ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО/АСТМ 51900– 2013

Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты

ISO/ASTM 51900:2009
Guide for dosimetry in radiation research on food and agricultural products (IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2014

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») на основе аутентичного перевода международного стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 335 «Методы испытаний агропромышленной продукции на безопасность»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июня 2013 г. № 366-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО/АСТМ 51900:2009 «Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты» (ISO/ASTM 51900:2009 Guide for dosimetry in radiation research on food and agricultural products)

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок – в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (gost.ru)

© Стандартинформ, 2014

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты

Guide for dosimetry in radiation research on food and agricultural products

Дата введения – 2014–07–01

1 Область применения

1.1 Данное руководство содержит минимальные требования по дозиметрии, необходимой при проведении исследований по влиянию радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты. Такие исследования включают в себя установление количественной зависимости между поглощенной дозой и соответствующими эффектами в указанных продуктах. В данном руководстве освещены общие вопросы дозиметрии в таких исследованиях и публикациях их результатов. Дозиметрия должна рассматриваться как неотъемлемая часть эксперимента.

Примечание 1 – CAC разработала международный Общий стандарт и Практический кодекс, в которых рассмотрены вопросы применения радиации для обработки пищевых продуктов. В этих документах особо подчеркнута роль дозиметрии, применение которой гарантирует соблюдение правил радиационной обработки [1].

Примечание 2 – Данное руководство содержит справочную информацию в виде примечаний. Пользователи также должны обращаться к ссылкам, приведенным в конце стандарта, а кроме того и к необходимой научной литературе по вопросам методологии эксперимента в области дозиметрии [2 – 10].

1.2 Настоящее руководство относится к исследованиям с использованием следующих видов ионизирующей радиации: гамма-излучение, рентгеновское (тормозное) излучение и электронные пучки.

1.3 В настоящем руководстве приведены требования к дозиметрии как при выработке экспериментального метода, так и в стандартных (рутинных) экспериментах. В нем не рассматриваются требования к дозиметрии при оценке качества монтажа или при оценке операционного качества установок для облучения. Эти аспекты рассматриваются в Руководствах ISO/ASTM 51204, 51431, 51608, 51649 и 51702.

1.4 Данное руководство не нацелено на то, чтобы ограничить экспериментатора в выборе методики эксперимента. Задача руководства состоит в том, чтобы гарантировать правильный выбор источника излучения и методики эксперимента, при котором результаты эксперимента были понятны и полезны другим исследователям и руководящим организациям.

1.5 При измерениях необходимо принимать во внимание суммарную неопределенность поглощенной дозы радиации и ее вариации по объему облученного образца (см. Руководство ISO/ASTM 51707).

1.6 Настоящий стандарт не ставит своей целью осветить все вопросы, имеющие отношение к безопасности работы при его применении, если таковые имеются. На пользователе стандарта лежит ответственность за выработку достаточных мер безопасности перед началом работ с учетом нормативных ограничений.

2 Нормативные ссылки

2.1 Стандарты ASTM:[1)]

E 170 Терминология, относящаяся к радиационным измерениям и дозиметрии

[1)] По вопросу ссылок на стандарты ASTM и ISO/ASTM см. вебсайт ASTM, www.astmgost.e-ecolog.ru
в ASTM Customer Service по адресу gost.e-ecolog.ru информацией о содержании *Ежегодной книги стандартов ASTM* обратитесь к сводной странице документов на вебсайте ASTM.

Е 925 Руководство по проведению калибровки УФ-спектрофотометров и спектрофотометров видимой части спектра со спектральным разрешением более 2 нм

Е 1026 Практика применения Системы эталонных дозиметрических стандартов Фрике

Е 2232 Руководство по выбору и использованию математических методов расчета поглощенной дозы в задачах обработки данных по радиации

Е 2303 Руководство по картированию поглощенных доз на установках по обработке данных

Е 2304 Практика применения фотофлуоресцентной пленочной дозиметрической системы на основе LiF

Е 2381 Руководство по дозиметрии при радиационной обработке разжиженных образований и потоков жидкости

F 1355 Руководство по радиационной обработке свежей сельскохозяйственной продукции в качестве фитосанитарной меры

F 1356 Руководство по радиационной обработке свежего и замороженного красного мяса и мяса птицы для ограничения содержания патогенов и других микроорганизмов

F 1640 Руководство по выбору и применению упаковочных материалов для пищевых продуктов, подвергаемых радиационной обработке

F 1736 Руководство по радиационному облучению рыбы и водных беспозвоночных, используемых в пищу, для ограничения содержания патогенов и гнилостных микроорганизмов

F 1885 Руководство по радиационному облучению сухих специй, трав и приправ для ограничения содержания патогенов и других микроорганизмов

