



УДК.621.397.13

**Н.В. Шинкаренко**, аспирант  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический ин-т»  
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, корпус 12, 2203,  
тел. (044) 4068292, e-mail: shinkarenko@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

### **Моделирование диаграмм направленности трансмиссионных импульсных рентгеновских трубок**

Рассчитаны с использованием программы MathCAD диаграммы направленности тормозного рентгеновского излучения для импульсных рентгеновских трубок с прострельным анодом и взрывной эмиссией. Определены технические параметры дефектоскопических систем, использующих панорамный способ контроля, с учетом изменения анодного напряжения и тока во время импульсного излучения, коэффициентов поглощения материалов анода и выходного окна, а также зависимости константы Томсона—Виддингтона от анодного напряжения.

Розраховано з використанням програми MathCAD діаграми направленості гальмівного рентгенівського випромінювання для імпульсних рентгенівських трубок з прострільним анодом і вибуховою емісією. Визначено технічні параметри дефектоскопічних систем, що використовують панорамний спосіб контролю з врахуванням змінювання анодної напруги та струму під час імпульсного випромінювання, коефіцієнтів поглинання матеріалів анода і вихідного вікна, а також залежності константи Томсона—Віддінгтона від анодної напруги.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* моделирование, импульсные рентгеновские трубки, панорамный дефектоскопический контроль.

Использование панорамного метода позволяет существенно повысить оперативность неразрушающего контроля (особенно при просвечивании сварных швов магистральных трубопроводов), увеличить длительность работы импульсных рентгеновских аппаратов и уменьшить стоимость контроля [1]. Известные результаты экспериментальных измерений диаграмм направленности [1, 2] относятся к конкретным импульсным рентгеновским аппаратам и не дают возможности проанализировать влияние режимов импульсных рентгеновских трубок, материалов анода и выходного окна, геометрии анодно-катодного узла на энергетические характеристики излучения. Целесообразным является моделирование с помощью ПЭВМ диаграмм направленности

© Н.В. Шинкаренко, 2015

излучения с учетом электрических, физических и геометрических параметров импульсных рентгеновских трубок.

Приведем результаты расчетов для трансмиссионных трубок (с прострельным анодом) осесимметричной конструкции и плоским анодом в виде тонкой фольги, прикрепленной непосредственно к выходному окну [3]. Мгновенная плотность потока квантов тормозного рентгеновского излучения (количество фотонов в единицу времени на единицу площади в единичном диапазоне энергий)  $n(E, t, \gamma)$  на расстоянии  $R$  (см) от фокуса определяется по формуле [4]

$$n(E, t, \gamma) = \frac{k_1 i(t) Z [E_a(t) - E]}{R^2 E} \times \exp \left\{ -\frac{\mu_M(E)}{\cos \gamma} \left[ D - \frac{E_a^2(t) - E^2}{\rho_M c} \right] - \frac{\mu_O(E) H_O}{\cos \gamma} \right\} [1/(\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{кэВ})], \quad (1)$$

где  $k_1 = 1,1 \cdot 10^{12}$  [1/(А · с · кэВ)];  $E$  — энергия рентгеновских квантов, кэВ;  $E_a(t)$  — энергия электронов на аноде, кэВ;  $i(t)$  — анодный ток, А;  $Z$  — атомный номер материала анода;  $\mu_M(E)$  и  $\mu_O(E)$  — коэффициенты поглощения материала анода и материала выходного окна,  $\text{см}^{-1}$ ;  $H_O$  — толщина материала выходного окна, см;  $\rho_M$  — плотность материала анода,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $C$  — константа Томсона—Виддингтона,  $\text{кэВ}^2 \cdot \text{см}^2/\text{г}$ ;  $D$  — толщина анода, см;  $\gamma$  — угол между направлением излучения и осью осесимметричной конструкции рентгеновской трубки.

