

Спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиохромных радиационно-чувствительных композиций

В. П. Тенишев

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
р. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: tenishev@vniiftri.ru

Освещены вопросы обеспечения радиационной безопасности при облучении изделий медицинской, сельскохозяйственной и пищевой промышленности. Рассмотрены средства измерений поглощённой дозы ионизирующего излучения. Показано, что существующих в РФ в настоящее время средств измерений поглощённой дозы недостаточно. Исследованы спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиационно-чувствительных композиций с целью разработки на их основе новых средств измерений поглощённой дозы. Показана возможность создания на базе таких средств измерений новых плёночных дозиметрических систем, а также расширения диапазона поглощённых доз, включая область малых доз 30–1000 Гр.

Ключевые слова: поглощённая доза, ионизирующее излучение, радиационно-чувствительная композиция, плёнка радиационно-чувствительная, оптическая плотность.

Введение. При обработке изделий пищевой, сельскохозяйственной и медицинской промышленности ионизирующим излучением для гарантированного достижения регламентированного значения радиационного воздействия требуется высокоточная дозиметрия (ГОСТ ИСО 11137-2011 «Стерилизация медицинской продукции. Радиационная стерилизация», ГОСТ ИСО 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением», ГОСТ Р ИСО/АСТМ 51900-2013 «Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты») в широком диапазоне поглощённой дозы D для составления карты распределения D по всему объёму облучаемой продукции [1, 2]. В целях обеспечения радиационной безопасности и достижения заданной технологической цели по дозиметрическим данным устанавливаются соответствующие параметры радиационно-технологической установки (РТУ) для управления радиационным воздействием. Диапазон D при облучении изделия должен соответствовать нормативным требованиям, прописанным в технологическом регламенте облучения конкретного изделия. Управление процессом облучения основывается на установлении соотношений между поглощённой дозой и параметрами РТУ:

время выдержки, положение на пути источника (для РТУ с изотропными радионуклидными источниками);

напряжение ускорения и сила тока пучка, ширина и однородность сканирования,

скорость транспортировки облучаемого объекта относительно пучка электронов (для РТУ с ускорителями электронов).

Значение и распределение поглощённой дозы определяются используемой дозиметрической системой с надлежащим уровнем точности и правильности.

В настоящее время в России в радиационных технологиях для дозиметрии используются разработанные во ВНИИФТРИ стандартные образцы (СО) утверждённого типа на основе окрашенных радиационно-чувствительных плёнок (далее – плёнок). СО прослеживаются к Государственному первичному специальному эталону единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 [2–4], хранящему единицу мощности поглощённой дозы, и позволяют измерять значение D высокоинтенсивного излучения только в ограниченном диапазоне 1–200 кГр.

Существующих в настоящее время СО утверждённого типа для измерения поглощённой дозы недостаточно для проведения надлежащей дозиметрии при обработке радиационным способом продукции пищевой и сельскохозяйственной промышленности [2, 5, 6]. В зависимости от технологической цели диапазон требуемых значений D может составлять от десятков единиц грей до нескольких десятков килогрей [5–7], в связи с чем необходимо разработать новые дозиметрические системы с расширенным диапазоном измерения значений D и повышенной чувствительностью для измерения поглощённой дозы высокоинтенсивного ионизирующего излучения. Необходимы новые средства

Таблица 1

Параметры исследуемых РЧК

РЧК	D , Гр	Название плёнки	Толщина слоя РЧК, мкм
Сополимер с феназиновым красителем	$5 \cdot 10^3$ – $5 \cdot 10^5$	ПОР-1	Около 15
Сополимер с красителем 4-диэтиламино-азобензол	30–5000	ПОР-2	50, 75, 90
Сополимер с красителем 4-диэтиламино-азобензол и сенсibilизатором гексахлорэтан (C_2Cl_6)	200–10000	ПОР-3	30, 50, 80

