_{\text{пол}} \leq 1$ ,  $h_{\text{пол}} = H_{\text{пол}}/r_{\text{пол}}$ ,  $J_0(x)$ ,  $J_1(x)$  являются функциями Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядка, соответственно,  $\mu_m$  - собственные числа, определяемые из уравнения  $J_0(\mu) = 0$ .

Отношение плотности локального теплового потока в цилиндре радиусом  $r_{\text{пол}}$  и высотой  $H_{\text{пол}}$  к плотности теплового потока для бесконечной пластины толщиной  $H_{\text{пол}}$  при данных граничных условиях определится следующим выражением:

$$q_I = \frac{\partial T(r, z)/\partial z}{T_1/H_{\text{пол}}} = \frac{\partial \theta(\xi, \rho)}{\partial \xi} = 2h_{\text{пол}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{J_1(\mu_m) \cdot \text{sh}(\mu_m h_{\text{пол}})} \cdot J_0(\mu_m \rho) \cdot \text{ch}(\mu_m h_{\text{пол}} (1 - \xi)). \quad (2)$$

Для данной конструкции прибора актуально определение искажения в нижнем торце полости, то есть при  $z = 0$ .



1 -  $h_{\text{пол}} = 0,1$ ; 2 -  $0,2$ ; 3 -  $0,3$ ; 4 -  $0,4$ ; 5 -  $0,5$ ; 6 -  $1,0$

**Рис. 2** Распределение по радиусу полости излучателя приведенной плотности теплового потока

На рис. 2 можно видеть влияние относительной высоты полости на распределение по радиусу отношения плотности тепловых потоков.

### Влияние геометрических размеров ИТИ

Режимы измерения ТРХ поверхностей исследуемых образцов реализуются при малых значениях разности температур ИТИ и исследуемого образца:  $5 \leq T_{\text{ИТИ}} - T_{\text{обр}} \leq 30$ . В связи с этим к теплообмену в замкнутом пространстве в полости рабочей камеры применимы гипотезы о локальном термодинамическом равновесии и, следовательно, закон Кирхгофа. В этом случае коэффициент излучения поверхности исследуемого образца считается равным коэффициенту поглощения. Поскольку оконное стекло в длинноволновой области спектра является непрозрачным для ИК-излучения, то значение коэффициента отражения поверхности стекла находится простым вычитанием из единицы значения коэффициента поглощения.

Из сказанного следует, что необходимо определить угловые коэффициенты излучения полостного излучателя и влияние на них геометрических размеров ИТИ, то есть высоты и радиуса цилиндрического «стакана».

В соответствии с [3] распределение угловых коэффициентов для внутренней поверхности цилиндра высотой  $H_{ИТИ}$ , имеющего в основании кольцо, образованное окружностями наружного радиуса  $r_2$  и внутреннего радиуса  $r_1$  находится из следующего соотношения:

$$\varphi_{\text{кольцо}} = 0,5 \cdot \left( \frac{A(h_{ИТИ}, \rho) - B(h_{ИТИ}, \rho)}{\zeta_2^2(\rho) - \zeta_1^2(\rho)} + 1 \right), \quad (3)$$

где

$$A(h_{ИТИ}, \rho) = \sqrt{h_{ИТИ}^4 + 2h_{ИТИ}^2(1 + \zeta_2^2) + (1 - \zeta_2^2)^2},$$

$$B(h_{ИТИ}, \rho) = \sqrt{h_{ИТИ}^4 + 2h_{ИТИ}^2(1 + \zeta_1^2) + (1 - \zeta_1^2)^2},$$

$$\zeta_1 = r_1/r_{ИТИ}, \quad \zeta_2 = r_2/r_{ИТИ}, \quad \rho = 0,5(\zeta_1 + \zeta_2), \quad h_{ИТИ} = H_{ИТИ}/r_{ИТИ}.$$

