

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ
И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕНСИВНОГО
ФОТОННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ
В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
ПЛЁНОЧНЫМИ ДОЗИМЕТРАМИ**

О.И. Коваленко, В.П. Тенишев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
tenishev@vniiftri.ru

Аннотация. Представлены плёночные радиохромные средства дозиметрии, разработанные во ФГУП «ВНИИФТРИ» для предприятий Российской Федерации и стран «КООМЕТ» для контроля поглощённой дозы (ПД). Особый интерес представляет их использование при контроле радиационной стерилизации медицинских изделий, обработке ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции, промышленной обработке кабельных и полимерных изделий с целью модификации их свойств, установлении радиационной стойкости упаковочных материалов и т.п. Для этих целей во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработаны протяжённые плёночные дозиметры. Здесь приведены их физико-технические, метрологические характеристики, обсуждаются преимущества протяжённых дозиметров по сравнению с одиночными дозиметрами при измерении и картировании поглощённой дозы высокоинтенсивного излучения.

Ключевые слова: радиохромная плёнка, протяжённый дозиметр, ионизирующее излучение, поглощённая доза (ПД), оптическая плотность, измерительный клин энергии электронов, равномерность конвейерной системы, ширина развёртки пучка ускоренных электронов, коэффициент неравномерности ПД в продукции.

**ABSORBED DOSE MONITORING RADIOCHROMIC FILM
SYSTEMS FOR INTENSE PHOTON AND ELECTRON
RADIATION PROCESSING TECHNOLOGIES**

O.I. Kovalenko, V.P. Tennishev

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
tenishev@vniiftri.ru

Abstract. The radiochromic film dosimetry devices developed at FSUE "VNIIFTRI" and used at enterprises of the Russian Federation and COOMET countries for absorbed dose (AD) control are considered. The physical-technical and metrological characteristics of extended film dosimeters are described. The advantages of extended film dosimeters in comparison with single film dosimeters in measurement of high-intensity radiation absorbed dose are discussed.

Keywords: radiochromic film, extended dosimeter, ionizing radiation, absorbed dose, optical density, electron energy measuring wedge, uniformity of the conveyor system, scanning width of the accelerated electron beam.

Введение

Постоянная потребность в более точных и эффективных методах дозиметрии в радиационных технологиях обуславливает необходимость разработки новых средств контроля ПД [1–6], сочетающих высокое пространственное разрешение и высокую точность измерения поглощённой дозы.

Источники излучения в радиационных технологиях формируют дозные поля со сложным пространственным градиентом в зависимости от материала и распределения плотности в облучаемом объекте и поэтому требуют точного контроля всего распределения дозы в объёме облучаемого объекта (картирования дозы) в соответствии с руководящими документами (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»).

Плёночные дозиметрические системы на основе изменения их цветовых характеристик в поле излучения стали важным инструментом для анализа сложных распределений дозы в облучаемых объектах. Возможности измерительного инструмента должны допускать не только точечные измерения, но и объёмные измерения и могут выступить в качестве эталонного детектора двумерного или трёхмерного распределения ПД. Требуются методики измерения, которые обеспечивают улучшения как точности, так и расширения динамического диапазона измеряемых значений поглощённой дозы посредством радиохромных плёночных средств измерения ПД.

Радиохромная плёнка и является дозиметром в таких приложениях, где требуются высокое пространственное разрешение с минимальным возмущением экспозиционной дозы и флюенса (пространственных параметров) облучающего излучения. Неопределённость измерений в дозиметрии с радиохромными плёнками считается значительной по сравнению с ионизационными камерами, следовательно, требуется строгий метод оценки неопределённостей измерений плёночными средствами.

Материалы и методы

Образцы плёночных дозиметров, методики калибровки и измерений

Точная и воспроизводимая плёночная дозиметрия — цель каждого пользователя и обеспечивается принятием и соблюдением чётко определённого набора методик по калибровке и условий использования плёночных средств измерения. В радиационных технологиях для измерения поглощённой дозы в продукции применяются плёночные дозиметрические системы, включающие собственно дозиметр, измерительный прибор, связанные с ними эталоны

и методики использования системы. В Руководстве «ISO / ASTM Guide 51261» представлены сведения по выбору дозиметрических систем для разных дозиметрических приложений, также по их использованию, обращению, хранению, особым мерах предосторожности. Протяжённые ленточные дозиметры представляют одну из таких дозиметрических систем. Перед использованием дозиметрическая система должна быть откалибрована.

