

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Обзорная статья

УДК 006.91:664:539.1:621.039.83

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-63-71>



Стандартные образцы поглощенной дозы: расширение динамического диапазона и улучшение точности измерений

В. П. Тенишев ✉

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»,
рабочий поселок Менделеево, Московская область, Россия
✉ tenishev@vniiftri.ru

Аннотация: Установление и контроль метрологических характеристик измерений поглощенных доз ионизирующих излучений в диапазоне 0,01 и 200 кГр стандартными образцами – актуальная задача в силу их широкого применения в различных отраслях промышленности. Наиболее удобным средством метрологического обеспечения при проведении передачи единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений в радиационных технологиях к средствам измерений являются стандартные образцы с установленной метрологической прослеживаемостью до международной системы единиц SI.

В настоящем исследовании рассмотрен и апробирован способ расширения динамического диапазона измерения поглощенной дозы высокоинтенсивного ионизирующего излучения радиоохромными пленочными дозиметрическими системами. Проведена оценка точности (неопределенности) измерений дозы в зависимости от начальной оптической плотности радиационно-чувствительного слоя радиоохромной композиции. Показана возможность расширения дозных и улучшения метрологических характеристик существующих стандартных образцов поглощенной дозы (по воде) для применения в качестве вторичных эталонов (*Мер*) поглощенной дозы ионизирующего излучения, воспроизводящих и (или) хранящих одну или несколько точек выбранной шкалы измерений поглощенной дозы с повышенной точностью (неопределенностью) измеряемых значений поглощенной дозы (по воде) в расширенном динамическом диапазоне.

Ключевые слова: радиоохромная пленка, радиационно-чувствительная композиция, оптическая плотность, спектрофотометр, стандартный образец, поглощенная доза, многослойная комбинация стандартных образцов поглощенной дозы

Принятые сокращения: НОП – наведенная оптическая плотность; ОП – оптическая плотность; ПД – поглощенные дозы; ПОР – пленки окрашенные радиоохромные; РЧК – радиационно-чувствительная композиция; РЧС – радиационно-чувствительный слой; СКО – среднеквадратическое отклонение; СО – стандартный образец.

Ссылка при цитировании: Тенишев В. П. Стандартные образцы поглощенной дозы: расширение динамического диапазона и улучшение точности измерений // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 4. С. 63–71. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-63-71>

Статья поступила в редакцию 29.12.2022; одобрена после рецензирования 02.02.2023; принята к публикации 25.05.2023.

REFERENCE MATERIALS

Research Article

Reference Materials of Absorbed Dose: Expanding Dynamic Range and Improving Measurement Accuracy

Vladimir P. Tenishev ✉

All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements (VNIIFTRI),
Moscow region, Mendeleevo, Russia
✉ tenishev@vniiftri.ru

Abstract: Establishment and control of metrological characteristics of measurements of absorbed ionizing radiation doses in the range of 0.01 and 200 kGy by reference materials is an urgent task due to their wide application in various industries. The most convenient means of metrological support for transferring a unit of absorbed dose rate of intense photon, electron, and beta radiation to measuring instruments in radiation technologies are reference materials with established metrological traceability to the International System of Units (SI). In the present study, a method for expanding the dynamic range of measuring the absorbed dose of high-intensity ionizing radiation by radiochromic film dosimetry systems was considered and tested. The accuracy (uncertainty) of dose measurements was estimated depending on the initial optical density of the radiation-sensitive layer of the radiochromic composition. The possibility of expanding the dose characteristics and improving the metrological characteristics of the existing reference materials of absorbed dose (in water) for use as secondary standards (Measures) of the absorbed dose of ionizing radiation reproducing and (or) storing one or more points of the selected measurement scale of the absorbed dose with increased accuracy (uncertainty) of the measured values of the absorbed dose (in water) in an extended dynamic range was shown.

Keywords: radiochromic film, radiation-sensitive composition, optical density, spectrophotometer, reference material, absorbed dose, multilayer combination of absorbed dose reference materials

Abbreviations used in the article: IOD – induced optical density; OD – optical density; AD – absorbed dose; RDF – radiochromic dye film; RSC – radiation-sensitive composition; RSL – radiation-sensitive layer; SD – standard deviation; RM – reference material.

For citation: Tenishev V. P. Reference materials of absorbed dose: expanding dynamic range and improving measurement accuracy. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(4):63–71. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-63-71>

The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 02.02.2023; accepted for publication 25.05.2023.

