

УДК 620

## К ВОПРОСУ МОДЕРНИЗАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ С СОХРАНЕНИЕМ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

**Б. В. АРТЕМЬЕВ, И. Б. АРТЕМЬЕВ**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»

ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «СПЕКТР»

Москва, Россия

UDC 620

## ON THE QUESTION OF MODERNIZATION OF RADIATION THICK-NOMENERS WITH PRESERVATION OF THEIR METROLOGICAL CHARACTERISTICS

**B. V. ARTEMIEV, I. B. ARTEMIEV**

### Аннотация

В настоящее время в машиностроительной отрасли России наблюдается тенденция отказа от источников изотопного излучения в пользу рентгеновских аппаратов. Это связано с несколькими проблемами, главными из которых являются: задача обеспечения радиационной безопасности и проведения технического обслуживания, перемещение источников гамма-излучения и вывод их из эксплуатации.

По сравнению с изотопными источниками рентгеновские, применительно к задачам толщинометрии, имеют ряд недостатков: спектральное распределение энергии излучения и, следовательно, изменение спектра по мере прохождения излучения через контролируемый материал; нестабильность излучения во времени по сравнению с гамма-источниками. Все это усложняет использование рентгеновских источников для измерения толщины материалов с различным химическим составом, например при прокатном производстве цветных металлов.

### Ключевые слова:

рентгеновский контроль, рентгеновская толщинометрия, радиометрия.

### Abstract

At present, there is a tendency in the machine building industry of Russia to refuse sources of isotope radiation in favor of X-ray machines. This is due to several problems, the most important of which are: the task of ensuring radiation safety and maintenance, the transfer of gamma radiation sources and their decommissioning.

In comparison with isotope sources, X-ray, with respect to the problems of thickness measurement, have a number of disadvantages. The spectral distribution of the energy of radiation and, consequently, the change in spectrum as the radiation passes through the material to be monitored. The instability of radiation in time in comparison with gamma sources. All this complicates the use of X-ray sources to measure the thickness of materials with different chemical composition, for example, in the rolling production of non-ferrous metals.

### Key words:

X-ray inspection, X-ray thickness measurement, radiometry.



На металлургических предприятиях России для решения задачи измерения толщины выпускаемого металлического проката широко используются бесконтактные рентгеновские и изотопные или радиационные толщинометры. Широкое применение этих приборов обосновано их высокими метрологическими характеристиками, быстродействием и отсутствием контакта измерительного преобразователя с поверхностью движущегося в процессе проката металла. Радиационная толщинометрия – радиометрический метод неразрушающего контроля, предназначенный для измерения толщины или поверхностной плотности материала и основанный на измерении параметров ионизирующего излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения с контролируемым материалом согласно ГОСТ 24034-80 «Контроль неразрушающий радиационный» [1]. Парк радиационных толщинометров требует постоянного технического обслуживания, ремонта и модернизации. В настоящее время к проблеме поддержания в рабочем состоянии эксплуатируемого на металлургических заводах оборудования добавилась новая задача, поставленная руководством нашей страны – импортозамещение.

Принципиальным отличием рентгеновских измерителей толщины от всех прочих методов измерения толщины и в т. ч. от контактных методов измерения, в том, что измеряются не реальные размеры, изменяющиеся при изменении температуры, а количество атомных слоев сквозь которые проходит пучок зондирующего излучения (обычно по нормали к плоскости контролируемого объекта) (рис. 1). Для одновременного решения этих задач на предприятии «ВИЗ-Сталь» г. Екатеринбург решено произвести работы по модернизации импортных толщинометров FMM-24004 производства фирмы «Messelektronik» ГДР (разработка 80-х гг.). В толщиномере используется абсолютный метод измерения (рис. 1). Измерительный зазор – 160 мм. Измеряемая толщина стали  $d$  от 0,1 до 2,0 мм. Случайная погрешность (СКО) измерения на неподвижном образце толщиной 0,3 мм составляет 0,1 % относительно измеряемой толщины проката. В оборудовании в качестве источника излучения применяется изотоп Америций<sup>241</sup>, со следующими основными параметрами:

- энергия гамма-квантов 60 кэВ;
- плотность потока фотонов на расстоянии 1 м от центра рабочей поверхности –  $(7,0 \pm 2,1) \cdot 10^4 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ ;
- максимальная активность  $\text{Am}^{241}$  в источнике – 2,24 Ки ( $8,3 \cdot 10^{10}$  Бк);
- период полураспада – 432,6 г.;
- энергия  $\gamma$ -квантов  $E = 59,5$  кэВ (35,8 %).