Разработанные во «ВНИИФТРИ» стандартные образцы ПД (СО ПД) (табл. 1) изготавливаются из рулонной окрашенной радиационно-чувствительной (ПОР) плёнки шириной ~300 см. Сначала нарезаются протяжённые, длинные заготовки плёнок длиной 0,25–2 м, шириной 10–12 мм, а затем длинные заготовки разрезаются на куски размером 35 × (10–12) мм. Калибровка полученных типов плёночных заготовок проводится на комплектах из 4–6 образцов размером 35 × (10–12) мм для каждого значения калибровочной дозы согласно ISO/ASTM 51261-2013 «Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing». Калибровочное облучение экспериментальных радиационно-чувствительных плёночных образцов проводится на установках МРХ-γ-100 (излучение радионуклидов — ^{60}Co , энергия — 1,25 МэВ, мощность дозы в процессе калибровки — ~2,3 Гр/с) и ЛМБ-γ-1М (излучение радионуклидов — ^{137}Cs , энергия — 0,66 МэВ, мощность дозы — ~0,5 Гр/с). Эти установки входят в состав Государственного эталона мощности поглощённой дозы высокоинтенсивного излучения ГЭТ 209-2014 [6, 7]. Эталон обеспечивает воспроизведение единицы МПД с относительным средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $0,2 \cdot 10^{-2}$.

Калибровочные значения поглощённой дозы D получают путём накопления дозы по времени облучения в аттестованном объёме эталонных установок. Измерения оптической плотности плёночных средств проводятся на спектрофотометрах и денситометрах (см. табл. 1).

Внешний вид дозиметров поглощённой дозы в упаковках выпуска в обращение приведены на рис. 1 (стандартные образцы утверждённого типа размером 35 × (10–12) мм) и рис. 2 (протяжённые (ленточные), упакованные в рулоны ленточные дозиметры на базе стандартных образцов поглощённой дозы).

Таблица 1

Название стандартного образца ПД	Номер по реестру	Тип радиационно-чувствительной композиции	Средство измерения оптической плотности СО ПД	Длина волны измерения ОП, λ, нм	Вид ИИ	Диапазон ПД, кГр	Неопределённость калибровки и измерения, %
СО ПД(Ф)Э-5/50	ГСО 7904-2001	Сополимер с феназиновым красителем	Спектрофотометры:	512	γ, β, ε	5–150	3 (7)

Продолжение таблицы 1

Название стандартного образца ПД	Номер по реестру	Тип радиационно-чувствительной композиции	Средство измерения оптической плотности СО ПД	Длина волны измерения ОП, λ , нм	Вид ИИ	Диапазон ПД, кГр	Неопределённость калибровки и (измерения), %
СО ПД(Ф)Р-5/50	ГСО 7865-2000	Сополимер с феназиновым красителем	Specord 210Plus;	512	γ , β , e	5–50	7 (12)
СО ПД(Ф)Р-30/200	ГСО 7903-2001	Сополимер с феназиновым красителем	Specord M40; ПЭ-5400ВИ;	580, 525	γ , β , e	30–200	7 (15)
СО ПД(Э)-1/10	ГСО 8916-2007	Сополимер с 4-диэтиламиноазобензоловым красителем	СФ-46; СФ-56 и другие.	550	γ , β , e	1–10	7 (15)
СО ПД (ДТС) 0,05/10	ГСО 9447-2009	Силикатное стекло с добавкой никеля	Денситометры типа ДП-1М	360, 745	γ	0,05–0,5; 1–10	5 (7) 7 (15)



Рис. 1. Внешний вид и способы упаковки серийно выпускаемых стандартных образцов поглощённой дозы (СО ПД) утверждённого типа и обозначения



Рис. 2. Внешний вид упакованных протяжённых плёночных дозиметров, изготовленных из заготовок для СО ПД

Методики измерений поглощённой дозы стандартными образцами ПД на основе радиохромных плёнок описаны в технических описаниях (номера реестров СО ПД указаны в таблице 1) соответствующего СО ПД утверждённого типа.

