

Список использованных источников

1. Глазков Ю.А., Особенности аттестации контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии // Дефектоскопия – 2004 – №9 – С. 74–84
2. ГОСТ Р ИСО 3452-3-2009 Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы
3. Kalinichenko N. P., Kalinichenko A. N., Konareva I. S. Reference specimens of nonmetallic materials for penetrant nondestructive testing // Russian Journal of Nondestructive Testing– 2011– V.47– №. 10 – PP. 663–666
4. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования
5. Калиниченко Н. П. , Калиниченко А. Н. , Лобанова (Конарева) И. С. Универсальный контрольный образец для капиллярной дефектоскопии // Контроль. Диагностика– 2012 – №. 11(173)– С. 34–36
6. Калиниченко Н.П., Конарева И.С., Борисов С.С., Дерик А.Я., Метрологические и эксплуатационные характеристики контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии из неметаллических материалов// Вестник науки Сибири [электронный ресурс] <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/436/376>
7. Калиниченко Н. П. , Калиниченко А. Н. , Лобанова (Конарева) И. С. , Попова А. Ю. , Борисов С. С. Технология изготовления и исследование образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля из неметаллов // Измерительная техника– 2014– №. 5– С. 8–11

АНАЛИЗ ВКЛАДА КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ РАДИАЦИОННО – ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Капранов Б.И., Мудров М.А.
ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Радиационно – защитные покрытия широко используются в авиационной и космической технике для защиты от воздействия ионизирующих излучений. Наиболее актуален этот вопрос в приборостроении, в частности, в задачах повышения надежности эксплуатации электронной аппаратуры в условиях внешнего облучения рентгеновским излучением.

Для защиты на приборные отсеки наносится покрытие, эффективно ослабляющее рентгеновское излучение в области энергий до 100 кэВ. Как правило, к таким покрытиям предъявляется требование механической прочности и максимальной эффективности ослабления при минимальном весе. Для обеспечения этих требований разрабатываются составы покрытий [1], способы изготовления или нанесения [2], способы измерения ослабляющих свойств [3]. Чаще всего такие покрытия изготавливаются на основе использования материалов РЗК – 6 и РЗО – 4, содержащих оксиды редкоземельных элементов [4, 5]. Их эффективность обеспечивается тем, что K – скачки поглощения располагаются в области энергий до 100 кэВ. Результирующий коэффициент ослабления оказывается выше, чем коэффициент ослабления для этих энергий у свинца. При этом плотность такого материала меньше, чем плотность свинца.

Для контроля качества таких покрытий чаще всего используют флуоресцентный метод, основанный на облучении комбинации покрытие – основание первичным γ – или рентгеновским излучением и регистрации интенсивности потока флуоресцентных квантов из элементов покрытия. Измеряемым параметром при этом является поверхностная плотность ρ , измеряемая в г/см^2 . С увеличением поверхностной плотности интенсивность

потока флуоресцентных квантов растет. В приборах, разрабатываемых для такого контроля, используется геометрия одностороннего доступа [6 – 9]. В качестве первичного источника излучения чаще всего используют долгоживущий изотоп $Am - 241$. При разработке методов и аппаратуры для контроля таких покрытий всегда встает вопрос о соотношении интенсивностей потоков флуоресцентного излучения и комптоновски рассеянного излучения. Комптоновское излучение формируется как в самих элементах покрытия, так и в основании, на которое оно наносится. Результирующий вторичный поток имеет сложный энергетический спектр. В нем отражаются зависимости от геометрической толщины покрытия и основания, деформации спектра флуоресценции за счет возбуждения элементов покрытия рассеянным от основания излучением, межэлементным подвозбуждением K – линий элементов с меньшим атомным номером K – линиями элементов с большим атомным номером, вторично рассеянных основанием флуоресцентных квантов от элементов покрытия и т.д.

В данной работе изучен вклад комптоновского рассеяния в общий вторичный поток, возникающий в элементах покрытия при возбуждении γ – квантами $Am - 241$. Для решения поставленной задачи рассмотрим геометрию, представленную на рис. 1.