Расчет по формуле (1) выполним также, как это сделано в работе [4], с использованием интерполяций кубическими сплайнами табличных данных  $\mu_M(E)$  и  $\mu_O(E)$ , интерполяций квадратичными сплайнами характеристик  $i(t)$  и  $E_a(t)$  за время импульса рентгеновского излучения и экспоненциальной аппроксимацией константы  $C$  от анодного напряжения. Если от плотности потока квантов перейти к плотности энергии, умножив  $n(E, t, \gamma)$  на энергию квантов  $E$ , и проинтегрировать по времени, в границах от нуля до длительности импульса  $\tau$ , то получим

$$\varepsilon(\gamma) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E dE \int_0^{\tau} n(E, t, \gamma) dt [\text{кэВ}/\text{см}^2], \quad (2)$$

где  $E_{\max}$  —  $E_{\min}$  — энергетический спектр. Полученная формула определяет осесимметричное распределение плотности энергии рентгеновских квантов за время импульса и соответствует диаграмме направленности излучения импульсной рентгеновской трубки.

Из формул (1) и (2) для разных направлений излучения следует максимальное значение плотности энергии  $\varepsilon_{\max}$  при  $\gamma = 0$  и ее нулевое значение

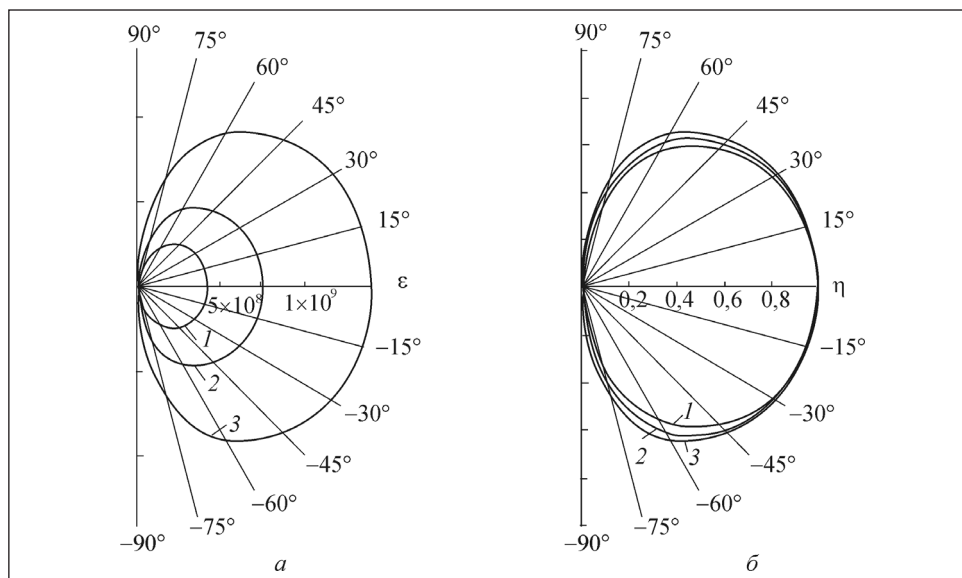


Рис. 1. Диаграммы направленности при различных импульсных напряжениях  $U_{a \max}$ : *a* — 1 —  $U_{a \max} = 100$  кВ; 2 —  $U_{a \max} = 120$  кВ; 3 —  $U_{a \max} = 140$  кВ; *б* — нормированные диаграммы направленности для материала анода — вольфрама (W) толщиной  $D = 0,002$  см

при  $\gamma = \pm 90^\circ$ , когда происходит полное поглощение тормозного излучения в материале анода. Излучение при  $90^\circ < |\gamma| \leq 180^\circ$  не рассматривается, поскольку оно поглощается элементами конструкции рентгеновской трубки и аппарата, а также специальными экранами. Сравнить диаграммы направленности для различных режимов трубок, материалов и геометрических размеров анода и выходного окна целесообразно по нормированным диаграммам направленности  $\eta(\gamma) = \varepsilon(\gamma) / \varepsilon_{\max}$ , которые не зависят от расстояния  $R$ .