Введение

От достоверной оценки измерений поглощенных доз (по воде) ионизирующих излучений в стандартных материалах в диапазоне 0,01 и 200 кГр в различных радиационно-технологических процессах зависит качество производимой продукции, ее безопасность, эффективность работы радиационно-технологической установки и технико-экономические показатели всего радиационного процесса в целом [1]. В Российской

Федерации, включая страны Таможенного Союза, прослеживаемость единства измерений ПД в радиационных технологиях осуществляется на базе ГЭТ 209-2014 [2]. Согласно государственной поверочной схеме, передача единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений в радиационных технологиях к средствам измерений должна осуществляться вторичными эталонами (*компараторами*), либо рабочими эталонами с указанием диапазона,

точности (неопределенности) измерений, включая основные методы поверки (калибровки). В качестве рабочих эталонов и средств измерений дозы утверждены стандартные образцы ПД на основе пленки окрашенной радиохромной (ПОР) со слоем радиационно-чувствительной композиции (РЧК) [3–7]. Важная характеристика пленочных радиохромных стандартных образцов (СО) – отсутствие температурной зависимости и нечувствительность к окружающему освещению при обработке и измерениях.

Согласно сведениям из ФИФ ОЕИ по состоянию на май 2022 г., к настоящему времени вторичный эталон поглощенной дозы не зарегистрирован. Таким образом, цель данного исследования – проанализировать возможность расширения дозных и улучшения метрологических характеристик существующих стандартных образцов ПД для применения СО в качестве вторичных эталонов (компараторов) ПД ионизирующего излучения, воспроизводящих и (или) хранящих одну или несколько точек выбранной шкалы измерений ПД с повышенной точностью (неопределенностью) измеряемых значений поглощенной дозы в расширенном динамическом диапазоне.

Теоретическое обоснование

Рассматриваемая в данной работе методика создания таких *компараторов* на базе стандартных образцов поглощенной дозы утвержденного типа СО ПД(Ф)-1/10 для диапазона (1–10) кГр заключается в следующем.

Как правило, партия пленок из одного выпуска, подготовленного по ТУ в соответствии с паспортом стандартных образцов утвержденного типа, содержит образцы с оптической плотностью A в диапазоне

$$A_{0i} - 0,01 \leq A_i \leq A_{0i} + 0,01, \quad (1)$$

где A_{0i} – средние значения оптической плотности (ОП) (от 0,15 до 0,2) i -ой партии пленки-сырца.

Далее из различных партий отбираются отдельные подпартии (комплекты) по значению начальной оптической плотности A_k , удовлетворяющие условию

$$A_{k0} - 0,001 \leq A_k \leq A_{k0} + 0,001, \quad (2)$$

где A_k – средняя оптическая плотность отдельной k -ой подпартии (k -го комплекта).

Таким образом комплектуется каждая новая k -ая подпартия со значениями начальной ОП в диапазоне, определяемом формулой (2). Другими словами, таким способом мы получим подпартии пленок-заготовок со значениями начальных ОП в десять раз уже чем в исходной партии.

Нетрудно оценить, что по этой методике будут отобраны подпартии образцов пленки, которые имеют стандартную неопределенность u по начальной ОП, существенно лучшей по сравнению со стандартной неопределенностью комплекта образцов на базе исходной партии пленки (не отобранной по ОП). Предложенная методика приведет к созданию нового поколения высокоточных пленочных стандартных образцов ПД, значительно превышающих существующие стандартные образцы утвержденного типа как по динамическому диапазону, так и по точностным характеристикам. Кроме того, такие СО могут быть использованы в качестве *Мер* воспроизведения и (или) хранения одного выбранного значения шкалы поглощенной дозы и в качестве комплекта *Мер*, воспроизводящих и (или) хранящих две или более точек шкалы, например, при калибровке СО во всем выбранном диапазоне ПД.

Материалы и методы

Подготовка пленочных образцов-заготовок

Основная идея предлагаемого метода расширения динамического диапазона и улучшения точности измерений пленочных дозиметров заключается в отборе из комплекта заготовок для СО пленок с известными значениями ОП в существенно узком диапазоне ОП, чем весьма широкий спектр значений ОП исходных партий пленки-сырца. Основная цель – минимизация источника неопределенности измерений по начальной оптической плотности. Хотя этот процесс значительно увеличивает время и усилия для каждого конкретного случая, но в тоже время позволяет достичь желаемой цели.

СО поглощенной дозы СО ПД(Э)-1/10 изготавливаются из полимерного пленочного материала однократного использования «Пленка окрашенная радиационно-чувствительная типа ПОР», выпущенного по ТУ [5] с радиационно-чувствительным слоем (РЧС) (сополимер с 4-диэтиламиноазобензольным красителем) толщиной ~ 28 мкм, нанесенным на носитель из полиэтилентерефталата толщиной ~ 100 мкм (рис. 1).

Далее радиохромные пленки ПОР нарезают на прямоугольные фрагменты размером (10–12) × (30–35) мм² и герметично (запаивают термически) комплектуют по 3–6 штук в контейнер из бумаги толщиной ~ 50 мкм (рис. 2), ламинированной полиэтиленом ПЭВД марки 15803-020 или 10803-020. Эта бумага выбрана из-за слабой ее восприимчивости к ионизирующему излучению.