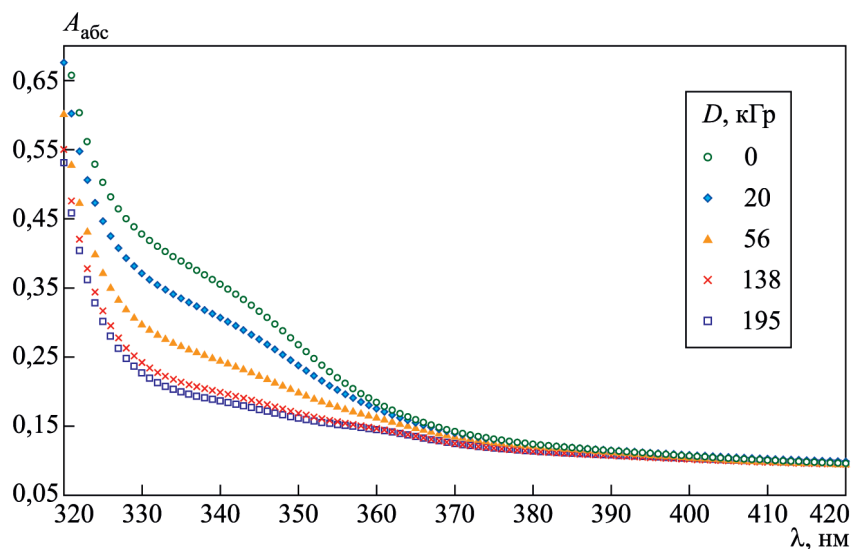


Рис. 1. Спектр абсолютной оптической плотности $A_{\text{абс}}$ ПЭТ-подложки радиохромных плёнок для разных значений поглощённой дозы $D=0 \dots 200$ кГр (при $\lambda > 420$ нм значение $A_{\text{абс}}$ ПЭТ-плёнки практически не зависит от дозы D)

Fig. 1. The absolute optical density A_{abs} spectrum of the polyethylene terephthalate substrate for radiochromic films in dependence of an absorbed dose $D=(0 \dots 200)$ kGy (at $\lambda > 420$ nm the OD A_{abs} of the PET-base practically does not depends on the absorbed dose D)

измерений (СИ) поглощённой дозы утверждённого типа и дозиметрические системы с метрологическими характеристиками, прослеживаемыми к ГЭТ 209-2014 во всём требуемом диапазоне значений D . Такие СИ будут обеспечивать единство измерений поглощённой дозы и гарантировать контроль качества продукции при её обработке ионизирующим излучением.

Для дозиметрии в радиационных технологиях наиболее эффективно применение радиационно-чувствительных плёночных СИ вследствие простоты измерений, а также доступности, дешевизны и высокого пространственного разрешения (до 1 мм) измерений при картировании распределения поглощённой дозы в облучаемой продукции [7, 8]. Дозиметрические системы на основе радиационно-чувствительных композиций (РЧК) хорошо известны и используются в различных областях науки, техники и медицины как для пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию радиационно-технологических установок, так и для валидации

процесса радиационной обработки [1, 2, 5–11].

Цель настоящей работы – исследование измерительных возможностей РЧК в широком диапазоне поглощённой дозы. Для этого рассмотрены спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики РЧК, ранее не изученные с этой точки зрения, и показана возможность разработки на их основе новых

плёночных дозиметрических систем и СИ поглощённой дозы в расширенном диапазоне значений D , включая область малых доз 30–1000 Гр.

Материалы, аппаратура и методы. Радиационно-чувствительные композиции.

В табл. 1 приведены краткие характеристики исследуемых образцов РЧК, из которых по технологии согласно ТУ 2379-026-13271746-2006 изготовлены образцы плёнок. Для этого на основу-носитель из прозрачной полиэтилентерефталатной (ПЭТ) плёнки толщиной около 98 мкм наносят слой РЧК из соответствующего сополимера определённой толщины. Для изучения чувствительности к поглощённой дозе от толщины слоя РЧК в диапазоне $(30 \pm 3) \dots (90 \pm 5)$ мкм изготовлены плёнки со слоями РЧК различной толщины (см. табл. 1). В течение суток плёнки высушивали в тёмном помещении с последующей тепловой обработкой в термической печи при 60°C в течение 4–5 ч. После просушки из плёнок вырезали экспериментальные образцы размером 12×25 мм в соответствии с размерами держателей спектрофотометра. Оптическую плотность необлучённых образцов плёнок контролировали на спектрофотометре с целью отбора опорных образцов.

Экспериментальная аппаратура, методика измерений.