Примеры диаграмм направленности в плоскостях, проходящих через ось симметрии анодно-катодного узла рентгеновской трубки, представлены на рис. 1 и 2. Диаграммы рассчитаны при длительности импульса  $\tau = 25$  нс, разрядной емкости 40 пФ, от которой зависит максимальное значение анодного тока, и выходном окне из бериллия толщиной  $H_0 = 0,1$  см. Максимальные значения  $\varepsilon_{\max}$ , рассчитанные при  $R = 30$  см, приведены в таблице. При других величинах  $R$  используются значения  $\varepsilon_{\max}$ , пересчитанные из табличных в обратно пропорциональной зависимости относительно квадратов соответствующих значений  $R$ .

Отличие рассчитанных диаграмм направленности от экспериментальных [1] можно объяснить наличием составляющих рассеянного и характеристического рентгеновского излучения, которые не учитывались при

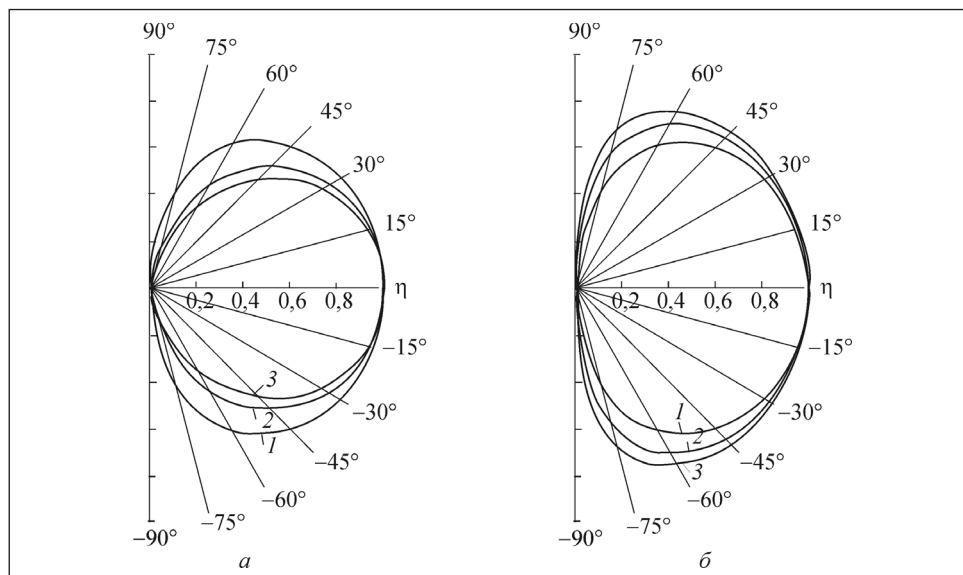


Рис. 2. Нормированные диаграммы направленности при  $U_{a \max} = 120$  кВ для различной толщины анода (а) и различных материалов анода (б): а — 1 —  $D = 0,002$  см; 2 —  $D = 0,006$  см; 3 —  $D = 0,01$  см, материал анода — вольфрам (W); б — 1 — вольфрам (W); 2 — молибден (Mo); 3 — медь (Cu)

расчетах. Увеличение абсолютных значений плотностей энергий при увеличении максимальных анодных напряжений  $U_{a \max}$  (см. рис. 1, а) в импульсных трубках обусловлено смещением спектров излучения в диапазон больших энергий и увеличением плотности потока рентгеновских квантов [4]. Увеличение анодного напряжения (см. рис. 1, б), уменьшение толщины анода (см. рис. 2, а) и выбор анода из материала с меньшим атомным номером (см. рис. 2, б) приводит к улучшению равномерности сигнала в панорамном методе дефектоскопического контроля.

Сравнение результатов расчетов диаграмм с экспериментальными данными [1, 2, 5] позволяет предположить, что их отличие обусловлено

$U_{a \max}$ , кВ	Материал анода	$D$ , см	$\epsilon_{\max}$ , кэВ/см <sup>2</sup>	$U_{a \max}$ , кВ	Материал анода	$D$ , см	$\epsilon_{\max}$ , кэВ/см <sup>2</sup>
100	W	0,002	$3,6 \times 10^8$	120	W	0,006	$3,41 \times 10^8$
120	W	0,002	$7,38 \times 10^8$	120	W	0,01	$2,02 \times 10^8$
140	W	0,002	$1,39 \times 10^9$	120	Mo	0,002	$6,34 \times 10^8$
160	W	0,002	$2,29 \times 10^9$	120	Cu	0,002	$4,86 \times 10^8$
200	W	0,002	$5,32 \times 10^9$				