28–30 мкм Радиационно-чувствительный слой (сополимер с 4-диэтиламиноазобензоловым красителем)

98–100 мкм Подложка (полиэтилентерефталат)

Рис. 1. Конструкция пленок-заготовок стандартных образцов поглощенной дозы

Fig. 1. The design of films-blanks of reference materials of absorbed dose

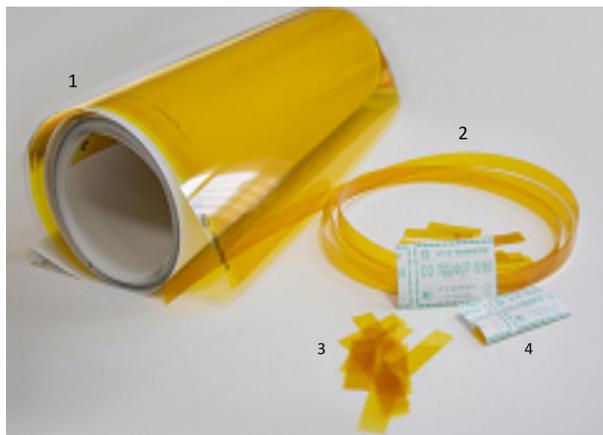


Рис. 2. Изготовление партии заготовок стандартных образцов поглощенной дозы: 1 – рулон пленки-сырца; 2 – вырезанные длинные (до 2 м) полоски шириной ~ (10–12) мм; 3 – заготовки стандартного образца длиной (30–35) мм; 4 – герметично упакованная в бумажные контейнеры партия стандартного образца, по 3–5 шт. в партии

Fig. 2. Manufacture of a batch of blanks of reference materials of absorbed dose: 1 is a raw film roll; 2 is cut long (up to 2 m) strips ~ (10–12) mm wide; 3 is blanks of a reference material with a length of (30–35) mm; 4 is a batch of a reference material sealed in paper containers, 3–5 pieces per batch

Отбор пленок по значению начальной оптической плотности

Первым шагом определяли распределение реального диапазона ОП длинных пленок либо набора необлученных образцов-заготовок измерением ОП на спектрофотометре Specord-210 Plus, фирмы Analytik Jena AG, Германия (рис. 3). Измерения оптической плотности CO ПД проводили на длинных полосках (см. рис. 2, позиция 2) шириной 10–12 мм, отобранных случайным образом из партии.

Как видно из рисунка, для данной партии пленки начальная ОП распределена в пределах от 0,150 до 0,164 по площади рулона-сырца. Этому рисунку соответствует приведенная на рис. 4 функция распределения числа образцов-заготовок пленки в зависимости от оптической плотности.

Таким образом, ОП (соответственно плотность и толщина РЧС) по площади рулона пленки-сырца для

изготовления CO весьма неоднородна, что приводит к большой неточности (неопределенности) значения оптической плотности и, соответственно, большой неточности при измерениях ПД после облучения пленок в поле ионизирующего излучения.

Как видно из результатов измерений начальной ОП пленок (рис. 4), максимальное количество пленки имеет место для ОП ~ 0,156, с неравномерным убыванием числа пленок при удалении от среднего значения ОП всей партии.

Из полученных образцов были собраны комплекты по 5 пленок с близкими значениями ОП в пределах значений ОП

$$A_k - 0,001 \leq A_{ko} \leq A_k + 0,001, \quad (3)$$

где A_k выбиралось через шаг 0,001 в диапазоне оптических плотностей 0,150–0,164 выбранной партии (см. рис. 3).

Облучательные установки Государственного эталона ГЭТ209-2014 с радионуклидными источниками

Каждый комплект, содержащий по 5 одинаковых фрагментов пленки ПОР, упакованных в герметичный влагостойкий бумажный контейнер, отобранных в соответствии с рис. 5, подвергался облучению дозами в диапазоне от 200 до 25 000 Гр в цилиндрическом фантоме из алюминия высотой 90 мм, диаметром 30 мм и толщиной стенок 1,8 мм на лабораторной гамма-установке для микробиологических и биохимических исследований ЛМБ-γ-1М (Россия) с радионуклидами ^{137}Cs мощностью дозы 0,5 Гр/сек и лабораторной гамма-установке для микробиологических и радиационно-химических исследований МРХ-γ-100 (Россия) с радионуклидами ^{60}Co мощностью дозы 2,5 Гр/сек. В этих экспериментах фантом с пленками находился на расстоянии 40 мм в центре капсул с источниками ИИ, расположенными в виде цилиндрического беличьего колеса ($\varnothing \sim 80$ мм).