Результаты

Применение стандартных образцов поглощённой дозы и протяжённых плёночных дозиметров

В соответствии с ГОСТ 34157-2017 «Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением», прежде чем проводить радиационную обработку продукции, необходимо провести оценку технологических параметров, характеризующих компоненты оборудования РТУ для облучения. К таким технологическим параметрам относятся:

- энергия электронного пучка, ток электронного пучка, частота импульсов, длительность импульсов, поперечное сечение пучка;
- ширина (развёртки) и частота сканирования электронного пучка;
- скорость транспортировки (конвейера) продукта;
- размер технологической загрузки и геометрия облучения (одно- или двустороннее облучение).

Перечисленные технологические параметры могут быть измерены протяжёнными дозиметрами.

Измерение энергии ускоренных электронов

Измерение энергии ускоренных электронов, используемых для радиационной обработки различных медицинских изделий, пищевой и сельскохозяйственной продукции и т.п., проводится при аттестации радиационно-технологических установок. Такая аттестация признаёт правомочность РТУ для радиационной обработки того или иного вида продукции по требованиям нормативного документа РМГ 135-2016 (ГСИ. Установки радиационно-технологические с ускорителями электронов для стерилизации медицинских изделий. Методика аттестации (М.: Стандартинформ, 2016) [8].

Среднюю $E_{\text{ср}}$ и наиболее вероятную $E_{\text{в}}$ энергию ускоренных электронов в зоне облучения рассчитывают по эмпирическим зависимостям энергии из измеренных значений пробега электронов в материале измерительного клина из алюминия или графита (ISO/ASTM 51649: Standard Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies Between 300 keV and 25 MeV) [9]. Способ получения средних значений R_{50} (глубина, при которой поглощённая доза в объёме измерительного клина снижается до 50 % от максимального значения ПД) измерительном клине и R_p (значение пересечения экстраполированной прямой линии, касательной к нисходящей кривой ПД, с осью глубины в материале клина) приведены на рис. 4, типичное распределение электронного поглощения по глубине однородного материала. В таблице 2 представлены результаты измерения энергии электронов ускорителей радиационно технологических установок предприятий, допущенных к радиационной обработке различных типов продукции, удовлетворяющих требованиям соответствующих ГОСТов.

Таблица 2

Результаты измерения и расчёта энергий электронов
по измеренным значениям R_p , R_{50} и R_{ex}

Ускоритель, РТУ	Материал измерительного клина	R_p , см	R_{50} , см	R_{ex} , см	$E_{\text{в}}$, МэВ	$E_{\text{ср}}$, МэВ	$E_{\text{макс}}$, МэВ
АО «НПП «Торий», г. Москва	Алюминий, Al	1,58	1,16	1,67	$8,2 \pm 0,4$	$7,2 \pm 0,4$	$8,4 \pm 0,4$
ИФХЭ РАН, г. Москва	Алюминий, Al	1,5	1,11	1,34	$7,8 \pm 0,3$	$6,9 \pm 0,3$	$8,1 \pm 0,3$
ИЯФ, г. Новосибирск	Алюминий, Al	0,88	0,63	1,05	$4,7 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,4$
ООО «Радиопласт», г. Москва	Алюминий, Al	1,56	1,21	1,82	$8,1 \pm 0,3$	$7,5 \pm 0,3$	$8,1 \pm 0,3$
ООО «АКЦЕНТР», г. Родники	Алюминий, Al	1,75	1,35	2,08	$9,1 \pm 0,3$	$8,4 \pm 0,3$	$9,5 \pm 0,2$
ООО «АКЦЕНТР Северо-Запад», г. СПб.	Алюминий, Al	1,88	1,46	2,1	$9,8 \pm 0,3$	$9,1 \pm 0,2$	$9,8 \pm 0,2$