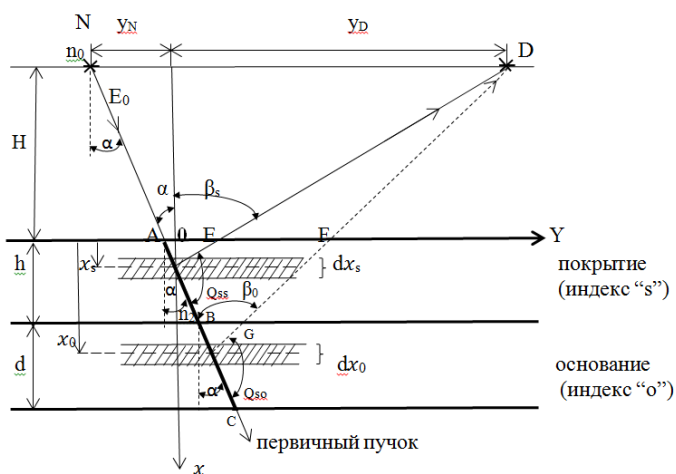


Рис. 1. Схема расчета потоков флуоресцентного и рассеянного излучений:

N – источник излучения (монохроматический, энергия E_0); n_0 – число фотонов в единицу времени, испускаемых источником в телесный угол 4π (интенсивность); D – детектор;

H – расстояние от базы источник – детектор до объекта; h – толщина покрытия;

d – толщина основания; α – угол падения первичного пучка; β_s, β_o – углы выхода

вторичного излучения из покрытия и основания, соответственно; Q_{ss}, Q_{so} – углы

рассеяния вторичного излучения на детектор из покрытия и основания, соответственно; $x_s,$

x_o – координаты точек взаимодействия первичного пучка в покрытии и основании,

соответственно;

AB – линия взаимодействия первичного пучка с покрытием; BC – линия взаимодействия первичного пучка с основанием

Излучение от источника N (поток считаем “узким”) падает на объект под углом α . Кванты первичного излучения проходят через покрытие толщиной h по линии AB , где ослабляются, и попадают в основание толщиной d , где рассеиваются на линии BC . Суммарный вторичный поток в детекторе D складывается из флуоресцентных квантов (учитывается только k – флуоресценция) от элементов покрытия, комптоновски рассеянных квантов в элементах покрытия, комптоновски рассеянных квантов в основании с учетом ослабления первичного и вторичного потока покрытием и другими факторами. Будем считать, что флуоресцентные кванты из элемента покрытия dx_s . В точке x_s вылетают в детектор под углом к нормали β_s .

Источник излучения N и детектор D находятся на расстоянии H от объекта контроля в положениях y_N и y_D . Поверхность объекта, на которую действует первичный пучок обозначим S . Линейные размеры покрытия h и площадки S будем считать малыми по сравнению с H . Взаимодействие первичного пучка с покрытием будет происходить по линии АВ, длина которой определится как $\frac{h}{\cos \alpha}$. Интенсивность потока квантов первичного пучка в точке x_s покрытия будет определяться геометрическим расхождением и ослаблением на пути от точки А до точки взаимодействия:

$$n(x) = \frac{n_0}{4\pi \left(\frac{H}{\cos \alpha} + \frac{x}{\cos \alpha} \right)^2} \cdot e^{-\mu_s \frac{x}{\cos \alpha}},$$

где μ_s – линейный коэффициент ослабления первичного излучения в материале покрытия; $\frac{x}{\cos \alpha}$ – путь первичного излучения в покрытии до точки взаимодействия.

При прохождении слоя dx_s интенсивность первичного пучка уменьшится на величину $dn_s(x_s)$:

$$dn_s(x_s) = -\mu_s \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \cdot n_s(x_s) dx_s,$$

при условии, что $h \ll H$.

Обозначим в этом выражении интенсивность потока квантов первичного излучения на входе в изделие как n_1 . Если источник излучения считать точечным, то

$$n_1 = \frac{n_0}{4\pi \left(\frac{H}{\cos \alpha} \right)^2}.$$

Тогда

$$dn_s(x_s) = -n_1 \cdot \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{x_s}{\cos \alpha}} dx_s,$$

Где μ_ρ^s – массовый коэффициент ослабления первичного пучка в материале покрытия; ρ_s – плотность материала покрытия.