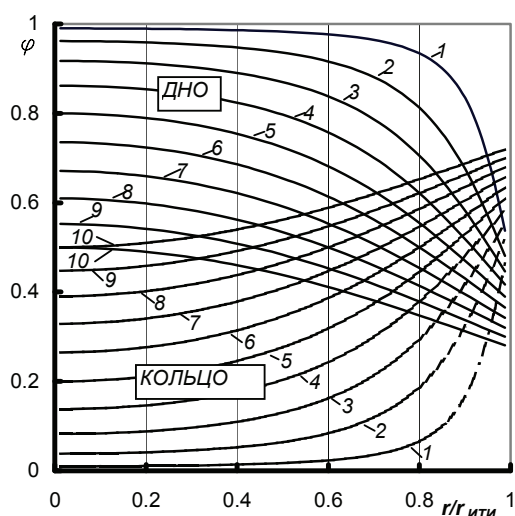
Угловые коэффициенты для дна «стакана»

$$\varphi_{\text{дно}} = 0,5 \cdot \left( 1 - \frac{C(h_{ИТИ}, \rho)}{\sqrt{C(h_{ИТИ}, \rho)^2 - 4\rho^2}} \right), \quad (4)$$

где  $C(h_{ИТИ}, \rho) = h_{ИТИ}^2 + \rho^2 - 1$ .

Суммарный угловой коэффициент теплового излучения равен сумме модулей угловых коэффициентов различных излучающих поверхностей

$$\varphi_{\text{сум}} = |\varphi_{\text{дно}}| + |\varphi_{\text{кольцо}}|. \quad (5)$$



1 -  $h_{ИТИ} = 0,1$ ; 2 -  $0,2$ ; 3 -  $0,3$ ; 4 -  $0,4$ ; 5 -  $0,5$ ;  
6 -  $0,6$ ; 7 -  $0,7$ ; 8 -  $0,8$ ; 9 -  $0,9$ ; 10 -  $1,0$

**Рис. 3** К выбору относительных размеров ИТИ

На рис. 3 приведены полученные в результате расчетов по формулам (3)-(5) распределения в радиальном направлении значения угловых коэффициентов излучения для ширины кольца  $\zeta_2 - \zeta_1 = 0,025$  м и различных значений относительной высоты «стакана».

### Влияние термического сопротивления ПТП и геометрических размеров образца

Исследуемым образцом служит стеклянная пластинка 2 радиусом  $r_{\text{обр}}$  и толщиной  $h_{\text{обр}}$  с нанесенным на нее сверху слоем покрытия со степенью черноты  $\varepsilon_{\text{верх}}$ , на боковой поверхности пластины степень черноты  $\varepsilon_{\text{бок}} = 1$ . Нижний торец стеклянной пластины находится в плотном контакте с ПТП с термическим сопротивлением  $R_{\text{ПТП}}$ .

Требуется определить степень черноты нанесенного покрытия, величина которого при реализации калориметрического метода является функцией локального теплового потока, пронизывающего пластину и измеряемого с помощью ПТП. Таким образом, задача сводится к определению зоны одномерного распределения локального теплового потока и температуры в основании ограниченной пластины, то есть в месте соприкосновения с поверхностью ПТП. Эту задачу можно трактовать как задачу об определении стационарного осесимметричного распределения температуры и локального теплового потока в коротком ограниченном цилиндре, на торцевых поверхностях которого заданы термические сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , а на боковой поверхности термическое сопротивление  $R_{\text{бок}}$ . Термическое сопротивление  $R_1$  обусловлено тепловым потоком излучения. Разложим его выражение в ряд Тейлора и ограничимся линейной частью разложения вследствие малой разности температур:

$$q_e = \varepsilon_{\text{верх}} \cdot \sigma \cdot 4T_{\text{пол}}^3 \cdot \Delta T = \frac{1}{R_1} \cdot \Delta T, \quad (6)$$

следовательно,  $R_1 = 1/(\varepsilon_{\text{верх}} \cdot \sigma \cdot 4T_{\text{пол}}^3)$ . Термическое сопротивление в основании пластины обусловлено наличием ПТП, следовательно,  $R_2 = R_{\text{ПТП}}$ . Боковое сопротивление, по аналогии с верхним,  $R_{\text{бок}} = 1/(\varepsilon_{\text{бок}} \cdot \sigma \cdot 4T_{\text{пол}}^3)$ .