Средства измерения оптической плотности

Измерения оптической плотности пленок проводили на разных режимах спектрофотометра Specord-210 Plus в режиме карусель (в режиме карусель измеряется

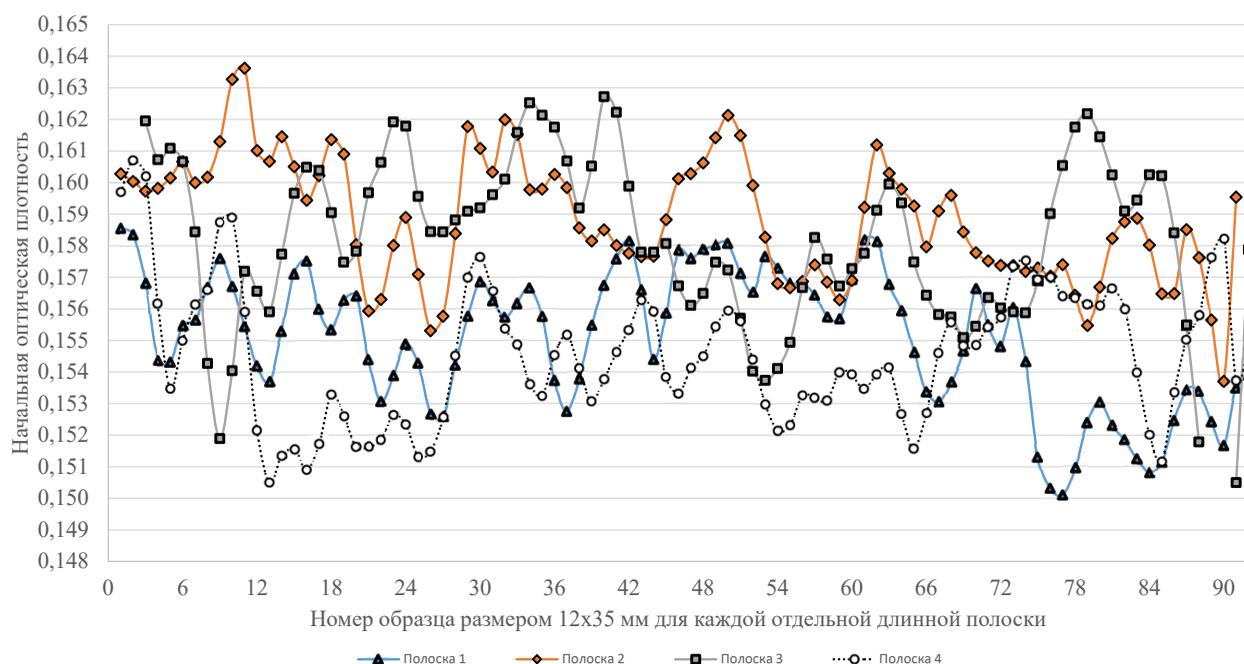


Рис. 3. Распределение оптической плотности одной партии необлученных пленок

Fig. 3. Optical density distribution of one batch of unirradiated films

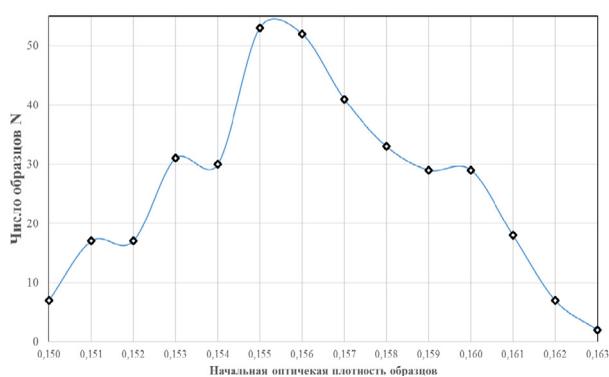
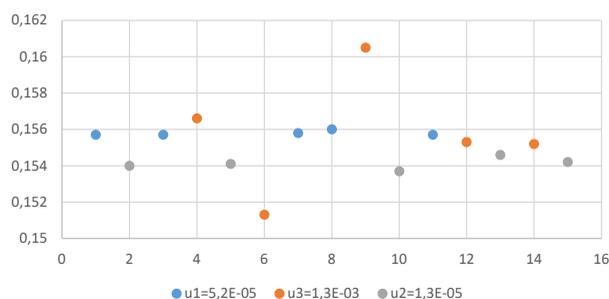


Рис. 4. Распределение числа образцов-заготовок по оптической плотности в партии пленки-сырца

Fig. 4. Distribution of the number of samples-blanks by the optical density in a raw film batch