2.2 Стандарты ISO/ASTM:[1)]

51204 Руководство по дозиметрии на гамма-установках для радиационной обработки пищевых продуктов

51205 Руководство по применению дозиметрической системы на основе церия-сульфата церия

51261 Руководство по выбору и калибровке дозиметрических систем для радиационной обработки пищи

51275 Руководство по применению дозиметрической системы на основе радиохромных пленок

51276 Руководство по применению дозиметрической системы на основе полиметилметакрилата

51310 Система дозиметрическая с использованием радиохромного оптического волновода. Практическое руководство по применению

51431 Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением

51538 Система дозиметрическая на основе этанолхлорбензола. Практическое руководство по применению

51540 Руководство по применению жидкостной радиохромной дозиметрической системы

51607 Руководство по применению дозиметрической системы с использованием ЭПР-спектроскопии аланина

51608 Руководство по дозиметрии в установках по радиационной обработке рентгеновским (тормозным) излучением

51649 Практическое руководство по дозиметрии на установках для радиационной обработки электронным пучком с энергией электронов от 300 кэВ до 25 МэВ.

51650 Система дозиметрическая на основе триацетата целлюлозы. Практическое руководство по применению

51702 Руководство по дозиметрии на гамма-установках для радиационной обработки

51707 Руководство по оценке неопределенностей в дозиметрии при радиационной обработке

51818 Практическое руководство по дозиметрии на установках для радиационной обработки электронным пучком с энергией электронов от 80 до 300 кэВ.

51956 Практическое руководство по применению систем термолюминесцентной дозиметрии (TLD) для радиационной обработки.

[1)] По вопросу ссылок на стандарты ASTM и ISO/ASTM см. вебсайт ASTM, gost.e-ecolog.ru атитесь в ASTM Customer Service по адресу gost.e-ecolog.ru информацией о содержании *Ежегодной книги стандартов ASTM* обратитесь к сводной странице документов на вебсайте ASTM.

2.3 Отчеты Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (ICRU):[1)]

ICRU 60 Fundamental Quantities and Units for Ionising Radiation

2.4 Отчет NPL:

CIRM 29 : Guidelines for Calibration of Dosimeters for Use in Radiation Processing, Sharpe, P., and Miller, A., August, 1999

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Терминология

3.1 Определения:

3.1.1 ***поглощенная доза***, *(D)*: Количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной в единице массы определенного вещества. Единица в системе СИ поглощенной дозы – грей (Gy), где 1 грей является эквивалентом поглощения 1 джоуля на килограмм массы данного вещества (1 Gy = 1 Дж/кг). Математическое определение этой зависимости – частное от деления d ε на d*m*, где d ε – среднее значение дифференциальной энергии, переданной ионизирующим излучением веществу дифференциальной массы d*m*.

$$D = \mathrm{d}\,\varepsilon / \mathrm{d}m \qquad (1)$$

Примечание – Ранее использовавшаяся единица поглощенной дозы - рад (1 рад = 100 эрг/г = 0,01 Gy). Поглощенную дозу иногда называют просто дозой.

3.1.2 ***картирование поглощенной дозы (определение пространственного распределения поглощенной дозы):*** Измерение поглощенной дозы внутри облученного продукта для получения одно-, двух-, и трехмерного распределения поглощенной дозы, в целях определения карты значений поглощенной дозы.

3.1.3 ***мощность поглощенной дозы D´***: Поглощенная в материале доза, отнесенная к единице времени, приращение *dD* за время *dt* (см. ICRU 60).

$$D' = dD/dt \qquad (2)$$

единица : $Gy \cdot s^{-1}$.

3.1.4 ***аккредитованная на право калибровки дозиметрическая лаборатория***: Дозиметрическая лаборатория, получившая от аккредитующей организации документ, подтверждающий ее компетентность проводить необходимые операции по калибровке или поверке дозиметрических систем в соответствии с требованиями нормативной документации аккредитующей организации.

3.1.5 ***тормозное излучение***: Электромагнитная радиация с широким спектром, излучаемая в том случае, когда обладающие энергией заряженные частицы подвергаются воздействию сильного электрического или магнитного поля, например, вблизи атомных ядер.

[1)] Имеется в Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям, 7910 Woodmont Ave., Suite 800, Bethesda, MD 20814, U.S.A.

3.1.6 ***равновесие заряженных частиц***: Условие, при котором кинетическая энергия заряженных частиц (без учета энергии покоя), проникающих в бесконечно малый объем облучаемого материала равна кинетической энергии заряженных частиц, исходящих из этого объема.

3.1.7 ***коэффициент равномерности дозы***: Отношение максимального к минимальному значению поглощенной дозы в облучаемом продукте.