Полное количество квантов первичного пучка, поглотившихся в покрытии на линии АВ, определится интегрированием $dn_s(x_s)$ по всей толщине покрытия h .

$$\Delta n_s(h) = n_1 \cdot \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right).$$

Относительная доля квантов первичного пучка, поглотившихся в покрытии составит:

$$\delta n_s(h) = \frac{\Delta n_s(h)}{n_1} = \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right).$$

Соответственно, интенсивность потока квантов первичного пучка, прошедшего через покрытие, т.е. на входе в основание, будет равна $n_2 = n_1 - \Delta n_s(h)$ или:

$$n_2 = n_1 \cdot \left[1 - \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right) \right].$$

Кванты первичного излучения в материале покрытия испытывают два процесса: фотопоглощение и рассеяние. Соотношение вероятностей этих процессов задается сечениями фотопоглощения τ и рассеяния σ [10]. Полное массовое сечение взаимодействия в покрытии определяется как:

$$\mu_\rho^s = \tau_\rho^s + \sigma_\rho^s.$$

Следовательно, часть потока квантов первичного излучения, провзаимодействовавших с фотопоглощением будет равна

$$\Delta n_s(h)_{\text{погл.}} = n_1 \cdot \frac{\tau_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right),$$

а часть интенсивности потока первичного излучения провзаимодействовавшего комптоновски будет равна

$$\Delta n_s (h)_{\text{компл.}} = n_1 \cdot \frac{\sigma_p^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_p^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}}\right) \quad (1)$$

Выход флуоресцентного излучения связан только с фотопоглощением τ . Каждый из фотопоглощенных фотонов первичного излучения возбуждает один атом в веществе покрытия [11], а число атомов, испустивших флуоресцентные кванты определяется вероятностью ω_k выхода флуоресценции:

$$\Delta n_{\text{фл.}}^k = \omega_k \cdot \Delta n_s (h)_{\text{погл.}}$$

Обычно ω_k определяют экспериментально, как отношение интенсивности потока флуоресцентных квантов $n_{\text{фл.}}^k$ к интенсивности потока первичных квантов, фотопоглощенных в материале $\Delta n_s (h)_{\text{погл.}}$. В литературе есть данные по значению величины ω_k для элементов с атомным номером от $Z = 8$ до $Z = 54$ и ω_L для элементов с Z от 40 до 92.

Численные значения коэффициента выхода флуоресценции ω_k элементов, входящих в состав покрытия приведены в таблице 1 [11].

Если рассматривать только выход флуоресценции при возбуждении K – уровня элементов, то при этом возбуждается дублет $K\alpha_1\alpha_2$, энергии линий которого $E_{K\alpha_1}$ и $E_{K\alpha_2}$ определяются энергиями переходов с K – уровня на уровень L_{III} и с K – уровня на уровень L_{II} , соответственно, и для перечисленных элементов приведены также в таблице 1.

Отношение интенсивностей линий одного мультиплета находится с помощью эмпирического правила Бургера и Доргело [11]: если расщеплением начальных уровней мультиплета пренебречь, что для K – уровня всех элементов допустимо, так как они отличаются только спиновым числом, то интенсивности линии мультиплета $K\alpha_1\alpha_2$ будут пропорциональны статистическим весам конечных уровней, L_{III} и L_{II} , соответственно. Так как у мультиплета $K\alpha_1\alpha_2$ верхний уровень общий, то $\frac{J_{\alpha_1}}{J_{\alpha_2}} = \frac{\tau_0^2(\alpha_1)}{\tau_0^2(\alpha_2)} = \frac{2}{1}$.