Для облучения соответствующей дозой гамма-, бета- или электронного излучений согласно ISO/ASTM 51261-2013 “Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing” составляли комплекты, содержащие по шесть образцов плёнок: РЧК ПОР-2 толщиной 90, 75, 50 мкм и РЧК ПОР-3 толщиной 80, 50, 30 мкм (см. табл. 1). Облучение экспериментальных радиационно-чувствительных плёночных образцов проводили на установках МРХ-γ-100 (излучение радионуклидов ^{60}Co , энергия 1,25 МэВ, мощность дозы в процессе облучения $\sim 2,3$ Гр/с) и ЛМБ-γ-1М (излучение радионуклидов ^{137}Cs , энергия 0,65 МэВ, мощность дозы $\sim 0,5$ Гр/с). Эти установки входят в состав эталона ГЭТ 209-2014 [3, 4]. Различные значения D получали накоплением дозы в аттестованном объёме эталона путём изменения времени облучения.

Измерение оптической плотности плёночных образцов проводились на двулучевом спектрофотометре

SPECORD 210 Plus (Analytic Jena, Германия). Относительную оптическую плотность $A_{\text{отн}}$ плёнок, облучённых различными дозами, измеряли на спектрофотометре относительно оптической плотности $A_{\text{оп}}$ необлучённого опорного образца и вычисляли по формуле

$$A_{\text{отн}} = A_{\text{обл}} - A_{\text{оп}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{обл}}$ – абсолютная оптическая плотность облучённой радиохромной плёнки.

В настоящей работе для каждого значения D использовали отдельные описанные выше комплекты из шести образцов. Оптические плотности измеряли до и после облучения.

Результаты исследований. Основаноситель из ПЭТ защищает РЧК от механических повреждений при работе. Поскольку слой ПЭТ-носителя может изменить оптическую плотность всей системы «носитель+РЧК-плёнка», исследовали оптическую плотность необлучённой плёнки ПЭТ-носителя и её чувствительность к облучению ионизирующим излучением. На рис. 1 представлены спектры абсолютной оптической плотности ПЭТ-носителя (98 ± 3) мкм до и после облучения ионизирующим излучением дозами до 200 кГр. В рабочей области длин волн оптического излучения 400–600 нм ионизирующее излучение практически не оказывает влияния на оптическую плотность ПЭТ-плёнок в рабочей области (500–600 нм) исследуемых РЧК (относительная неопределённость измерений оптической плотности плёнки $u_A/A \leq 0,06$).

На рис. 2 представлены результаты исследования относительной оптической плотности плёнок ПОР-1 (см. табл. 1). На выделенных длинах волн $\lambda = 340, 512, 525$ и 580 нм (интересных для дозиметрических целей) зависимости $A_{\text{отн}}(D)$ имеют линейный характер. Спектры относительной оптической плотности исследованных образцов радиохромной плёнки ПОР-1 условно можно разделить на три поддиапазона. Длины волн $\lambda < 370$ нм в дозиметрии не используются вследствие неоднородности оптической плотности РЧК. В диапазоне $\lambda = 370 \dots 480$ нм воздействие ионизирующего излучения приводит к просветлению РЧК, но оптическая плотность пропорциональна поглощённой дозе, что можно использовать для дозиметрических целей. В настоящее время плёнки ПОР-1 применяются в дозиметрии на длинах волн 512 и 580 нм для измерений поглощённой дозы в диапазонах соответственно 5–50 и 30–200 кГр.

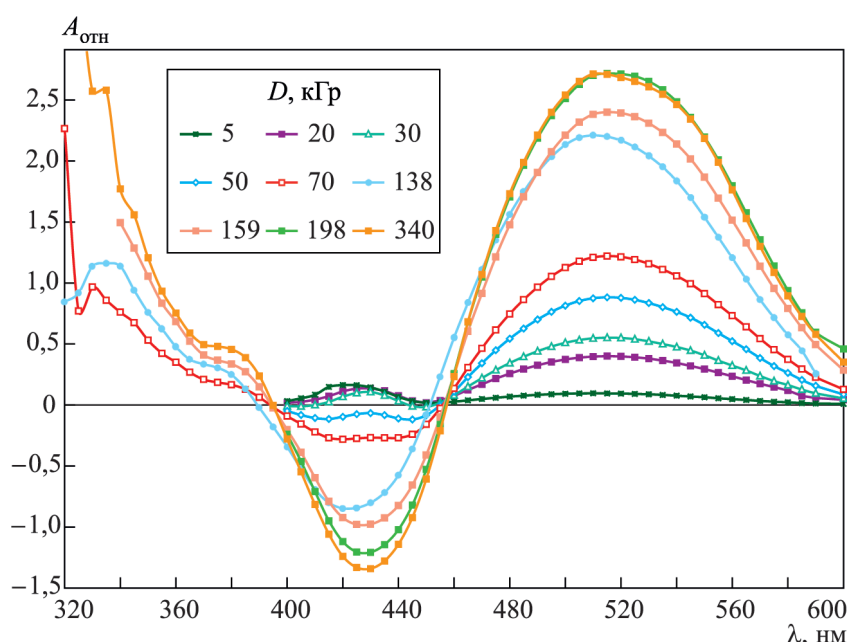


Рис. 2. Спектры относительной оптической плотности $A_{\text{отн}}$ плёнки ПОР-1 для разных значений поглощённой дозы D