Мерой искажения локального теплового потока, пронизывающего пластину, может служить отношение величины плотности теплового потока через ограниченную пластину к величине неискаженной плотности теплового потока, то есть потока через бесконечную пластину. Отклонение этого отношения от единицы характеризует степень искажения вследствие ограниченности пластины. Продольная составляющая плотности локального теплового потока через образец пластины по определению равна

$$q_{\text{лок}} = -\lambda_{\text{обр}} \frac{\partial t(r, z)}{\partial z} = -\frac{\lambda_{\text{обр}} T_{\text{среды}}}{H_{\text{обр}}} \frac{\partial \theta(\xi, \rho)}{\partial \xi}, \quad (7)$$

где  $0 \leq \xi = z/H_{\text{обр}} \leq 1$ ,  $0 \leq \rho = r/r_{\text{обр}} \leq 1$ ,  $h_{\text{обр}} = H_{\text{обр}}/r_{\text{обр}}$ ,  $\theta = (T - T_{\text{среды}})/T_{\text{среды}}$ .

Плотность теплового потока через бесконечную пластину при тех же условиях

$$q_0 = -\lambda_{\text{обр}} \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{обр}} + R_1 + R_2}, \quad (8)$$

где  $R_{\text{обр}} = H_{\text{обр}}/\lambda_{\text{обр}}$ .

Таким образом, приведенная плотность локального теплового потока определится отношением тепловых потоков (7) и (8) и будет равна:

$$\frac{q_{\text{лок}}}{q_0} = \frac{1}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta(\xi, \rho)}{\partial \xi} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_{\text{обр}}} + \frac{R_2}{R_{\text{обр}}} \right). \quad (9)$$

Для определения локальной производной безразмерной температуры воспользуемся соотношениями, представленными в работе [3]:

$$\frac{\partial \theta(\xi, \rho)}{\partial \xi} = K_q \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_0(v_n \rho) P_n(\xi), \quad (10)$$

где  $K_q = \frac{R_{\text{обр}}}{R_1}$ ;  $B_n = \frac{2Bi}{J_0(v_n \rho)(Bi^2 + v_n^2)}$ ;  $P_n(\xi) = (E_n(\xi) - F_n(\xi))/Z_n(h_{\text{обр}})$ ;

$$E_n(\xi) = \theta_1 [ch(v_n h_{\text{обр}} \xi) + D_{n,2} sh(v_n h_{\text{обр}} \xi)];$$

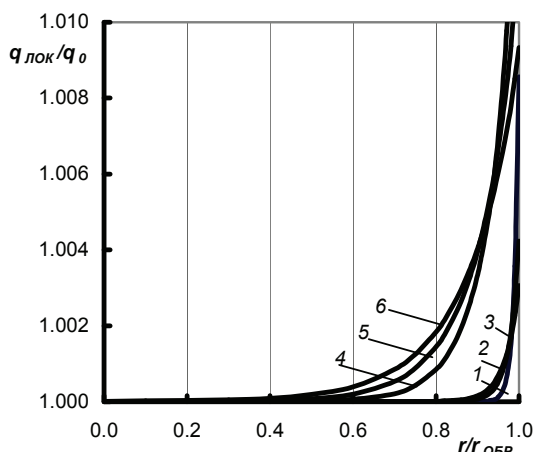
$$F_n(\xi) = \theta_2 [ch(v_n h_{\text{обр}} (1 - \xi)) + D_{n,1} sh(v_n h_{\text{обр}} (1 - \xi))];$$

$$Z_n(h_{\text{обр}}) = (D_{n,2} + D_{n,1}^{-1}) sh(v_n h_{\text{обр}}) + (1 + D_{n,2} \cdot D_{n,1}^{-1}) ch(v_n h_{\text{обр}});$$

$$D_{n,1} = \frac{v_n R_1}{R_{\text{бок}} Bi}; \quad D_{n,2} = \frac{v_n R_2}{R_{\text{бок}} Bi}; \quad Bi = \frac{r_{\text{обр}}}{R_{\text{бок}} \lambda_{\text{обр}}};$$

$v_n$  - собственные числа, которые являются корнями характеристического уравнения  $v J_1(v) - Bi \cdot J_0(v) = 0$ , где  $J_0(v)$ ,  $J_1(v)$  - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно.

На рис. 4 приведены расчеты искажений плотности теплового потока при различных термических сопротивлениях ПТП и отношениях диаметра образца к его толщине. В качестве расчетного образца взято стекло с верхним покрытием, имеющим степень черноты  $\varepsilon_{\text{верх}} = 0,01$ , и боковым покрытием со степенью



При  $h_{\text{ПТП}}=0,01$ ; 1 -  $R_{\text{ПТП}}=0,001$ ; 2 - 0,05; 3 - 0,01.