Энергии линий $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ отличаются незначительно и не могут быть разрешены скантинляционным спектрометром. Каждый дублет будет регистрироваться суммарно. Для определения энергии K – дублета можно использовать понятие эффективной энергии, определяемой как сумма взвешенных энергий линий $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$. Количественное соотношение энергетического вклада линий $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ определяется относительной интенсивностью этих линий. В соответствии с [11] для элементов с Z от 23 до 90 отношение

$$\frac{J_{\alpha_1}}{J_{\alpha_2}} = 2,00$$

с отклонением не более ± 0.05 . Поэтому в данной работе принято вес линии $K\alpha_1$ принимать равным 2, а вес линии $K\alpha_2$ – 1. Тогда эффективная энергия дублета будет определяться как

$$E_{\text{эфф}} = \frac{2}{3} \cdot E_{K\alpha_1} + \frac{1}{3} \cdot E_{K\alpha_2}$$

Таблица 1. Диаграммные энергетические линии и энергии K – края поглощения, вероятность возбуждения флуоресценции, вероятность выхода флуоресценции элементов, входящих в состав РЗК – 6 и РЗО – 4.

Z	Материал		Энергия K – края поглощения E_k , кэВ	K – серия, кэВ			ω_k , %	Скачок поглощения S_k , относит. ед.	α для Am – 241
				$E_{K\alpha_2}$	$E_{K\alpha_1}$	\overline{E}_k			
11	Натрий	Na	1,073	1,043	1,043	1,043	0,035	15,2	0,017
14	Кремний	Si	1,847	1,743	1,744	1,744	0,04	13,2	0,030
15	Фосфор	P	2,144	2,019	2,019	2,019	0,055	12,6	0,033
20	Кальций	Ca	4,037	3,696	3,700	3,700	0,165	10,7	0,067
26	Железо	Fe	7,112	6,405	6,418	6,412	0,32	9,0	0,12

39	Иттрий	Y	17,038	14,918	14,993	14,970	0,68	7,0	0,29
48	Кадмий	Cd	26,711	23,035	23,225	23,165	0,76	6,0	0,46
50	Олово	Sn	29,200	25,100	25,328	25,258	0,75	5,9	0,50
57	Лантан	La	38,925	33,109	33,517	33,417	0,69	5,4	0,68
58	Церий	Ce	40,443	33,978	34,796	34,177	0,68	5,3	0,71
59	Празеодим	Pr	41,991	35,629	36,106	35,910	0,66	5,3	0,74
60	Неодим	Nd	43,569	36,930	37,445	37,236	0,66	5,2	0,78
62	Самарий	Sm	46, 834	39,591	40,189	39,950	0,64	5,1	0,86
63	Европий	Eu	48,519	40,966	41,612	41,355	0,62	5,0	0,89
64	Гадолиний	Gd	50,239	42,406	43,096	42,823	0,61	5,0	0,89
65	Тербий	Tb	51,996	43,825	44,572	44,279	0,60	4,9	0,94
66	Диспрозий	Dy	53,788	45,315	46,119	45,850	0,59	4,9	1,00
67	Гольмий	Ho	55,618	46,794	47,637	47,308	0,56	4,8	1,00
68	Эрбий	Er	57,486	48,302	49,208	48,855	0,55	4,7	1,00
70	Иттербий	Yb	61,332	51,454	52,493	52,094	0,51	4,7	-
71	Лютеций	Lu	63,316	53,087	54,191	53,769	0,51	4,6	-
82	Свинец	Pb	88,004	72,967	75,138	74,340	-	4,1	-
83	Висмут	Bi	90,526	75,028	77,283	76,454	-	4,1	-

Рассчитанные из этого соотношения эффективные энергии K – дублетов для элементов покрытий приведены в табл.1. Взвешенная сумма эффективных энергий K дублетов в многокомпонентных покрытиях будет определять эффективную энергию спектра флуоресцентного излучения, возбуждаемого в покрытии конкретного состава.

Другой фактор, определяющий выход флуоресцентных квантов, - зависимость от энергии возбуждающего излучения. Наибольший выход флуоресценции с K – уровня будет при энергии первичного излучения, возможно более близкой к энергии K – края поглощения E_k . Но при этом должно выполняться условие $\frac{E_0}{E_k} > 1$. Зависимость вероятности возбуждения от отношения данных энергий описывают функцией [11]:

$$\varepsilon\left(\frac{E_0}{E_k}\right) = \frac{\left(\frac{E_0}{E_k}\right)^3 + \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{1}{S_k}}{\left(\frac{E_0}{E_k}\right)^4},$$

где $S_k - K$ – скачок поглощения.

