

Б.И. Китов, Ф.Р. Сармиева

Иркутский Государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, ул. Чернышевского 15.

ДИАГРАММА ИЗЛУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ С КОЛЬЦЕВЫМ АНОДОМ

Аннотация. В транспортное уравнение для флуоресценции определяемого элемента, внесено изменение, учитывающее пространственную расходимость излучения рентгеновской трубки. Изменение заключается во введении интегрирования по поверхности анода трубки и поверхности облучаемого образца. Для рентгеновской трубки с коническим анодом вычислено распределение плотности потока вторичного излучения цинка в стали марки 45 по поверхности образца при облучении его излучением рентгеновской трубки БХВ-9. Показано, что распределение плотности потока трубки излучения зависит не только от угла испускания, но и от расстояния от анода до образца. Так для излучения конического анода двухлистное распределение на малых расстояниях переходит в однолистное при больших расстояниях. Это дает основание считать, что при удалении образца от анода на расстояние вдвое большее диаметра анода приводит к равномерному облучению образца.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, расходимость, флуоресценция, математическая модель, распределение.

B. I. Kitov, F. R. Sarmieva

Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, Russian Federation

DIAGRAM OF THE IRRADIATION OF AN X-RAY TUBE WITH AN ORIFICED ANODE

Abstract. The transport equation for the fluorescence of the detected element has been modified to take into account the spatial divergence of X-ray tube's radiation. The modification consists in the introduction of integration on the surface of the tube's anode and the surface of the irradiated sample. The distribution of the density of secondary radiation's flux for zinc in brand 45 steel on the surface of the sample is calculated for an X-ray tube БХВ-9 with a conic anode. It is shown that the distribution of the density of the tube's radiation flux depends not only on the emission angle, but also on the distance between the anode and the sample. Thus, for the study of a conic anode, two-sheeted distribution transitions into one-sheeted at great distances. This gives some grounds for believing that the removal of the sample from the anode to the distance that is twice the diameter of the anode results in a homogeneous irradiation of the sample.

Keywords: X-ray radiation; divergence; fluorescence; mathematical model; distribution.

Введение

На железнодорожном транспорте есть удобные объекты для определения химического состава с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) – это металлические изделия, строительные материалы, масла и смазки, объекты экологического контроля. Применяются как стационарные приборы для прецизионных измерений, так и портативные безопасные приборы, позволяющие контролировать химический состав груза непосредственно в вагоне.

При расчете состава анализируемых образцов в РФА самым наукоемким является метод фундаментальных параметров РФА [1-3]. Математическая модель процесса взаимодействия рентгеновского излучения с веществом [4], положенная в основу этого метода, теоре-

тически обоснована, но, к сожалению, вынуждена использовать не вполне надежные данные об инструментальных параметрах.

К таким параметрам относится угол падения первичного рентгеновского излучения на пробу, так как у любой рентгеновской трубки поток излучения является расходящимся. Но есть и исключение: поликапиллярная линза Кумахова позволяет «сжать» или же «расширить», вплоть до параллельного, поток рентгеновских лучей. Пример использования линзы в методе фундаментальных параметров приведен в статье [5].

Попытка обойти проблему и сохранить модель путем введения неких «эффективных» углов падения расходящегося первичного излучения на образец была предпринята в работе [6]. Но, там же было показано, что при близком расположении рентгеновской трубки к образцу «эффективные» углы оказались зависимыми от химического состава анализируемого материала.

Оставался второй путь: детализировать рентгенооптическую схему спектрометра, однако он не был реализован из-за математических трудностей, так как к интегрированию по спектру прибавлялось интегрирование по поверхности образца и интегрирование по поверхности анода. Но это придется сделать, так как в РФА остается не решенной задача неравномерного облучения поверхности пробы расходящимся потоком, что увеличивает погрешность анализа при неоднородности анализируемого материала.

При уточнении теоретической модели в нее должны включаться только доступные измерения геометрические параметры, которые показаны на рис. 1, а именно диаметр пробы D , радиус кольцевого анода a , расстояние от анода до пробы l и угол наклона поверхности анода относительно оси трубки β .

Для РФА знание распределения плотности первичного излучения по поверхности пробы не столь важно, как плотность распределения флуоресцентного излучения, которая формирует аналитический сигнал.