Продолжение таблицы 2

Ускоритель, РТУ	Материал измерительного клина	R_p , см	R_{50} , см	R_{ex} , см	E_v , МэВ	E_{cp} , МэВ	E_{max} , МэВ
ООО «СПЭЛС» г. Москва	Алюминий, Al	0,33	0,25	0,4	$1,9 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,5$
ООО «СФМ Фарм», р.п. Кольцово	Алюминий, Al	1,42	1,09	1,65	$7,4 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,3$	$7,5 \pm 0,2$
ООО «Теклеор», Калужская обл.	Алюминий, Al	1,83	1,39	2,03	$9,5 \pm 0,3$	$8,6 \pm 0,3$	$9,8 \pm 0,3$
ООО «РАД», г. СПб	Алюминий, Al	1,6	1,2	1,7	$8,3 \pm 0,3$	$7,4 \pm 0,3$	$8,3 \pm 0,3$
	Графит, C	2,7	2,2	2,9	$8,3 \pm 0,3$	$7,6 \pm 0,3$	$8,3 \pm 0,3$
АО Стерион, г. Лыткарино	Графит, C	3,23	2,65	3,55	$9,9 \pm 0,3$	$9,2 \pm 0,3$	$9,8 \pm 0,2$
ФГАОУ ВО «УРФУ» г. Екатеринбург	Графит, C	2,76	2,26	3	$8,5 \pm 0,3$	$7,8 \pm 0,3$	$8,6 \pm 0,3$
ОАО «СИНТЕЗ», г. Курган	Графит, C	2,35	1,91	2,56	$7,2 \pm 0,4$	$6,6 \pm 0,4$	$7,3 \pm 0,4$
Формулы расчёта энергий электронов [9]	$E_{cp}(Al) = 6,2 \cdot R_{50}(Al)$, $E_v(Al) = 0,2 + 5,09 \cdot R_p(Al)$ $E_{cp}(C) = 3,47 \cdot R_{50}(C)$, $E_v(C) = 0,22 + 2,97 \cdot R_p(C) + 0,0056 \cdot R_p^2(C)$						

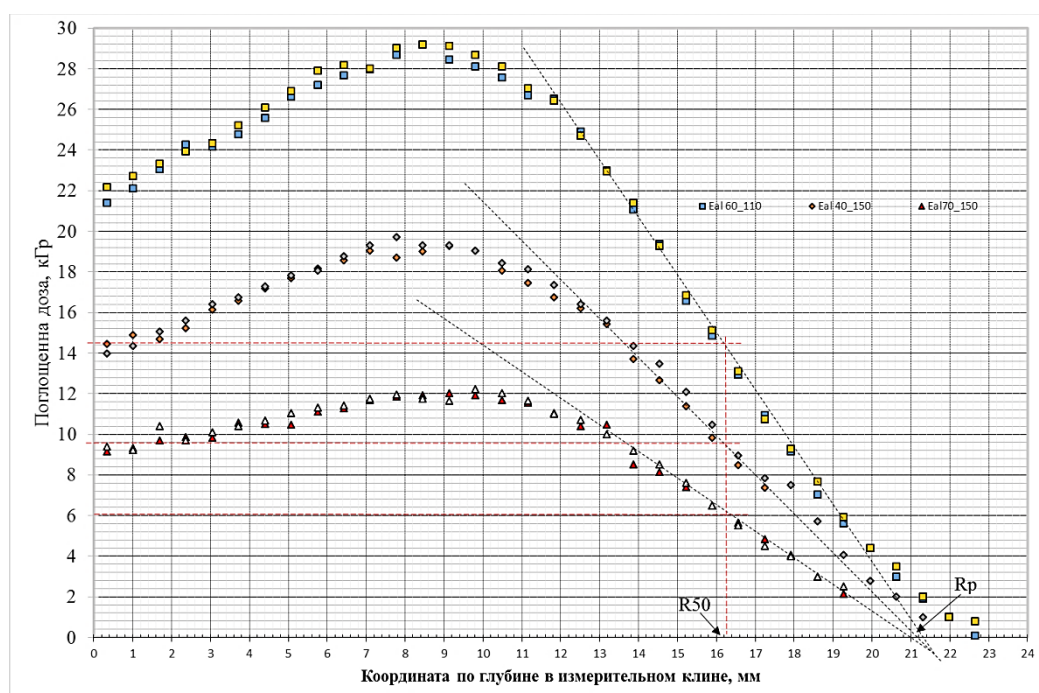


Рис. 4. Пример распределения поглощенной дозы по глубине измерительного клина для определения энергии ускоренных электронов. Режимы работы РТУ при измерениях:

$E_0 = 9,7$ МэВ; ток пучка электронов — 980 мкА; скорости конвейера — 70, 110 и 150 см/мин; частота импульсов в пучке электронов — 250 Гц; частота развёртки пучка электронов — 3 Гц; ширина развёртки — 40, 60, 70 см (по показаниям мониторов РТУ)

Измерение стабильности, равномерности облучения и развёртки электронного луча по ширине

Определение стабильности, равномерности скорости движения конвейера с продукцией в зоне облучения, а также ширину развёртки электронного луча выполняют измерением поглощённой дозы D длинными плёночными дозиметрами на поверхности однородного материала. Плёночные дозиметры достаточной длины помещают параллельно развёртки луча и движению конвейера, перпендикулярно пучку электронов на поверхности облучаемого объекта. Проводят облучение — ширину пучка, ток пучка и скорость конвейера выбирают так, чтобы значения ПД находились в рабочем диапазоне дозиметров. Измерение ПД пространственным разрешением от 5 мм и выше протяжёнными детекторами на поверхности однородного материала даёт подробную и наглядную информацию о характере и величине возможных колебаний скорости транспортной системы (рис. 5).

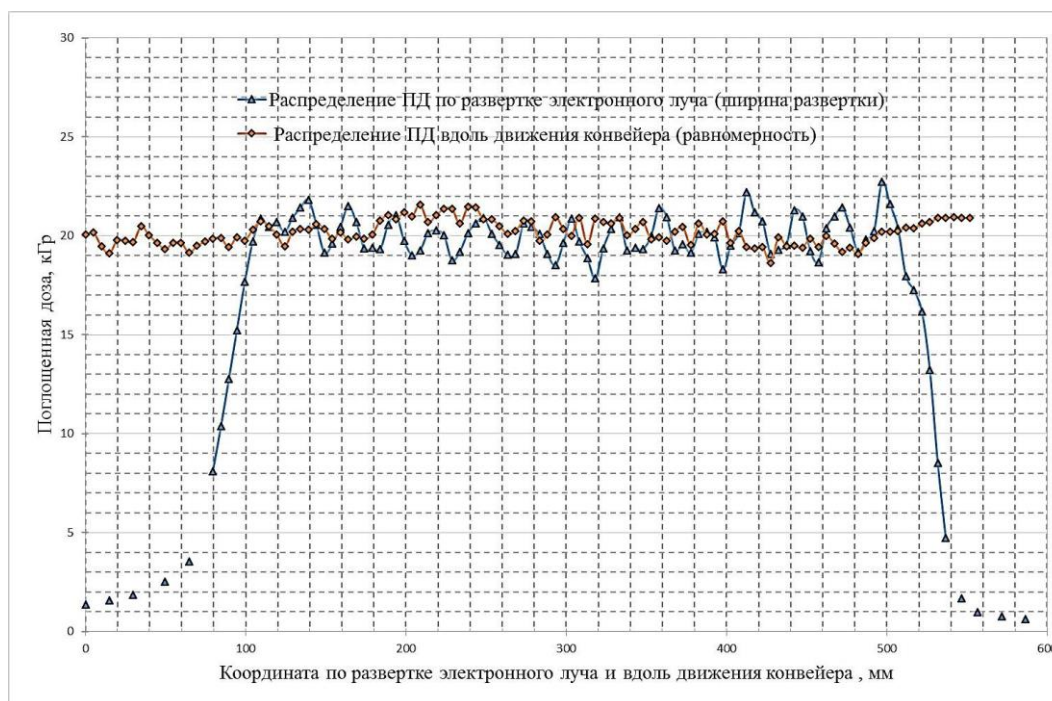


Рис. 5. Измерение ширины развёртки электронного луча и равномерности облучения вдоль движения конвейера при энергии электронов $E_{\text{ср}} = 8$ МэВ. Режим работы РТУ с ускорителем УЭЛР-10-10С2 при аттестации: ток в пучке по показаниям монитора $I_{\text{мон}} = 890$ мкА; $V_{\text{к}} = 1$ м/мин; ширина развёртки $H_{\text{разв}} = (400 \pm 10)$ мм

Картирование распределения поглощённой дозы по объёму облучаемой продукции

Картирование поглощённой дозы (absorbed-dose mapping): измерение поглощённой дозы внутри облучаемой продукции во всём объёме для получения трёхмерного распределения ПД (рис. 6) — карты значений ПД в целях определения минимального и максимального предельных значений поглощённой дозы при радиационной обработке.