Численные значения S_k для элементов покрытия также представлены в таблице 1.

Значение функции $\varepsilon\left(\frac{E_0}{E_k}\right)$ максимально при отношении энергий $\frac{E_0}{E_k} = 1$ и составляет при равенстве углов α и β , величину равную $\frac{S_k+1}{S_k}$. При удалении E_0 от E_k в сторону больших значений величина вероятности возбуждения ε уменьшается. Если в качестве источника использовать изотоп америция -241, то при уменьшении атомного номера вероятность возбуждения K – линии элементов уменьшается в соответствии с таблицей 1. Таким образом, полный выход флуоресцентных квантов для элементов покрытий на основе материалов РЗК - 6 и РЗО – 4 при условии возбуждения излучением изотопа Am -241 будет описываться соотношением

$$\Delta n_{\text{фл.}}^k = \varepsilon \cdot \omega_k \cdot n_1 \cdot \frac{\tau_{\rho}^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_{\rho}^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}}\right).$$

С учетом того, что полное число комптоновски рассеянных квантов в элементах, входящих в состав радиационно – защитных покрытий, определяется соотношением (6), можно определить относительный вклад комптоновского рассеяния в суммарный поток возбуждаемого в элементах покрытия вторичного излучения:

$$\delta_{\text{КОМПТ.}} = \frac{\Delta n_s(h)_{\text{КОМП.}}}{\Delta n_{\text{ФЛ.}}^k},$$

или

$$\delta_{\text{КОМПТ.}} = \frac{\sigma_p^s}{\alpha \cdot \omega_k \cdot \tau_p^s} \quad (2)$$

Вычисленные по (2) значения относительного вклада комптоновского рассеяния в суммарный вторичный поток приведены в таблице 2.

Таблица 2. Относительный вклад комптоновского рассеяния в общий поток вторичного излучения, для элементов входящих в состав РЗК – 6 и РЗО – 4.

Элемент	Натрий	Кремний	Фосфор	Кальций	Железо	Иттрий	Кадмий	Олово	Лантан	Церий	Празеодим	Неодим	Самарий	Европий	Гадолиний	Тербий	Диспрозий	Гольмий	Эрбий
$\delta_{\text{КОМПТ.}} \%$	556639	114833	58950	3509	418	22,64	7,114	6,000	3,390	3,147	2,992	2,738	2,345	2,246	2,210	2,039	1,864	1,893	1,873

Анализ полученных данных показывает, что во всех элементах, входящих в состав радиационно – защитных материалов РЗК – 6 и РЗО – 4 при их возбуждении изотопом америцием – 241 вклад комптоновски рассеянных квантов превышает вклад флуоресцентных квантов, причем с уменьшением атомного номера их вклад напротив возрастает.