Fig. 2. The POR-1 film relative optical density A_{rel} spectra for different values of the absorbed dose D

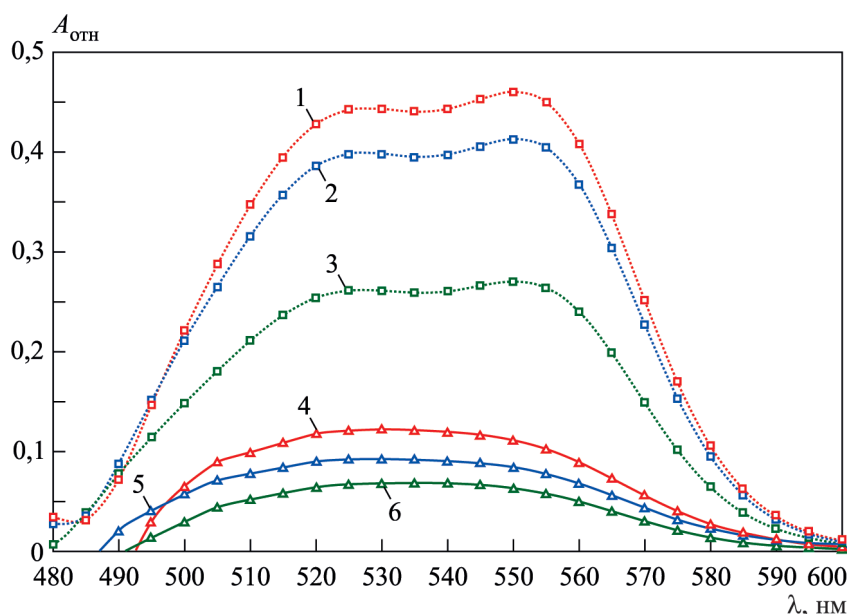


Рис. 3. Спектральное распределение относительной оптической плотности плёнок ПОР-2 и ПОР-3 с радиационно-чувствительными слоями разной толщины, облучённых близкими дозами:

1–3 – ПОР-2 соответственно при толщинах РЧК-слоя примерно 90, 75, 50 мкм и поглощённых дозах около 884, 914, 904 Гр; 4–6 – ПОР-3 соответственно при поглощённой дозе около 800 Гр и толщине РЧК-слоя 80, 50, 35 мкм

Fig. 3. The POR-2 and POR-3 films relative optical density spectral distribution for different thicknesses radiation-sensitive layers (RS-layer) at equal irradiated doses:

1–3 – POR-2 with RS-layer thicknesses $\sim 90, 75, 50 \mu\text{m}$ at absorbed dose $\sim 884, 914, 904 \text{ Gy}$; 4–6 – POR-3 at the absorbed dose of $\sim 800 \text{ Gy}$ for RS-layer thickness $80, 50, 35 \mu\text{m}$

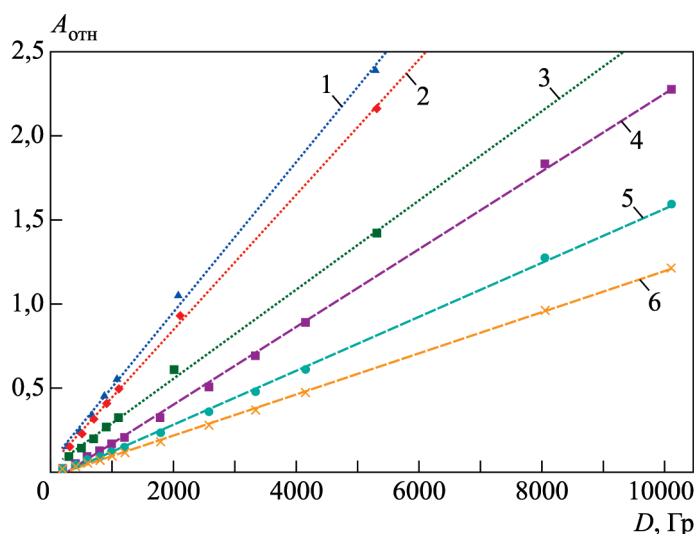


Рис. 4. Функциональная зависимость относительных оптических плотностей плёнок от поглощённой дозы:

1–3 – ПОР-2, $\lambda = 550$ нм, толщина РЧК-слоя соответственно 90, 75, 50 мкм; 4–6 – ПОР-3, $\lambda = 530$ нм, толщина РЧК-слоя соответственно 80, 50, 35 мкм

Fig. 4. The relative optical densities functional dependence on the absorbed dose:

POR-2, $\lambda = 550$ nm, the thickness of the RS-layer ~90, 75, 50 μm – curves 1–3, respectively; POR-3, $\lambda = 530$ nm, the thickness of the RS-layer ~80, 50, 35 μm – curves 4–6, respectively

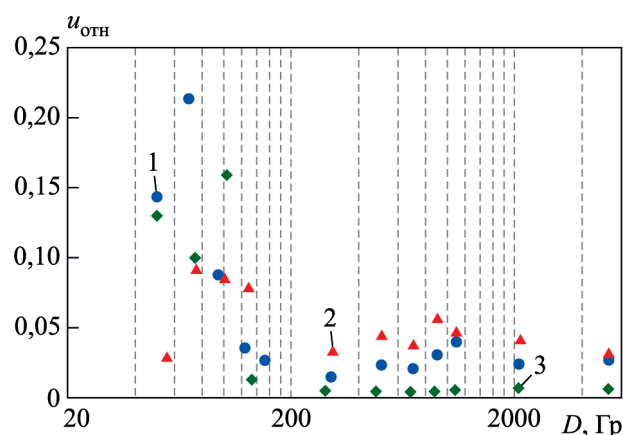


Рис. 5. Зависимость относительной стандартной неопределённости измерения $u_{\text{отн}} = u_c / \bar{A}$ оптической плотности от поглощённой дозы D для плёнок ПОР-2 с радиационно-чувствительными слоями толщиной 50 (1), 75 (2), 90 мкм (3)

Fig. 5. The dependence of the optical density relative standard measurement uncertainty $u_{\text{rel}} = u_c / \bar{A}$ on the absorbed dose D for POR-2 films with RS-layers thicknesses of 50 (1), 75 (2), 90 μm (3)

На рис. 3 представлены спектральные распределения оптической плотности плёнок ПОР-2 ($D = 0,03 \dots 5$ кГр) и ПОР-3 ($D = 0,2 \dots 10$ кГр), облучённых дозами примерно 900 и 800 Гр

соответственно. Спектры этих РЧК близки по форме, но значительно отличаются по чувствительности к поглощённой дозе. На рис. 4 показаны экспериментальные линейные зависимости $A_{\text{отн}}(D)$ для плёнок с разной толщиной РЧК-слоя.

Таким образом, увеличение толщины радиационно-чувствительного слоя расширяет нижнюю границу измеряемых значений D и открывает путь к решению задачи измерения поглощённых доз в области малых доз $D = 1 \dots 1000$ Гр плёночными дозиметрами.

Важным свойством РЧК является изменение со временем (постэффект) наведённой ионизирующим излучением оптической плотности после облучения. Это свойство РЧК требует тщательного исследования и будет рассмотрено в отдельной работе.

Анализ метрологических характеристик РЧК. Относительную оптическую плотность указанных выше образцов плёнок измеряли до и после облучения выбранной дозой (по 6 образцов). Примерно через 1 ч после облучения измеряли наведённую оптическую плотность каждого из выбранных образцов плёнок и оценивали относительную стандартную неопределённость u_A типа A согласно JCGM 100:2008 "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement":

$$u_A = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{(n-1)}}, \quad (2)$$

где A_i – относительная оптическая плотность i -го образца, вычисленная по формуле (1); $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$ – среднее арифметическое значение для $n=6$ независимых измерений.

На рис. 5 представлены результаты анализа относительной стандартной неопределённости u_A плёночных РЧК по экспериментальным зависимостям оптической плотности от поглощённой дозы (см. рис. 2–4). Из рис. 5 следует, что более стабильной относительной неопределённостью обладают радиационно-чувствительные слои большей толщины.