В качестве исходной модели примем транспортное уравнение, связывающее плотности потоков первичного $N(\lambda)$ и вторичного N_i рентгеновского излучения i -того элемента при отсутствии избирательного возбуждения [7].

$$N_i = k \int \frac{N(\lambda) \cdot C_i \cdot \mu(\lambda)}{\frac{\mu(\lambda)}{\sin \varphi} + \frac{\mu(\lambda_i)}{\sin \psi}} d\lambda \quad (1)$$

Здесь C_i - массовая доля i -того элемента; $\mu(\lambda)$ и $\mu(\lambda_i)$ - массовые коэффициенты ослабления соответственно первичного и вторичного излучения на пробу; φ и ψ - углы падения первичного и отбора вторичного излучения; k - инструментальная постоянная.

Плотность потока первичного излучения $N(\lambda)$ складывается из характеристических и тормозной компонент:

$$N(\lambda) = N_m(\lambda) + \sum_f N_x^f \delta(\lambda - \lambda_f), \quad (2)$$

где: $\delta(\lambda - \lambda_f)$ - дельта-функция, которая равна 0 при $\lambda \neq \lambda_f$ и 1 при $\lambda = \lambda_f$.

Суммирование в (4) проводится по всем характеристическим линиям анода возбуждающих аналитическую линию определяемого элемента.

Интенсивность характеристической линии получена из закона торможения электронов Бете и зависимости сечения ионизации атома от энергии электрона [2]:

$$N_x^f = \frac{\omega_q n_q b_q}{2 \cdot Z \cdot 4\pi} P_f (u \ln u - u + 1) \cdot f(\chi) \cdot R \frac{\exp\left[-\frac{\mu_{Be}(\lambda) \rho_{Be} d_{Be}}{\sin \varphi}\right]}{\ln\left(\frac{1166}{J E}\right)} \quad (3)$$

(фотон/электрон/стер/нм).

При расчете спектральной плотности тормозного излучения используется формула Крамерса [8], дополненная учетом поглощения излучения в аноде с помощью поправки Филибера $f(\chi)$, и учетом обратного рассеяние электронов от анода коэффициентом R [9-10]:

$$N_m(\lambda) = 7,52 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{\sqrt{3}} Z \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda} \frac{f(\chi)}{L} R \frac{1}{4\pi} \cdot \exp\left[-\frac{\mu_{Be}(\lambda) \rho_{Be} d_{Be}}{\sin \varphi}\right] \quad (4)$$

(фотон/электрон/ср.).

Здесь $L = \ln\left(\frac{1166}{J} \cdot \frac{E_0}{2}\right)$ и, так называемое перенапряжение $u = \frac{E_0}{E_q}$, при этом

$J = 11.5 \cdot Z$; E_0 - начальная энергия электронов (кэВ); E_q - энергия ионизации атомов анода. Кроме того, обозначено: R - фактор обратного рассеяния электронов, λ - длина волны излучения, λ_0 - длина волны коротковолновой границы тормозного спектра, Z - атомный номер анода ω_q - квантовый выход флуоресценции возбужденной оболочки q -той оболочки анода, n_q - число электронов на q -той оболочки, b_q - константа, определяемая энергетическим состоянием возбужденного атома, $\mu_{Be}(\lambda)$ - массовый коэффициент ослабления бериллиевым окном трубки излучения анода, ρ_{Be} - и d_{Be} - удельная плотность бериллия и толщина окна трубки.

Поправка Филибера [11] $f(\chi)$ учитывает поглощение излучения в теле анода и зависит от угла выхода излучения β (см. рис.1) :

$$f(\chi) = \frac{1+h}{\left(1+\frac{\chi}{\sigma_e}\right)\left(1+h\left(1+\frac{\chi}{\sigma_e}\right)\right)} \quad \text{где: } h = 1.2 \frac{A}{Z^2} ; \quad \chi = \frac{\mu_{an}(\lambda)}{\sin \beta} .$$

Здесь A - атомный номер материала анода; $\mu_{an}(\lambda)$ - массовый коэффициент ослабления анодом излучения с длиной волны λ .