последовательно ОП 15-ти образцов за один прием). Экспериментально установлено, что наведенная оптическая плотность (НОП) в режиме измерения поглощения насыщается на уровне 3-го, а его пространственное разрешение – не хуже 1 мм (размер оптического пучка $\sim 7 \times 1 \text{ мм}^2$). Максимальная чувствительность отобранных образцов заготовок ПОР, как и для первоначальной, наблюдается на длине волны 550 нм, на которой и производилось чтение НОП. НОП всех комплектов облученных пленок начинали через ~ 5 минут после окончания облучения (время, затраченное на извлечение образцов

Рис. 5. Отбор комплектов по 5 шт. образцов пленки из 15 образцов-заготовок с близкими значениями ОП. Во вставке показаны оценки неопределенности u для каждого из 3-х комплектов отобранных пленокFig. 5. Selection of sets of five pieces of film samples from 15 blank samples with similar OD values. The inset shows estimates of the uncertainty u for each of the three sets of selected films

из камеры облучения, доставки и установки их в держатель спектрофотометра).

Первоначально измеряли спектральное распределение ОП облученных по поглощенной дозе до 10 кГр с целью установления той длины волны, где пленки проявляют максимальную чувствительность (наибольшая чувствительность в диапазоне 540–560 нм с максимумом на 550 нм). Затем оптические плотности облученных комплектов пленок при значениях 200, 250, 750, 1000 Гр и при значениях 5, 15, 20, 25 кГр (по воде) измеряли на фиксированной длине волны 550 нм.

Измерения проводили также в режиме сканирования во времени с фиксированными интервалами с целью установления изменения ОП после облучения (постэффект). Линейность оптической плотности пленки в зависимости от поглощенной дозы оценивалась графическим методом в программе Excel. Стабильность во времени, зависимость показаний от энергии ИИ пленочных радиохромных систем будет опубликовано в отдельном сообщении.

Результаты и обсуждение

Зависимость наведенной оптической плотности отобранных комплектов пленок от поглощенной дозы

На рис. 6 приведена экспериментальная зависимость наведенная в соответствии с JCGM 100:2008, ISO/ASTM 51261:2013, ISO/ASTM 51707:2015.

Во всем диапазоне облученных доз от 200 Гр до 20 кГр значение НОП А математически описывается линейной функцией

$$A = 0,908 \times D, (R^2 = 0,998), \quad (3)$$

где D – поглощенная доза, R² – коэффициент линейной детерминации (рис. 6).

Однако при более подробном рассмотрении, как следует из данных во вставках к рис. 6, при малых (200–800 Гр) и больших (15 кГр и выше) зависимость ОП от ПД носит нелинейный характер. Такое поведение ОП при малых дозах связано с недостаточно эффективным поглощением РЧС энергии ионизирующего излучения, а нелинейность при больших дозах связана, очевидно, с насыщением оптической плотности РЧС на основе сополимера с 4-диэтиламиноазобензоловым красителем.