Практический интерес представляет функциональная зависимость (калибровочная кривая) поглощённой дозы РЧК от наведённой ионизирующим излучением оптической плотности. Зависимости поглощённой дозы от оптической плотности РЧК с высокой достоверностью ($R^2 \geq 0,999$) представляют собой линейные функции вида

$$D = BA_{\text{отн}} + C, \quad (3)$$

где B , C – константы, определяемые в процессе калибровки; $A_{\text{отн}}$ в данном случае представляет собой измеренное значение наведённой относительной оптической плотности плёночного дозиметра.

На рис. 6 приведены рассчитанные по формуле (3) дозиметрические градуировочные функции $D(A_{\text{отн}})$ для РЧК различной толщины. Расчётные формулы кривых 1–6 имеют вид соответственно:

$$D_1 = 8152A_{\text{отн}} + 225,92; R^2 = 0,9994;$$

$$D_2 = 6207,8A_{\text{отн}} + 246,47; R^2 = 0,9991;$$

$$D_3 = 3731A_{\text{отн}} - 57,741; R^2 = 0,9988;$$

$$D_4 = 4310,3A_{\text{отн}} + 269,95; R^2 = 0,9992;$$

$$D_5 = 2445,4A_{\text{отн}} - 55,736; R^2 = 0,9987;$$

$$D_6 = 2214,1A_{\text{отн}} - 64,355; R^2 = 0,9990.$$

Бюджет неопределённостей. Бюджет неопределённостей измерений относительной оптической плотности $A_{\text{отн}}$ может быть определен из анализа математической модели выражения (3).

Оптическая плотность среды при измерении спектрофотометром выражается логарифмической функцией

$$A = \log(I_0/I) A = \log_{10}(I_0/I), \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность падающего на РЧК оптического излучения; I – интенсивность света в спектрофотометре, прошедшего через слой РЧК.

В практических приложениях принято использовать простейшую формулу Бургера и определять интенсивность I пройденного через пленку света как

$$I = I_0 \cdot 10^{-\varepsilon nd},$$

где ε – показатель поглощения; n и d – соответственно плотность и толщина поглощающей среды [13].

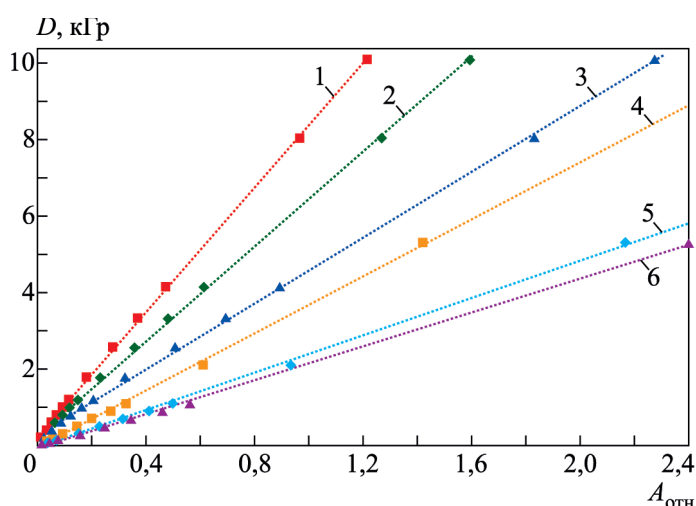


Рис. 6. Зависимость поглощенной дозы от наведенной оптической плотности плёнок ПОР-3 и ПОР-2 (градуировочные характеристики): 1–3 – ПОР-3, толщина РЧК-слоя 35, 50, 80 мкм; 4–6 – ПОР-2, толщина РЧК-слоя 50, 75, 90 мкм

Fig. 6. The radiation-sensitive films POR-3 and POR-2 absorbed dose D dependence on the induced optical density A_{rel} (calibration characteristics):

1–3 – POR-3 with the RS-layer thicknesses 35, 50, 80 μm ; 4–6 – POR-2 with the RS-layer thicknesses 50, 75, 90 μm

В рассматриваемом случае поглощающей средой является РЧК. В результате формула для оптической плотности РЧК принимает вид

$$A = \varepsilon nd. \quad (5)$$

Очевидно, что параметры ε , n , d зависят от температуры и влажности окружающей среды, мощности излучения,