Список использованных источников

1. Кутайцева О.Н., Радиационно-защитные полистирольные покрытия [Текст]: дис. ... канд. технич. наук: 05.23.05 защищена 2001/ Кутайцева Ольга Николаевна. - Пенза, 2001. - 163 с.
2. Пат. 2054439 Российская Федерация, МПК C08L9/00, C08K3/22, C08L9/00, C08L23:34, G21F1/10 Резиновая смесь для изготовления рентгенозащитных резин [Текст] / Дебальчук В.Ф., Глазкова Н.А., Кириллов В.Н., Чевордаев В.М., Булавина Н.Л.; заявитель и патентообладатель Дебальчук В.Ф., Глазкова Н.А., Кириллов В.Н., Чевордаев В.М., Булавина Н.Л.; - № 92003093/04; заявл. 30.10.1992; опубл. 20.02.96,
3. ГОСТ Р 51532-99 (МЭК 61331-1-94). Средства защиты от рентгеновского излучения в медицинской диагностике. Часть 1 Определение ослабляющих свойств материалов [Текст]. - Введ. 2001-01-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001.- ил.;
4. Продукт РЗО – 4 (с изм.№ 1, 2). Технические условия [Текст]: ТУ 48-4-345-84. – Введ. 1985 – 01 – 01. - М.: Госстандарт, 1985. – 16 с.: ил.
5. Концентраты редкоземельных элементов средней группы (с изм.1 - 4) Технические условия [Текст]: ТУ 48-4-382-76. - Введ. 1977 – 04 – 01. - М.: Госстандарт, 1976. – 19 с.: ил.
6. Техническое описание «Радиоизотонный прибор МТ-01», НИИ ИН при ТПУ, г. Томск, сертификат RU.E.38.007. А. № 14441, №24536-03 в Государственном реестре средств измерений.
7. Радиоизотопный измеритель толщины покрытия ИТП – 5705. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 5705-00-00ТО/ВНИИАчермет - М.; 1972.
8. Радиоизотопный толщиномер покрытий “Бетамикрометр-2”. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЕИ620030ТО/ ВНИИРТ, М., 1973.
9. Альbedo – толщиномер покрытий “АТП -2”. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. АПШ 5.178.002 ТО- Томск, 1975

10. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма –излучения (для энергий 0,001 – 100 Мэв и элементов с 1 по 100) [Текст]. Справочник; перевод с англ. В. Климанова, Е.Чистова– М.: АТОМИЗДАТ–1973–256с.
11. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей – М.: Гостехтеориздат–1953–455 стр.

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Старикова Н.С., Редько В.В., Вавилова Г.В.
Томский политехнический университет

Одним из параметров, оказывающих значительное влияние на эксплуатационные характеристики кабельного изделия, является состояние изоляции (целостность, внешняя и внутренняя геометрия, химический состав). При производстве кабельных изделий существует необходимость непрерывного контроля данного параметра для своевременной корректировки технологического режима и снижения случаев массового брака продукции.

В настоящее время при производстве кабельных изделий используют два метода контроля: контроль погонной электрической емкости [1] и электроискровой метод контроля [2].

При контроле погонной электрической емкости кабельное изделие проходит через цилиндрический электрод, с помощью которого подается низковольтное напряжение и измеряется электрическая емкость участка изоляции. Для обеспечения электрического контакта между поверхностью изоляции и электродом используют воду охлаждающей ванны. При прохождении дефекта через зону контроля значение погонной электрической емкости изменяется.

При электроискровом методе контроля с помощью электрода (цепочного, пружинного или щеточного) высокое испытательное напряжение прикладывается к поверхности изоляции. При прохождении дефекта через зону контроля происходит электрический пробой, который регистрируется автоматикой [3].

По отдельности данные методы не позволяют выявлять некоторые виды дефектов, и, тем самым, снижают достоверность проводимого контроля [4,5].

Для повышения достоверности было предложено объединить два существующих метода контроля в один комплексный метод.

Предложенный комплексный метод контроля заключается в измерении погонной электрической емкости при электроискровых испытаниях (Рис.1).

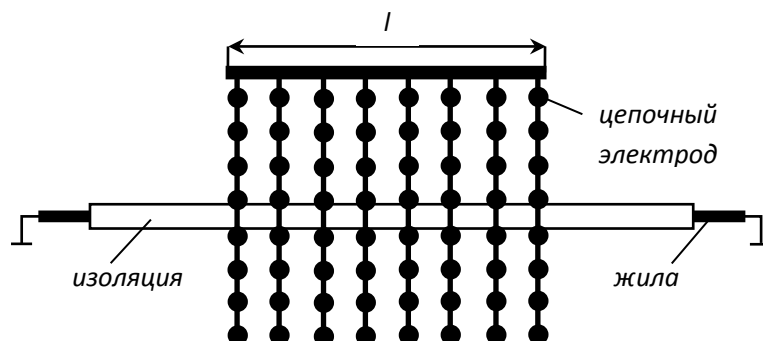


Рис. 1. Теоретическая модель комплексного метода контроля

Для достоверного измерения электрической емкости необходимо, чтобы испытательное напряжение было приложено по всей поверхности зоны контроля, а не