При  $h_{\text{ПТП}}=0,1$ ; 4 -  $R_{\text{ПТП}}=0,001$ ; 5 - 0,05; 6 - 0,01

**Рис. 4** Искажение приведенной плотности теплового потока в зависимости от относительных размеров образца и термического сопротивления ПТП

черноты  $\varepsilon_{\text{бок}} = 1$ . Граничные условия следующие:  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $T_{\text{среды}} = T_1$ ,  $T_2 = 273 \text{ K}$ . Расчеты проводились для образцов стекла диаметром 0,1 м со значениями толщины 0,01; 0,005; 0,002 и 0,001 м. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что основной «вклад» в искажение плотности теплового потока вносят геометрические размеры образца вкупе с термическим сопротивлением ПТП. При выборе охранной зоны ПТП для образца максимальной толщины 0,01 м придется, к примеру, увеличить вдвое диаметр образца и пользоваться ПТП с термическим сопротивлением, значение которого не выше  $0,001 \text{ K}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ .

Таким образом, руководствуясь результатами, представленными на рис. 2-4, можно спроектировать установку так, чтобы в зоне чувствительности преобразователя теплового потока была гарантирована одномерность измеряемой плотности теплового потока.

Полученные результаты использованы при проектировании установки модели ИТРС-1 [5, 6], государственная метрологическая аттестация которой подтвердила высокую точность измеряемых величин.

#### *Список литературы*

1. ГОСТ 30619-98 (ДСТУ 3756-98) Энергосбережение. Преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия. - Киев: Держстандарт Украины. - 1999. - 31 с.
2. Теория теплообмена: Учебник для вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; под ред. А.И. Леонтьева. - М.: Высш. школа, 1979. - 495 с.
3. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ./ Справочник. - М.: Атомиздат, 1979. - 216 с.
4. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Менделеева Т.В. Об оценке корректности показаний преобразователя теплового потока при исследовании теплоизоляционных свойств материалов // Пром. теплотехника. - 1996. - Т.18, № 5. - С. 55-58.
5. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Воробьев Л.И., Гайдучек А.В., Самокиш А.И. Установка для измерения терморadiационных характеристик энергоэффективных стекол // Наук. праці конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія - 99)» - Харків, 1999. - С.108-110.
6. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Воробьев Л.И., Гайдучек А.В., Самокиш А.И. Измерение терморadiационных характеристик энергоэффективных стекол // Тезисы докл. Междунар. научно-практической конф. «Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии» - К.: ИТТФ НАНУ. - 1999. - С.75-76.

---

### **Peculiarities of Sets for Determining Thermal Radioactive Characteristics by Means of Heat Flow Meter Method**

**L.V. Dekusha, T.V. Mendeleeva, A.V. Gaiduchek**

*Institute of Technical Thermal Physics, NAS Ukraine*

**Key words and phrases:** heat flow converter; blackness degree; heat flow; thermal radioactive characteristics; angle coefficient of radiation; energy efficient coating.

**Abstract:** The choice of optimum relation between geometrical parameters of examined sample, space and source of thermal radiation in a set for measurement of integral semi-spherical thermal radioactive characteristics is theoretically grounded and verified by numerical experiment.

**Besonderheiten der Anlagen für die Bestimmung der thermoradiationen  
Charakteristiken durch die wärmetrische Methode**

**Zusammenfassung:** Es ist die Auswahl der Optimalübereinstimmung der geometrischen Parameter der untersuchenden Probe, des Hohlraums und der Quelle der Wärmestrahlung in der Anlage für die Messung von integralen hemisphärischen thermoradiationen Charakteristiken theoretisch begründet und durch das Rechnungsexperiment bestätigt.

---

**Particularités des installations pour la définition des caractéristiques thermiques  
de rayonnement par la méthode thermométrique**

**Résumé:** On a fondé théoriquement et l'on a confirmé par une expérience calculée le choix de la relation optimale des paramètres géométriques de l'échantillon étudié, de la surface et de la source du rayonnement thermique dans l'installation pour la mesure des caractéristiques intégrales hémisphériques thermiques de rayonnement.

---