Таблица 2

Бюджет неопределённостей измерения поглощенной дозы РЧК

Неопределённость		Обозначение стандартной неопределённости
Источник	Тип	
Калибровка поглощенной дозы и мощности дозы эталона ¹⁾	B	u_k
Облучательная установка ²⁾	B	$u_{\text{уст}}$
Вариации чувствительности спектрофотометра ³⁾	A	$u_{\text{ч. спф}}$
Воспроизводимость спектрофотометра ⁴⁾	A (B)	$u_{\text{кв. спф}}$
Однородность плёночных дозиметров одной партии	A	$u_{\text{пл}}$
Измерение оптической плотности при калибровке (градуировке)	A	$u_{\text{опк}}$
Неопределённость аппроксимации калибровочной функцией	A	$u_{\text{аппрокс}}$
Температура окружающей среды при облучении	B	$u_{t \text{ окр}}$
Влияние температуры облучения	A (B)	$u_{t \text{ обл}}$
Влияние влажности при облучении	A (B)	$u_{\text{влж}}$
Степень стабильности оптической плотности радиоохромных дозиметров	A (B)	$u_{\text{л эфф}}$
Комбинированная неопределённость (1σ) ⁵⁾ $u_c(D) = \sqrt{\sum (\partial D / \partial x_i)^2 u_A^2(x_i) + \sum u_B^2(x_j) / 3}$		
Расширенная неопределённость (2σ) $U = 2u_c$		

Примечания.

1) Из сертификата калибровки (аттестации) эталонного дозиметра.

2) Геометрическая неоднородность поля ионизирующего излучения, коррекция распада гамма-источников, неопределённость установки таймера, скорость конвейера.

3) Оценивается из ряда измерений оптической плотности плёнки при фиксированной неизменной позиции в держателе спектрофотометра.

4) Оценивается из показаний спектрофотометра после каждого съёма-установки облучённой плёнки в держатель спектрофотометра.

5) Индексы A, B в формуле для вычисления стандартной неопределённости u_c относятся только к табл. 2. Неопределённости типа B оцениваются в предположении нормального распределения.

характеристик спектрофотометра, РЧК и т. д. Коэффициенты B , C из выражения (3) определяются в процессе калибровки и характеризуют эталон и его свойства. Неопределённости параметров ε , n , d и коэффициентов B , C обуславливают весь спектр бюджета неопределённостей измерений поглощённой дозы РЧК. Бюджет неопределённостей измерения поглощённой дозы ионизирующего излучения представлен в табл. 2.

Заключение. В ходе исследования спектральных, дозиметрических характеристик и относительной стандартной неопределённости плёнок с РЧК трёх типов установлено, что их чувствительность к поглощённой дозе пропорциональна толщине слоя РЧК.

Плёнку с РЧК на основе сополимера с феназиновым красителем (ПОР-1) толщиной около 15 мкм можно применять для измерения поглощённой дозы в диапазоне 5–200 кГр путём измерения на спектрофотометре наведённой оптической плотности на нескольких длинах волн.

Слой РЧК на основе сополимера с красителем 4-диэтиламиноазобензол (плёнка ПОР-2) толщиной 50–90 мкм наиболее чувствителен к поглощённой дозе в диапазоне 0,03–5 кГр. Слой того же РЧК толщиной 30–80 мкм с добавкой гексахлорэтана C_2Cl_6 (плёнка ПОР-3) может обеспечить диапазон измерений поглощённой дозы (0,2–10) кГр.

Таким образом, на основе исследованных РЧК могут быть разработаны СИ поглощённой дозы для применения в радиационных технологиях с применением интенсивных источников фотонного и электронного излучений в диапазоне поглощённой дозы 0,03–200 кГр и выше.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность сотруднице ООО «Полигма» Мещеряковой Н. К. за изготовление образцов РЧК, а также сотрудников лаборатории технологической дозиметрии ФГУП «ВНИИФТРИ» за помощь при экспериментальных исследованиях, обработке результатов измерений и ценные замечания по существу при прочтении рукописи.

Список литературы

- McLaughlin W. L., Humphreys J. C., Hocken D., and Chappas W. J., *Radiat. Phys. Chem.*, 1988, vol. 31, pp. 505–514. [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(88\)90218-4](https://doi.org/10.1016/1359-0197(88)90218-4)
- Обеспечение единства измерений в радиационных технологиях / Под общей редакцией П. А. Красовского. Мendeleevo: Изд-во ВНИИФТРИ, 2007. 255 с.
- Алейкин В. В., Генералова В. В., Громов А. А., Гурский М. Н., Жанжора А. П., Емельяненко И. А., Коваленко О. И., Тенишев В. П. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 // Альманах современной метрологии. 2015. № 5. С. 54–74.
- Алейкин В. В., Генералова В. В., Громов А. А., Коваленко О. И. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных

технологий ГЭТ 209-2014 // Измерительная техника. 2019. № 7. С. 10–13.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-7-10-13>

5. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Под общ. ред. Г. В. Козьмина, С. А. Гераськина, Н. И. Санжаровой. Обнинск: издательство ВНИИАРЭ, 2005. 400 с.

6. Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы», Обнинск: издательство ВНИИАРЭ, 2018. 356 с.

7. Тенишев В. П., Емельяненко И. А. Радиационно-чувствительные плёночные композиции для измерения поглощённых доз в диапазоне 100–1000 Гр // Стандартные образцы. 2019. Т. 15. № 3. С. 33–40.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40>

8. Tenishev V. P., Emelyanenko I. A., *Reference Materials in Measurement and Technology*, 2019, vol. 15 (3), pp. 33–40. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40>

9. Devic S. et al., *Med. Phys.*, 2005, vol. 32, pp. 2245–2253. <https://doi.org/10.1118/1.1929253>

10. Devic S., *Physica Medica*, 2011, vol. 27, pp. 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2010.10.001>

11. Martins M. N., Silva T. F., *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 95, pp. 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.04.030>

12. Aldelaijan S., Devic S., *Physica Medica*, 2018, vol. 49, pp. 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.05.014>

13. Путилов К. А., Фабрикант В. А. Курс физики. В 3-х т. Т. 3. Оптика, атомная физика, ядерная физика. М.: ГИ ФМЛ, 1963, 634 с.

References

- McLaughlin W. L., Humphreys J. C., Hocken D., and Chappas W. J., *Radiat. Phys. Chem.*, 1988, vol. 31, pp. 505–514. [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(88\)90218-4](https://doi.org/10.1016/1359-0197(88)90218-4)
- Obespechenie edinstva izmerenij v radiacionnyh tekhnologiyah, ed. P. A. Krasovskii, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2007, 255 p. (in Russian).
- Aleykin V. V., Generalova V. V., Gromov A. A., Gursky M. N., Zhanzhora A. P., Emelianenko I. A., Kovalenko O. I., Tenishev V. P., *Al'manah sovremennoj metrologii*, 2015, no. 5, pp. 54–74 (in Russian).
- Aleykin V. V., Generalova V. V., Gromov A. A., Kovalenko O. I., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 7, pp. 587–591. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01664-4>
- Radiacionnye tekhnologii v sel'skom hozyajstve i pishchevoj promyshlennosti, ed. G. V. Kozmin, S. A. Geraskin, N. I. Sanzharova, Obninsk, RIRAE Publ., 2005, 400 p. (in Russian).
- Radiacionnye tekhnologii v sel'skom hozyajstve i pishchevoj promyshlennosti: sostoyanie i perspektivy, Collection of reports of the International scientific and practical conference “Radiation procesing technology for agicultcharal”, Obninsk, RIRAE Publ., 2018, 356 p. (in Russian).
- Tenishev V. P., Emelianenko I. A., *Reference Materials*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 33–40 (in Russian).

8. Tenishev V. P., Emelyanenko I. A., *Reference Materials in Measurement and Technology*, 2019, vol. 15 (3), pp. 33–40. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40>
9. Devic S. et al., *Med. Phys.*, 2005, vol. 32, pp. 2245–2253. <https://doi.org/10.1118/1.1929253>
10. Devic S., *Physica Medica*, 2011, vol. 27, pp. 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2010.10.001>
11. Martins M. N., Silva T. F., *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 95, pp. 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.04.030>
12. Aldelaijan S., Devic S., *Physica Medica*, 2018, vol. 49, pp. 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.05.014>
13. Putilov K. A., Fabrikant V. A., *Kurs fiziki in 3 vol., vol. 3: Optika, atomnaya fizika, yadernaya fizika*, Moscow, FIZMATLIT Publ., 1963, 634 p. (in Russian).

Дата поступления: 27.12.2019.

Дата принятия: 04.03.2020.

Spectral, dosimetric and metrological characteristics of radiation sensitive radiochromic compositions

Vladimir P. Tenishev

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: tenishev@vniiftri.ru

Spectral, dosimetric properties and metrological characteristics of different radiation sensitive compositions have been investigated for the radiation absorbed dose measurement instrumentation development purpose. It is shown possibility for absorbed dose measurements dynamical range expansion and uncertainty reduction for those compositions. These results can be used for routine dosimetric process control and metrological support in food stuff, agricultural commodities radiation processing technologies.

Key words: absorbed dose, ionizing radiation, radiation sensitive composition, radiation colored film, optical density.