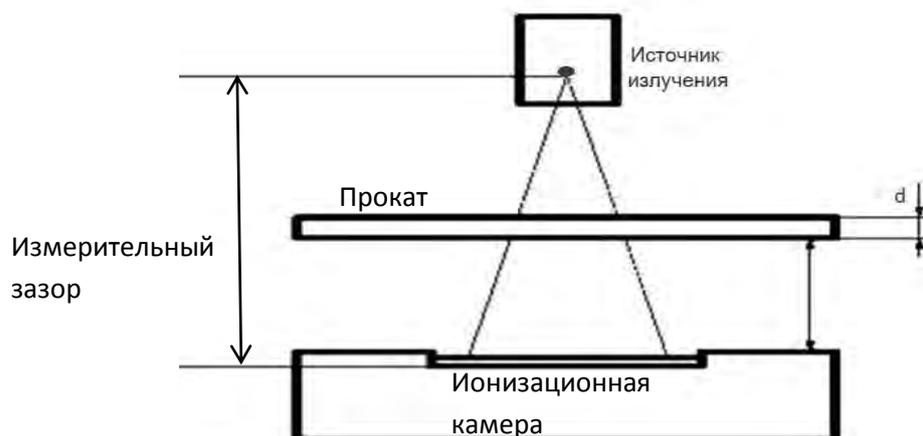


Рис. 1. Схема измерительного тракта толщиномера FMM-24004

Источники ИГИА-5 М-1 выпускаются Российской фирмой «Изотоп» и без проблем могут быть приобретены в необходимом количестве.

В качестве приемника излучения в толщиномере использовалась газонаполненная аргоно-ксеноновая ионизационная камера (ИК) (рис. 2).



Рис. 2. Газонаполненная аргоно-ксеноновая ионизационная камера

Основные параметры ИК:

- диаметр 165 мм;
- высота 80 мм (с электродами – 110 мм);
- материал корпуса алюминий толщиной 2 мм;
- входное окна алюминий толщиной 0,5 мм;
- напряжение питания 500 В.

В процессе эксплуатации толщиномеров камеры подвергались воздействию агрессивных сред и вибрации, ударному воздействию, со временем герметичность камер нарушилась, как следствие давление газовой смеси начало падать. Уменьшение давления ведет к уменьшению плотности газовой смеси и снижению эффективности работы камеры. Число взаимодействовавших квантов падает, а статистическая погрешность растет с одновременным снижением уровня выходного сигнала камеры. Повышение интенсивности источника не желательно, т. к. приведет к переоблучению персонала или потребует введения дополнительных защитных экранов в конструкцию приборов. Замена камеры на более эффективную,

это наиболее простой и безопасный и экономически выгодный способ решения проблемы. В качестве прототипа была использована гетерогенная камера, разработанная ранее в ЗАО МНПО «СПЕКТР» для рентгеновского толщиномера РИТ10.6 [2–4]. Конструкция ИК [5–6] потребовала существенной доработки, т.к. эффективная энергия потока излучения в случае использования изотопного америциевого источника взамен использовавшегося ранее рентгеновского повышается на 30 %. Мощность дозы Р будет равна:

$$P = N \cdot E \cdot \mu_b \cdot 1/a [(P \cdot m^2)/c] = 7 \cdot 10^4 \cdot 60 \cdot 0,028 \cdot 1/5,5 \cdot 10^{10} = 2,1 \cdot 10^{-6} [(P \cdot m^2)/c],$$

где N – число квантов попадающих на 1 см<sup>2</sup> в секунду на расстоянии 1 м от источника; E – энергия  $\gamma$  квантов в кэВ;  $\mu_b$  – массовый коэффициент преобразования энергии излучения в воздухе см<sup>2</sup>/г.

При расстоянии от источника до центра камеры ~230 мм мощность дозы в плоскости геометрического центра камеры Р<sub>к</sub> будет 40,4·10<sup>-6</sup> Р/с. Ток ионизационной камеры с объемом 1 см<sup>3</sup> при этом составит

$$I_k = 3,3 \cdot 10^{-10} \cdot 40,4 \cdot 10^{-6} = 1,33 \cdot 10^{-14} \text{ А}.$$

С учетом поглощения в материалах проката (0,05 ÷ 3 мм Fe)

$$I_{k \text{ min}} = I_{k \text{ exp}} (-\mu \cdot d) = 8 \cdot 10^{-16} \text{ А/см}^3,$$

где d – максимальная толщина ленты – 0,3 см;  $\mu$  – коэффициент линейного ослабления материала проката при энергии фотонов 60 кэВ составляет 9,42 см<sup>-1</sup> при его плотности 7,86 г/см<sup>3</sup>.

Учитывая, что современные операционные усилители плохо работают с такими малыми значениями токов, необходимо либо повысить активность источника, что недопустимо с точки зрения радиационной безопасности, либо существенно, не менее чем на 2·10<sup>4</sup> увеличить чувствительность ионизационной камеры.