В записях формул (3) и (4) нами применена поправка на поглощения излучения окном трубки в виде: $\exp\left[-\frac{\mu_{Be}(\lambda) \rho_{Be} d_{Be}}{\sin \varphi}\right]$. В прежних работах [2,10] принималось, что излучение анода падает на окно трубки под углом $\varphi = \pi / 2$.

Формулы (2) и (3) показывают количество фотонов, возникших от торможения одного электрона и распространяющихся в телесном угле в 1 стерадиан. Поэтому для учета уменьшения плотности потока с расстоянием плотность потока первичного излучения (2) следует разделить на $2\pi r^2$:

$$N_i = k \frac{I}{2\pi r^2} \int_{\lambda_0}^{\lambda_{grenz}} \left[N_m(\lambda) + \sum_f N_x^f \delta(\lambda - \lambda_f) \right] \frac{C_i \cdot \mu(\lambda)}{\frac{\mu(\lambda)}{\sin \varphi} + \frac{\mu(\lambda_i)}{\sin \psi}} d\lambda . \quad (5)$$

Распределение по поверхности образца плотности потока флуоресценции возбужденной излучением кольцевого анодов.

Отечественные рентгеновские трубки для РФА выпускаются 3-х типов. К трубкам с точечным источником относятся прострельные трубки малой мощности серии БС. Выпускаются трубки с протяженным анодом типа БХВ-6 и трубки с кольцевым анодом. Кольцевой анод может быть цилиндрическим, как в трубках БХВ-7, БХВ-8, БХВ-12 и, очень рационально сконструированным, коническим анодом, как в трубках БХВ-9 и БХВ-12.

На рис.1 приведена рентгенооптическая схема возбуждения флуоресценции рентгеновским излучением конического анодом. Наклон конуса равен τ , угол между поверхностью конуса и направлением на рентгеновского луча равен β .

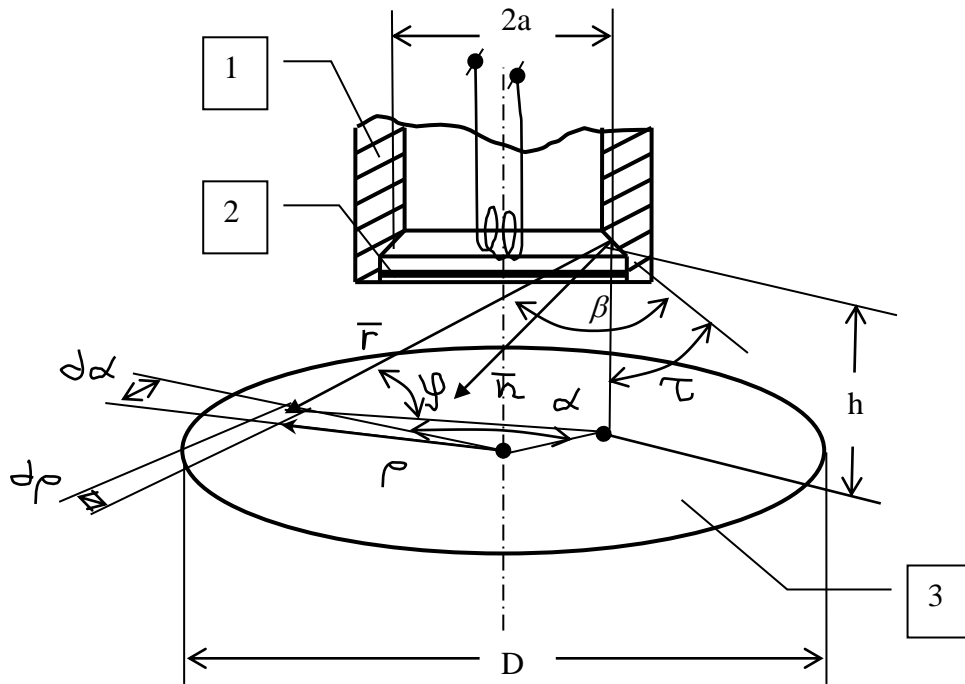


Рис.1. Рентгенооптическая схема спектрометра с трубкой имеющий конический анод. 1 - анод, 2 - окно, 3 - образец

Конический конус представим кольцом и разделим его на равные малые элементы. Будем считать, что каждый элемент излучает одинаково. Но излучение каждого элемента не изотропно, так как при выходе из анода его поглощение зависит от текущего значения угла β .