следующим: в теоретическом азимутальном распределении интенсивности тормозного излучения не учитываются характеристическое, рассеянное и отраженное излучения. Полученные в результате моделирования диаграммы направленности при  $U_{a \max} = 140$  кВ, материале анода — вольфраме (W) толщиной 0,002 см, окне из бериллия (Be) толщиной 0,1 см и одинаковых интенсивностях направленного излучения отличаются от полученных экспериментально [1, 2, 5] не более чем на 1,2 % для углов  $\pm 15^\circ$ ; 3,7 % — для углов  $\pm 45^\circ$  и 11,8 % — для углов  $\pm 60^\circ$ .

### Выводы

Расчитанные диаграммы направленности дают возможность выбирать диапазон пространственного угла излучения, который обеспечивает необходимую однородность и величину рентгеновского потока, а также равномерность выходного сигнала при использовании панорамного метода неразрушающего контроля. Увеличение амплитуды импульсного напряжения, а также уменьшение толщины анода и выбор материала анода с меньшим атомным номером улучшает равномерность потока рентгеновского излучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.spectroflash.ru/info/articles/288/295>
2. Вавилов С.П., Горбунов В.И. Импульсное рентгеновское излучение в дефектоскопии. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 80 с.
3. Иванов С.А., Шукин Г.А. Рентгеновские трубки технического назначения. — Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. — 200 с.
4. Денбовецкий С.В., Лецишин О.В., Михайлов С.Р. и др. Моделирование спектров излучения импульсных рентгеновских трубок // Электроника и связь. — 2013. — № 6. — С. 16—23.
5. Денискин Ю.Д., Чижунова Ю.А. Рентгеновские диагностические трубки и их тепловые режимы. — М. : Энергия, 1970. — С. 10—12.

*N.V. Shinkarenko*

### SIMULATION OF DIRECTION PATTERNS OF TRANSMISSION IMPULSE X-RAY TUBES

Radiation patterns of inhibitory X-radiation for the X-ray tubes with penetrating anode and explosive emission were calculated using MathCAD program. Technical parameters of non-destructive inspection systems with panoramic control method were determined. The changes of anode voltage and current during the pulsed radiation, characteristics of absorption coefficients of anode materials, output window as well as the dependence of the Thomson-Widdington constants on anode voltage are taken into account.

*Key words: simulation, impulse X-ray tubes, panoramic flaw detection control.*

REFERENCES

1. Peliks, E.A. "Choosing the Translucence Scheme", available at: [www.spectroflash.ru/info/articles/288/295](http://www.spectroflash.ru/info/articles/288/295)
2. Vavilov, S.P. and Gorbunov, V.I. (1985), *Impulsnoye rentgenovskoye izlucheniye v defektoskopii* [Impulse X-Radiation in Flaw Detection], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
3. Ivanov, S.A. and Shchukin, G.A. (1989), *Rentgenovskiyе trubki tekhnicheskogo naznacheniya* [X-ray tubes for technical purposes], Energoatomizdat, Leningrad Dpt, Leningrad, Russia.
4. Denbnovetskiy, S.V., Leshchishin, O.V., Mikhaylov, S.R., Kapustyanov, O.L. and Shinkarenko, N.V. (2013), "Modeling of Radiation Bursts of X-Ray Tubes", *Elektronika i kommunikatsii*, no. 6, pp. 16-23.
5. Deniskin, Yu.D. and Chizhunova, Yu.A. (1970), *Rentgenovskiyе diagnosticheskiye trubki i ikh teplovyie rezhimy* [X-Ray Diagnosis Tubes and Their Thermal Conditions], Energiya, Moscow, Russia.

Поступила 22.04.14;  
после доработки 28.10.14

*ШИНКАРЕНКО Наталия Викторовна, аспирант кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т», который окончила в 2009 г. Область научных исследований — моделирование электронных систем, средства и техника неразрушающего контроля.*