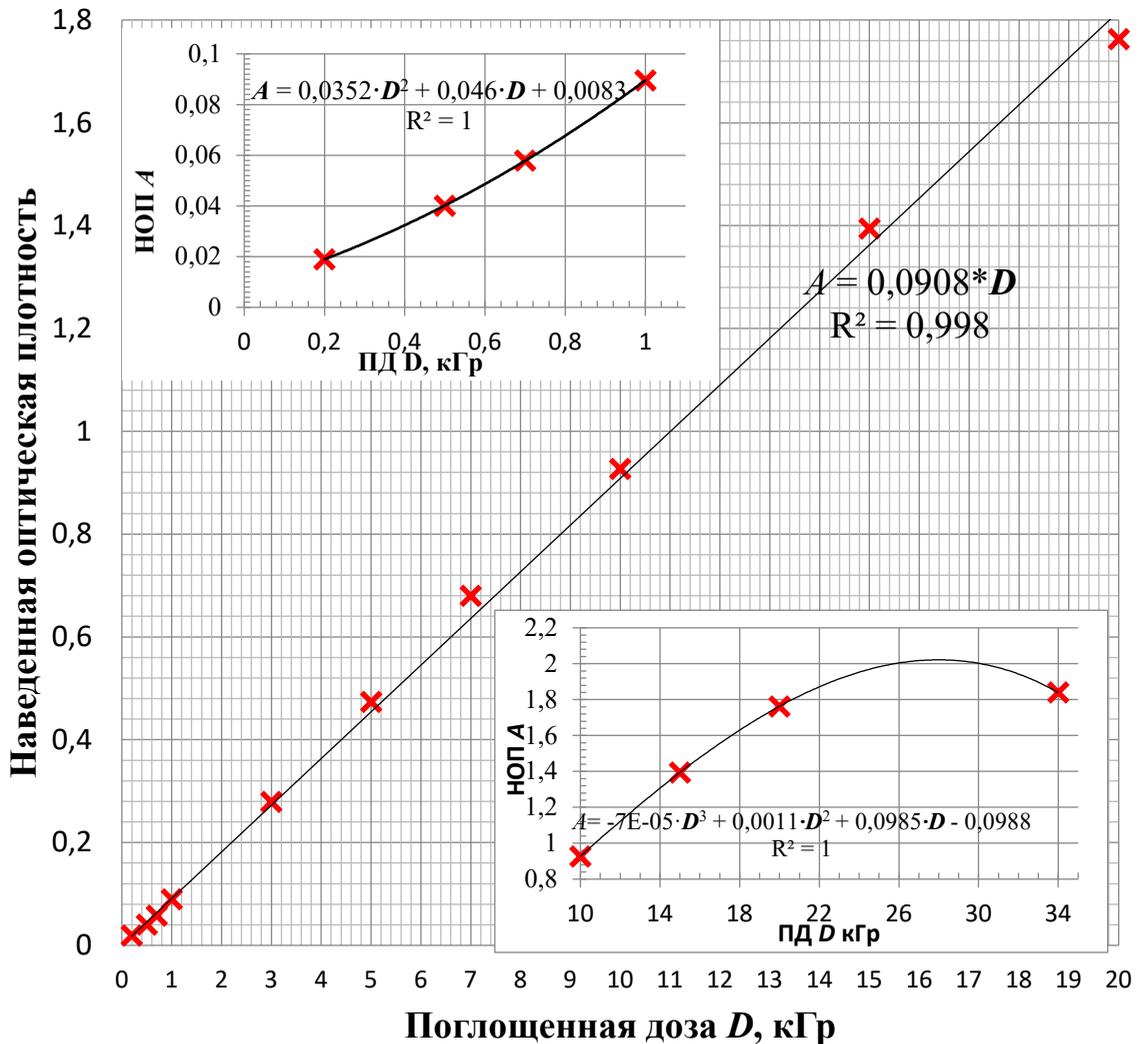


Рис. 6. Диаграмма зависимости наведенной оптической плотности отобранных комплектов пленок от поглощенной дозы D
 Fig. 6. Diagram of the dependence of the induced optical density of the selected sets of films on the absorbed dose D

В этом исследовании сравнивалась эффективность описанного метода (с отбором пленок по начальным ОП) дозиметрии с обычной процедурой безотборной пленочной дозиметрии с широким спектром начальных ОП. На рис. 7 представлены результаты сравнения относительных значений НОП u/A_{cp} для различных партий пленок (с отбором и без отбора комплектов по начальным значениям ОП необлученных пленок) во всем диапазоне исследованных поглощенных доз.

Заключение

В настоящей работе предложен новый способ расширения динамического диапазона измерений ПД радиохромными планочными дозиметрами и улучшения их точностных характеристик. Проверочные эксперименты показали, что диапазон измеряемых доз из заготовок стандартных образцов поглощенной дозы СО ПД(Ф)-1/10 (рис. 7) для комплектов с отобранными образцами пленок с начальными оптическими плотностями в интервале $A_0 - 0,001 \leq A \leq A_0 + 0,001$ составляет от 200 Гр вплоть до 20 кГр со стандартной

неопределенностью не хуже 0,8 %, в то время как комплекты образцов, неотобранные по ОП со значениями в интервале $A_0 - 0,01 \leq A \leq A_0 + 0,01$, проявляют в утвержденном диапазоне ПД (1–10) кГр стандартную неопределенность не лучше 2 %.

Таким образом, метод отбора комплектов пленок в узком интервале ОП в отличие от комплектов пленок в широком диапазоне ОП (без отбора) дает существенно лучший результат по оценке как динамического диапазона, так и стандартной неопределенности измеренных доз.

Полученные результаты свидетельствуют о следующем:

1. Стандартные образцы поглощенной дозы утвержденного типа СО ПД(Ф)-1/10 могут быть использованы в существенно широком диапазоне поглощенных доз от 200 Гр до 25 кГр и со стандартной неопределенностью измерений вплоть до 0,8 %.

2. Согласно Государственной поверочной схеме, в качестве вторичных эталонов и компараторов МПД допускаются средства измерений с суммарным