Положение элемента поверхности пробы зададим в полярных координатах ρ и α , начало которых находится в центре круглой пробы. Площадь элемента пробы $ds = \rho \cdot d\rho \cdot ds$.

Точечный источник анода вносит некий вклад в плотность потока вторичного излучения исходящего под углом ψ от элемента ds пробы. Проведя интегрирование по длине кольца, получим плотность потока вторичного излучения в точке с координатами ρ и α :

$$N_i(\rho, \alpha) = k \int_{\lambda} \int_l \frac{N(\lambda) \cdot C_A \cdot \mu_1(\lambda)}{2\pi r^2 \frac{\mu_1(\lambda)}{\sin \varphi} + \frac{\mu_i(\lambda)}{\sin \psi}} \cdot d\lambda \cdot dl$$

Опуская несложные математические преобразования по схеме рис.1 получим недостающие геометрические параметры в (3) и (4):

$$\sin \varphi = \frac{h}{|\vec{r}|} = \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2 + \rho^2 - 2a \cdot \rho \cdot \cos \theta}}$$

$$\sin \beta = \frac{(a - \rho \cos \alpha) \cos \tau + h \cdot \sin \tau}{\sqrt{(a - \rho \cos \alpha)^2 + \rho^2 \sin^2 \alpha + h^2}}$$

Расчет распределения плотности излучения в зависимости от расстояния от центра пробы был выполнен на примере флуоресценции $K\alpha_{1,2}$ - линии марганца (содержание 0.8 % масс.) в стали 45. Инструментальные условия: рентгеновская трубка с коническим анодом БХВ-9; диаметр излучающего кольца 2.6 см; анод – палладий, напряжение 25 кВ; толщина бериллиевого окна 0.03 см; диаметр образца 4 см.

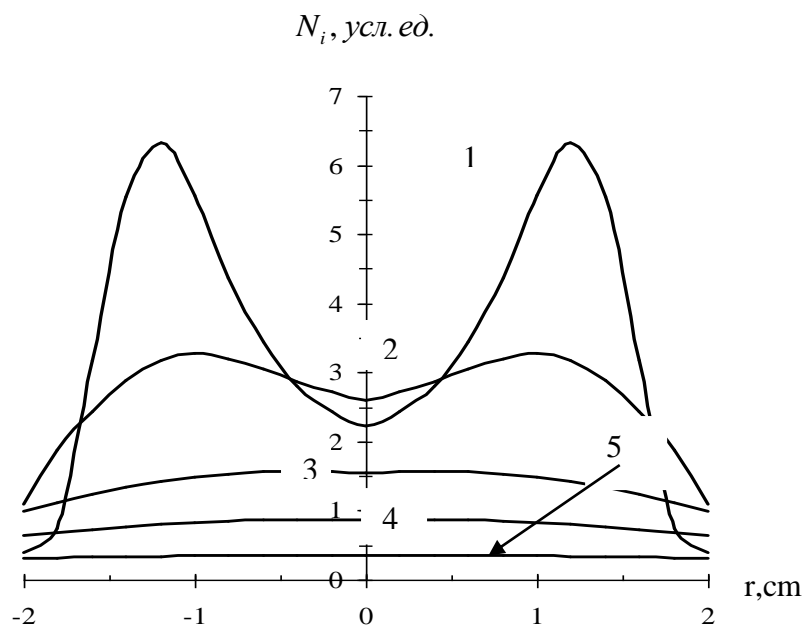


Рис. 2. Распределение плотности потока флуоресценции маганца по диагональному сечению образца стали 45.

Результаты расчета приведены в виде графиков на рис.2. При расчете варьировалось расстояние от анода до образца. График 1 получен для $h=0.5$ см, график 2 – для $h = 1$ см, график 3 для $h=2$ см, график 4 - для $h=3$ см и график 5 – для $h=5$ см.

Расчет показал, что диаграмма направленности излучения рентгеновской трубки зависит не только от угловой координаты, но и от расстояния. При малых расстояниях от кольцевого источника (график 1) в поперечном сечении наблюдаются 2 максимума: наибольшая «засветка» пробы будет в месте проекции на нее излучающего кольца.