Чувствительность ионизационной камеры можно увеличить двумя способами – увеличением площади входного окна и высоты камеры. Из конструкторских требований (ТЗ) объем может быть увеличен не более V см<sup>3</sup>:

$$V = \pi R^2 \cdot h = 3,14 \cdot (6,5)^2 \cdot 10 = 1,3 \cdot 10^3 \text{ см}^3.$$

Что позволит получить при минимальной и максимальной толщине проката ток:

$$I_{k \text{ min}} = 8 \cdot 10^{-16} \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 10^{-12} \text{ А}.$$

$$I_{k \text{ max}} = 1,33 \cdot 10^{-14} \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 1,7 \cdot 10^{-11} \text{ А}.$$

Диапазон токов ионизационной камеры от 10<sup>-12</sup> до 10<sup>-11</sup> А незначителен, однако для улучшения отношения сигнал/шум желательно повысить чувствительность, как минимум на порядок. Для этого используем в каче-



стве активного материала для покрытия электродов камеры высокоатомное напыление с толщиной равной или меньшей длине свободного пробега электронов в материале покрытия. При этом коэффициент увеличения чувствительности ионизационной камеры  $K_u$  будет равен:

$$K_u = \mu_z / \mu_{\text{возд}} = 4,27/0,0283 = 150 ,$$

где  $\mu_z$  – коэффициент электронного преобразования энергии фотонов для материала электродов камеры с атомным номером  $Z$ ;  $\mu_{\text{возд}}$  – коэффициент электронного преобразования энергии фотонов в воздухе.

С учетом не полного выхода электронов из электродов, ослабления излучения за счет расстояния и поглощения в электродах камеры будем считать  $\eta = 30 \%$ , а  $K_u = 45$  получим:

$$I_{k \text{ min}} = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ А; (3 мм Fe).}$$

$$I_{k \text{ max}} = 7,6 \cdot 10^{-10} \text{ А; (0,1 мм Fe).}$$

Для преобразования тока камеры в цифровой сигнал следует разработать электронную схему измерения с использованием АЦП с интегрированием сигнала камеры на емкости большей  $50 \cdot 10^{-12}$  Ф. Постоянная времени цепи разряда с учетом собственной емкости камеры и входного сопротивления АЦП  $\tau$  будет меньше 50 мс, что полностью удовлетворяет техническому заданию. Технические требования, предъявленные заказчиком к ионизационной камере и значения полученные в результате испытаний изготовленной камеры, приведены в табл.1.

Табл. 1. Основные параметры ИК

Параметр	Предъявленное значение	Полученное значение	Соответствие техническим требованиям
Чувствительность, А·с/Гр	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	Да
Динамический диапазон, отн. ед.	$10^3$	$10^3$	Да
Напряжение питания, В	400	150 ÷ 500	Да
Габаритные размеры, мм	Диаметр 165 Высота 125	Диаметр 165 Высота 125	Да

Камера (рис.3) содержит корпус в виде полого металлического цилиндра с рентгенопрозрачными электропроводящими крышками на торцах, симметрично размещенные между крышками вдоль продольной оси корпуса камеры и параллельные пластины из рентгенопрозрачного диэлектрического материала, чередующиеся высоковольтные и собирающие электроды, которые выполнены в виде покрытий из материала с высоким  $Z$  и изолированы от корпуса и крайних пластин, жестко закрепленных образующими поверхностями в заделках торцевых плоскостей корпуса. Расстоя-

ния между покрытиями высоковольтных и собирающих электродов соответственно равны, а полость камеры герметична и заполнена воздухом. Два металлических стержня, один из которых электрически связан с покрытиями высоковольтных электродов, но изолирован от покрытий собирающих электродов, а другой электрически связан с покрытиями собирающих электродов, но изолирован от покрытий высоковольтных электродов. Стержни размещены параллельно продольной оси корпуса камеры и жестко скреплены с пластинами. В результате получена высокая виброустойчивость камеры за счет обеспечения повышенной механической жесткости пластин и чувствительность. Уменьшение межэлектродных расстояний позволило увеличить напряженность в камере при постоянном напряжении питания высоковольтных электродов и тех же внешних габаритах камеры, что в целом улучшает динамические и метрологические показатели камеры.