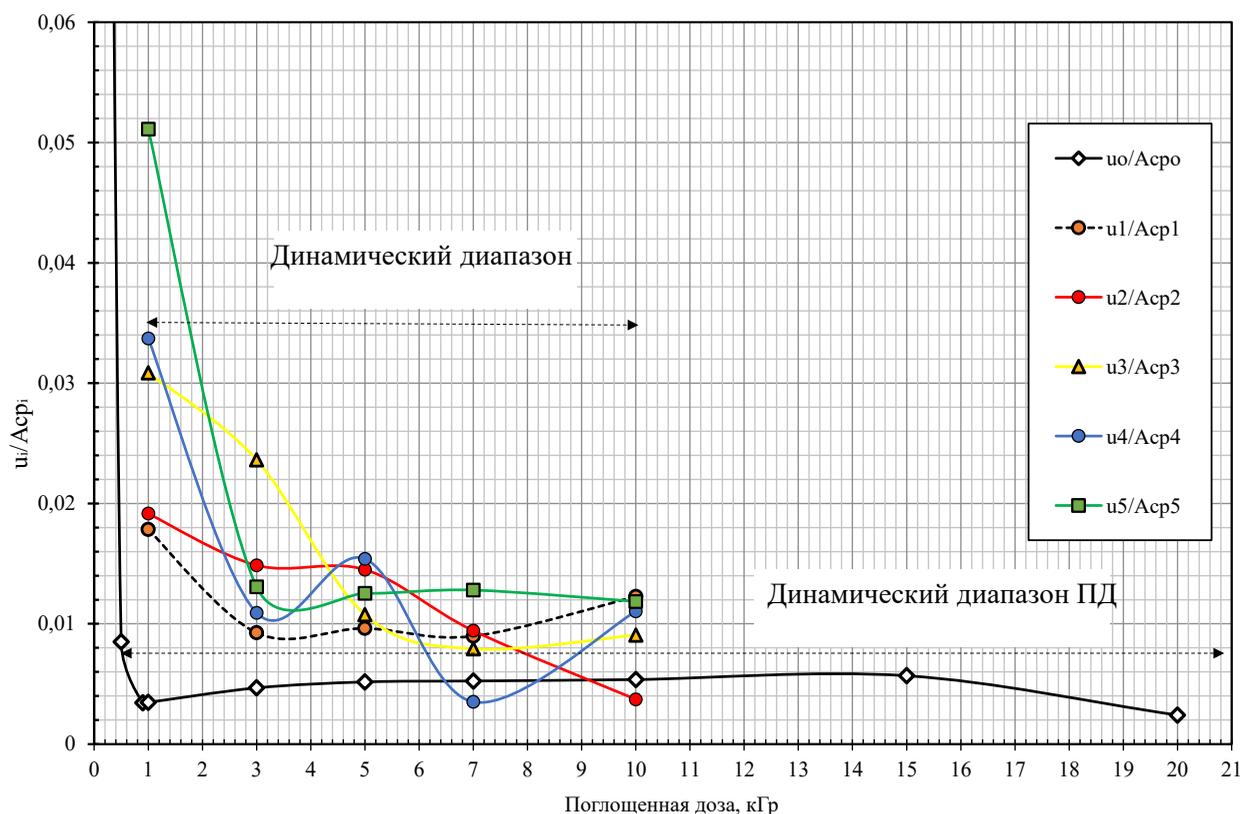


Рис. 7. Относительная неопределенность (u_i/A_{cp_i}) средних арифметических значений ОП по 6 партиям для каждого значения ПД, где индекс $i=0$, что соответствует комплектам пленок, отобранных по начальной ОП, а индексы $i=1...6$ соответствуют комплектам с неотобранными ОП

Fig. 7. Relative uncertainty (u_i/A_{cp_i}) of the arithmetic mean values of OD for six batches for each value of AD, where index $i=0$, which corresponds to sets of films selected according to the initial OD, and indices $i=1...6$ correspond to sets with unselected OD

относительным СКО результатов измерений (0,8–2,5)%, включая нестабильность за межповерочный интервал. Результаты настоящих исследований показывают, что радиоохромные пленочные стандартные образцы утвержденного типа при определенных условиях отбора комплектов пленок могут быть использованы в качестве вторичных эталонов – *компараторов МПД*.

Благодарности: Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории технологической дозиметрии ФГУП «ВНИИФТРИ» за содействие и поддержку при выполнении данной работы.

Acknowledgments: All measurements were carried out using the equipment of the All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Материал