При удалении от источника максимумы понижаются и при расстояниях примерно равном диаметру анода (график 3) максимумы сливаются, а при расстояниях вдвое больших диаметра анода, распределение становится одинаковым во всех точках.

Заключение.

В результате проведенных исследований выяснилось, что отмеченный во введении недостаток с неоднородным облучением пробы легко устраняется удалением пробы от кольцевого источника. Это не актуально для многоканальных спектрометров, где указанное расстояние велико из конструктивных соображений, но для приборов, у которых полупроводниковый детектор по окружности окружен радиоактивными источниками и максимально приближен к пробе данное исследование полезно. Здесь проявятся 2 противоположные тенденции: с уменьшением высоты источника над пробой снимается влияние расходимости, но и уменьшается плотность потока вторичного излучения.

Подобные расчеты были выполнены не только для цинка, но и нескольких других элементов, а также отдельно для плотности потока первичного излучения. Полученные зависимости подобны графикам, показанным на рис.2, без каких-либо особенностей, и нет смысла их здесь воспроизводить.

Для выполнения расчетов была написана на языке Си вычислительная программа, являющаяся, помимо этого основным блоком метода фундаментальных параметров. Введенный в модель учет расходимости первичного увеличил время выполнения расчетов на персональном компьютере на 2 порядка, но оно остается приемлемым, порядка 10-20 секунд на одну пятикомпонентную пробу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Criss J.W., Birks L.S. Calculation methods for fluorescent X-Ray spectrometry. Empirical coefficients v.s. fundamental Parameters // Analytical Chemistry. -1968.-V.40, №7. - P.1080-1086.
2. V.P. Afonin, A.L.Finkelshtein, V.J. Borkhodoev and T.N.Gunicheva X-Ray Fluorescence Analysis of Rocks by the Fundamental Parameter Method// X-Ray Spectrometry. -1992. -V. 21. -P.69-75
3. B.I.Kitov Calculation Features of the Fundamental Parameter Method in XRF// X-Ray Spectrometry. -2000.-V.29. - P.285-290.
4. Sherman J. The theoretical derivation X-ray intensities from mixtures // Spectrochimica Acta. -1955.-V.7. -P.283-306.
5. Afanasiev, I.B. Usage of fundamental parameters method for quantitative analysis of spectra acquired on spectrometer with Kumakhov lens / I.B. Afanasiev, V.V. Danichev, V.F.Ivanov, R.I.Kondratenko, V.A. Mikhin // Proceedings of SPIE. X-Ray and apilary Optics II/ 2000. V. 4144. P.174
6. Pavlinsky G.V., Kitov B.I. Influence of divergence of the Primary radiation beam on the line intensity of the X-Ray fluorescence spectrum // X-Ray Spectrometry. -1979. -V.8, №3. - P.96-101.
7. Losev N.F. Quantitative X-ray fluorescence analisis. Nauka, Moscow, 1969, p. 336.
8. Kramers H. A. On the theory of X-ray absorbtion and of the continues X-ray spectrum // Phyl. Mag. -1923. -V. 46, № 275. P. 836—871.
9. S.J.B. Reed Electron Microprobe Analysis //Cambridge University Press, Cambridge London, 1975, -424 p.
10. V.P. Afonin X-ray fluorescence analysis of rocks// Z. Ana. Chemistry, 1989.- 335. – P.55-57.
11. Philibert J. A method for calculating the absorption correctioin functions for electron probe microanalysis // X-Ray Optic and X-Ray Microanalysis. N.Y. -1963. P.379—392.

Информация об авторах

Китов Борис Иванович – д.т.н., профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e.mail: kitovboris2@gmail.com

Сармиева Фарзана Рахмановна – студент кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский Государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: honika52@gmail.com

Authors

Boris Ivanovich Kitov - doctor of technical Sciences, Professor of the Department of «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk state University of railway transport, Irkutsk, e.mail: kitovboris2@gmail.com

Sarmieva Farzana Rakhmanovna - student of the Department of «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk State University of railway transport, Irkutsk, e-mail: honika52@gmail.com

Для цитирования

Б.И. Китов, Ф.Р. Сармиева. Диаграмма излучения рентгеновской трубки с кольцевым анодом //

For citation

B. I. Kitov, F. R. Sarmieva. Radiation diagram of an x-ray tube with an annular anode //