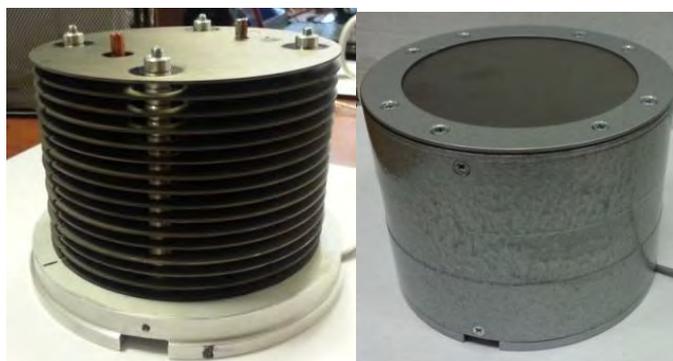


Рис. 3. Гетерогенная ионизационная камера

В процессе испытаний камеры были получены зависимости тока от мощности дозы для двух фокусных расстояний (рис. 4).

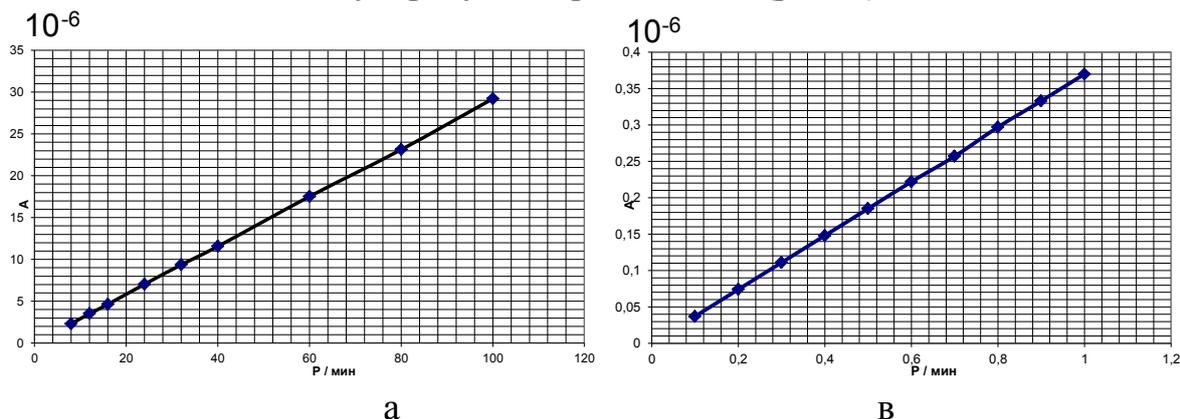


Рис. 4. Зависимости тока ионизационной камеры от мощности дозы для фокусного расстояния: а – 0,2 м; в – 2 м

Таким образом показано, что в диапазоне мощностей доз от 0,1 до 100 Р/мин, что соответствует динамическому диапазону 10<sup>3</sup>, чувствительность камеры постоянна и равна  $2 \cdot 10^{-3}$  А с/Гр. Изменение напряжения пи-

тания камеры в диапазоне от 150 до 500 В несущественно влияет на чувствительность (рис. 5).

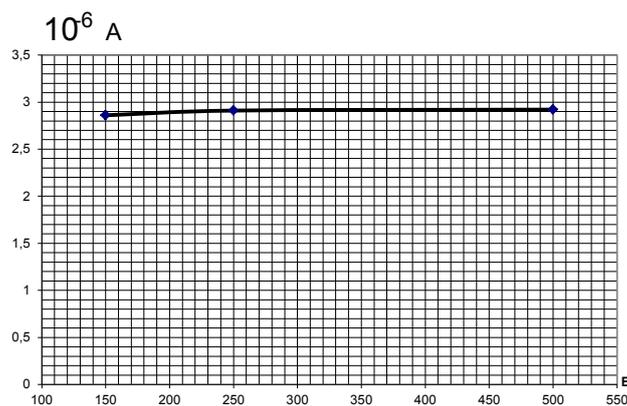


Рис. 5. Чувствительность ионизационной камеры от напряжения питания

Разработанная камера может с успехом заменять штатные детекторы на всех толщиномерах серии FMM-24004, что позволит повысить метрологические характеристики измерителей толщины и продлить срок их службы на заводах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. GOST 24034-80. Non-destructive testing radiation. Terms and Definitions.
2. Пат **RUS2221220 15.11.2002**. Рентгеновский измеритель параметров проката / Б. В. Артемьев, А. И. Маслов, В. Г. Запускалов и др.
3. Kanter B. M., Vladimirov L. V., Vladimirov Yu L and Artemyev I B 2016 Patent RU 163274. Communicating ionization chamber.
4. Artemiev B. V. and Shubochkin A E 2014 *Testing.Diagnostics* 2. p. 24–31.
5. The capabilities of multielectrode heterogeneous ionization chambers for x-ray thickness measurements / B. V. Artemev, A. I. Maslov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2006. – Т. 42, № 5. – С. 345–349.
6. Использование рентгеновских толщиномеров в производстве проката цветных металлов / Б. В. Артемьев [и др.] // *Дефектоскопия*. – 2003. – № 6. – С. 55–61.