статьи подготовлен на основе доклада, представленного на V Международной научной конференции «Стандартные образцы в измерениях и технологиях» (Екатеринбург, 13–16 сентября 2022 г.). Переводная версия статьи на английском языке планируется к публикации в книге Sobina E. et al. (eds.). *Reference Materials in Measurement and Technology*. RMMT 2022. Switzerland: Springer, Cham.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest. The material of the article was prepared on the basis of the report presented at the V International Scientific Conference „Reference Materials in Measurement and Technology“ (Yekaterinburg, September 13–16, 2022). A translated version of the article in English is planned for publication in the book Sobina E. et al. (eds.). *Reference Materials in Measurement and Technology*. RMMT 2022. Switzerland: Springer, Cham.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Обеспечение единства измерений в радиационных технологиях / П. А. Абдулов [и др.] // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 198–206.
2. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209–2014 / В. В. Алейкин [и др.] // Альманах современной метрологии. 2015. № 5. С. 54–74.
3. Коваленко О. И., Тенишев В. П. Средства измерений для контроля поглощенной дозы при радиационной обработке пищевой и сельскохозяйственной продукции // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов Международной научно-практической конференции, Обнинск, 16–18 сентября 2020 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. С. 335–337.
4. Громов А. А., Жанжора А. П., Коваленко О. И. Применение стандартных образцов поглощенной дозы при валидации процессов радиационной стерилизации медицинских изделий и радиационной обработки пищевой продукции // Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17, № 4. С. 23–32. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-4-23-32>
5. Tenishev V. P., Emelyanenko I. A. Radiation-sensitive film compositions for measuring absorbed doses within the 100–1000 Gy range. In: Medvedevskikh S., Kremleva O., Vasil'eva I., Sobina E. (eds.). *Reference Materials in Measurement and Technology*. RMMT 2018. Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32534-3_13
6. Тенишев В. П. Спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиоохромных радиационно-чувствительных композиций // Измерительная техника. 2020. № 8. С. 59–65. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-8-59-65>
7. Тенишев В. П. Спектральные и дозиметрические свойства многослойных структур радиоохромных эталонов поглощенной дозы // Физический журнал: серия конференций. 2022. Сер. 2192 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2192/1/012017>

REFERENCE

1. Abdulov R. A., Aleikin V. V., Generalova V. V., Gromov A. A., Gurskii M. N., Emel'ianenko I. A. et al. Ensuring the uniformity of measurements in radiation technologies. *AI'Manac of Modern Metrology*. 2015;2:198–206. (In Russ.).
2. Aleykin V. V., Generalova V. V., Gromov A. A., Gurskiy M. N., Zhazhora A. P., Emel'yanenko I. A. et al. National primary special standard for the unit of absorbed dose rate of intense photon, electron, and beta radiation for radiation technologies GET209–2014. *AI'Manac of Modern Metrology*. 2015;5:54–74. (In Russ.).
3. Kovalenko O. I., Tenishev V. P. Measuring instruments for monitoring the absorbed dose during radiation processing of food and agricultural products. In: *Nuclear physics research and technologies in agriculture: collection of reports of the International Scientific and Practical Conference, 16–18 September 2020, Obninsk, Russia*. Obninsk: RIRAE; 2020. P. 335–337. (In Russ.).
4. Gromov A. A., Zhazhora A. P., Kovalenko O. I. Application of certified reference materials of absorbed dose for process validation of irradiation of medical supplies and food products. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2021;17(4):23–32. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-4-23-32> (In Russ.).
5. Tenishev V. P., Emelyanenko I. A. Radiation-sensitive film compositions for measuring absorbed doses within the 100–1000 Gy range. In: Medvedevskikh S., Kremleva O., Vasil'eva I., Sobina E. (eds.). *Reference Materials in Measurement and Technology*. RMMT 2018. Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32534-3_13

6. Tenishev V. P. Spectral, dosimetric, and metrological characteristics of radiochromic radiation-sensitive compositions. *Measurement Techniques*. 2020;8:59–65. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-8-59-65> (In Russ.).
7. Tenishev V. P. Spectral and dosimetric properties of multilayer structures of radiochromic absorbed dose reference materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2192012017. 2022. <https://doi.org/10/1088/1742-6596/2192/1/012017>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2018 г. № 2515 // МетрКонсалт [сайт]. URL: <https://metrcons.ru/upload/iblock/24e/24efd22b2debc54b3cef5acd5871ffd3.pdf> (дата обращения: 04.08.2022).

ГСО 8916–2007 СО поглощенной дозы фотонного и электронного излучений (сополимер с 4-диэтиламиноазобензоловым красителем) СО ПД(Э)-1/10 // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/19/items/391269> (дата обращения: 04.08.2022 г.).

ТУ 2379-026-13271746-06 Пленка окрашенная радиационно-чувствительная типа ПОР-2. М.: Стандартиформ, 2006. 13 с.

JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6

ISO/ASTM 51261:2013 Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing // ISO. 2013. URL: <https://www.iso.org/standard/60211.html>

ISO/ASTM 51707:2015 Guide for estimation of measurement uncertainty in dosimetry for radiation processing // ISO. 2013. URL: <https://www.iso.org/standard/66730.html>

ГЭТ 2090–2014 Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397897>

Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тенишев Владимир Петрович – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории технических и радиотехнических измерений ФГУП «ВНИИФТРИ»

Россия, 141570, Московская область, п. Менделеево
e-mail: tenishev@vniiftri.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir P. Tenishev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory of Technological Dosimetry All-Russian Scientific Research Institute of Physical Technical and Radio Technical Measurements (VNIIFTRI)

Moscow region, Mendeleevo, 141570, Russia
e-mail: tenishev@vniiftri.ru