Рис. 6. Примеры размещения протяжённых дозиметров при картировании поглощённой дозы в облучаемой ионизирующим излучением продукции

Картирование ПД требуется для того, чтобы данный продукт получил заранее определённую поглощённую дозу ионизирующего излучения в строго определённом диапазоне, указанную в нормативном документе — Инструкции по радиационной обработке данного продукта. Эта процедура регулируется стандартами ГОСТ 11137, ГОСТ 34156-2017 и другими руководствами по дозиметрии при радиационной обработке. Дозиметры, используемые для построения карты дозы, должны быть способны реагировать на дозы и градиенты дозы, которые, вероятно, могут возникнуть в облучаемых продуктах. При электронном облучении для получения этой информации полезны дозиметрические плёнки в виде листов или длинных, протяжённых полос.

Процесс картирования доз и контроль качества процесса облучения заключаются в следующем: наборы из нескольких комплектов рабочих дозиметров или протяжённых рабочих дозиметров достаточной длины размещают внутри и на поверхности коробок, транспортируемых в зону облучения, с целью определения максимального и минимального значений ПД (пример расположения дозиметров показан на рис. 3). Коробки с продукцией и дозиметрами облучаются в соответствии с ГОСТ 11137 и ГОСТ Р ИСО/АСТМ 51431-2012 (Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов

электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением). Распределение поглощённой дозы в транспортной упаковке существенно зависит от характеристик облучающего излучения. На карту ПД в продукции влияет энергия электронного пучка, ток электронного пучка, частота импульсов, длительность импульсов, поперечное сечение пучка, скорость конвейера, размер технологической загрузки, распределение плотности продукта, включая ориентацию продукта и облучения (например, одно- или двустороннее облучение, использование нескольких проходов, наличие отражателей и т.п.). На рис. 7 приведено распределение дозы в однотипном материале (пробирке) при одностороннем и двустороннем облучении ускоренными электронами, а также гамма излучением ^{60}Co .

Как следует из данных рис. 7, коэффициенты равномерности дозы $K = D_{\text{max}}/D_{\text{min}}$ для трёх типов геометрии облучения существенно различаются, что приводит к определённым требованиям к способу загрузки, геометрии облучения и скорости конвейерной системы радиационно-технологической установки.

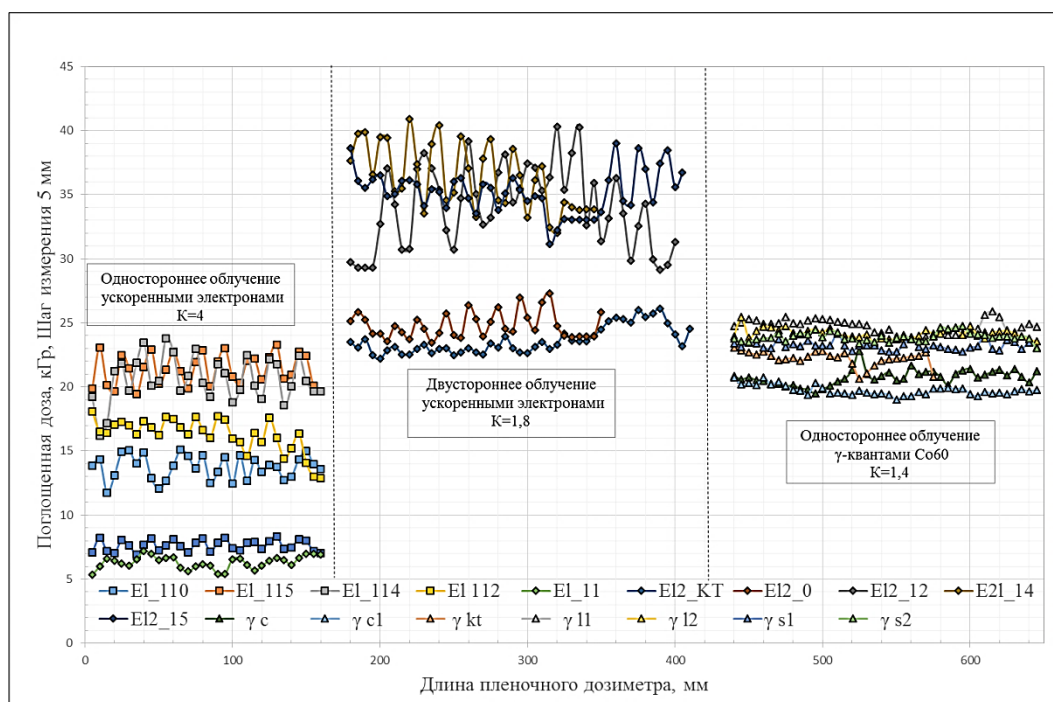


Рис. 7. Распределение поглощённой дозы и коэффициенты неравномерности K в однотипной продукции (пробирке размером 75×100 мм) при разных геометриях облучения ускоренными электронами (РТУ ООО «Акцентр») и фотонным γ -излучением радионуклидов ^{60}Co (РТУ АО «Татхимфармпрепараты»)

Выводы и заключение

Дозиметр из протяжённой плёнки, измерительные свойства которой приведены выше, представляет собой дозиметрическую систему, позволяющую проведение измерений таких важных в радиационных технологиях параметров, как энергия ускоренных электронов, равномерность движения конвейерной системы, ширина развёртки электронного пучка, включая подробное картирование поглощённой дозы в облучаемой продукции с высоким пространственным разрешением.

Измерения протяжёнными дозиметрами, аналогично СО ПД утверждённого типа, прослеживаемы к Государственному эталону ГЭТ 209-2014, и в соответствии с руководством ISO 15556:1998(E) «Guide for selection and calibration of dosimetry systems for radiation processing», протяжённые дозиметры следует отнести к рабочим рутинным дозиметрам.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории технологической дозиметрии ФГУП «ВНИИФТРИ» за помощь при проведении измерений, за ценные замечания по существу при прочтении рукописи.

Список литературы

1. Codex General Standard for Irradiated Foods (CODEX STAN 106-1983, Rev.-2003) and Recommended International Code of Practice for the Radiation Processing of Food (CAC/RCP 19-1979, Rev.-2003) — Codex Alimentarius, Food and Agriculture Organization and World Health Organization. — Rome, 2003.
2. Генералова В.В. и др. Обеспечение единства измерений в радиационных технологиях / Под общ. ред. Красовского П.А. — Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007. — 255 с.
3. Tenishev V.P., Emelyanenko I.A. Radiation-sensitive film compositions for measuring absorbed doses within the 100–1000 Gy range // Reference Materials in Measurement and Technology. — 2019. — 15 (3). — P. 131–139. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32534-3_13.
4. Leskov A.S., Kuvykina M.B., Tenishev V.P. Dosimetric system on the basis of EPR-spectroscopy with use state primary standards of power of the absorbed dose and Standard of number of the paramagnetic centers // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — 1420. — 012014.
5. Донченко С.И., Коваленко О.И., Тенишев В.П. Метрологическое сопровождение научных разработок и промышленных технологий с применением интенсивных источников ионизирующих излучений / 1-я Международная конференция «Ядерные и радиационные технологии в медицине, промышленности и сельском хозяйстве»: тезисы докладов. — Алматы: РГП ИЯФ, 2019. — 241 с.

6. Tenishev V.P. Spectral, Dosimetric and Metrological Characteristics of Radiation Sensitive Radiochromic Compositions // Measurement Techniques. — 2020. — V. 63. — No. 8.
7. 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.
8. 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.
9. РМГ 135–2016. «ГСИ. Установки радиационно-технологические с ускорителями электронов для стерилизации медицинских изделий. Методика аттестации». — М.: Стандартинформ, 2016.
10. ISO/ASTM 51649: Standard Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies Between 300 keV and 25 MeV. — 2015.

Статья поступила в редакцию: 04.04.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 21.03.2022 г.

Статья принята в работу: 04.04.2022 г.