3.1.8 ***дозиметр:*** *П*рибор, который под воздействием облучения демонстрирует количественное изменение, которое можно связать с поглощенной дозой в данном материале, используя соответствующие измерительные приборы и процедуры.

3.1.9 ***реакция дозиметра***: Воспроизводимый количественный радиационный эффект, который вызывается в дозиметре воздействием определенной поглощенной дозы.

3.1.10 ***дозиметрическая система***: Система, используемая для определения поглощенной дозы, состоящая из дозиметров, измерительной аппаратуры и соответствующих эталонов, а также методик применения данной системы.

3.1.11 ***электронное равновесие***: Равновесие заряженных частиц (см. 3.1.6), при котором заряженными частицами являются электроны, приводимые в движение фотонами, облучающими материал.

3.1.12 ***референсный эталонный дозиметр:*** *Д*озиметр высокого метрологического качества, используемый в качестве эталона для реализации метрологической прослеживаемости до первичных эталонных дозиметров.

3.1.13 ***повторяемость*** **(результатов измерений):** Хорошая согласованность между результатами последовательных измерений одной и той же измеряемой величины при выполнении всех следующих условий: использование одной и той же процедуры измерений; измерения проводит один и тот же оператор; используется один и тот же измерительный прибор в неизменных условиях при неизменном его расположении, причем измерения проводятся в течение короткого промежутка времени.

П р и м е ч а н и е — Эти условия называются «условиями повторяемости». Повторяемость может быть выражена количественно с использованием дисперсии результатов.

3.1.14 ***воспроизводимость (результатов измерений):*** Хорошая согласованность между результатами последовательных измерений одной и той же измеряемой величины при замене: принципа или метода измерений, оператора, измерительного прибора, места его размещения, условий применения и времени проведения измерений.

П р и м е ч а н и е — Корректное определение воспроизводимости требует перечисления условий, которые менялись при проведении измерений. Воспроизводимость может быть выражена количественно в терминах дисперсии результатов. В данном контексте под результатами измерений следует понимать исправленные результаты.

3.1.18 ***эталонный дозиметр-переносчик***: Дозиметр, часто являющийся референтным эталонным дозиметром, пригодный для транспортировки между 3.1.15 ***рабочий дозиметр:*** Дозиметр, калиброванный по первичному, референсному или вторичному эталонному дозиметру и используемый при повседневных измерениях поглощенной дозы.

3.1.16 ***моделирующий продукт***: Материал, свойства которого ослаблять и рассеивать излучение близки к аналогичным свойствам облучаемого продукта, материала или вещества.

3.1.17 ***прослеживаемость:*** Свойство результата измерений или значения эталона, позволяющее соотнести указанный результат или значение с установленными референсными значениями (соответствующими, как правило, национальным или международным эталонам), используя непрерывную последовательность сличений, каждое из которых имеет установленную неопределенность.

различными местоположениями, применяющийся для сравнения результатов измерения поглощенной дозы.

3.1.19 ***транзитная доза:*** Поглощенная доза, полученная продуктом (или дозиметром) во время транспортировки из пункта отправления до места расположения установки для облучения или в случае применения подвижной установки для облучения, когда установка перемещается из нерабочего положения в рабочее и обратно.

3.1.20 ***неопределенность (измерения):*** Параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий дисперсию значений, которую обоснованно можно было бы отнести к измеряемой или связанной с ней величине.

3.1.21 ***рентгеновское излучение***: Ионизирующее электромагнитное излучение, включающее как тормозное излучение, так и характеристическое излучение при переходе атомных электронов на более низкие уровни.

3.2 ***Определения терминов, специфических для данного стандарта:***

3.2.1 ***остаток***: Разность между наблюдаемым значением и значением, рассчитанным с использованием регрессионной модели.

3.2.2 ***доза в мишени:*** Поглощенная доза, предназначенная для представляющего интерес объема внутри облучаемого образца.

Примечание — Определения других терминов, используемых в стандарте и имеющих отношение к радиационным измерениям и дозиметрии, можно найти в ASTM Terminology E170. Определения в E170 совместимы с определениями в ICRU 60; этот документ, таким образом, может использоваться в качестве альтернативного.

4 Значение и применение

4.1 Настоящее руководство призвано дать общую ориентировку в вопросах дозиметрии для экспериментов с пищевыми и сельскохозяйственными продуктами, включая также представление результатов экспериментов. В исследованиях, касающихся эффективности облучения пищевых и сельскохозяйственных продуктов с целью получения определенного положительного результата, необходимо оперировать с весьма различными характеристиками поглощенных доз в ходе различных экспериментов с различными продуктами. Например, поглощенная доза, необходимая для стерилизации нарезанных кусочков фруктов, значительно меньше поглощенных доз, необходимых для дезактивации некоторых патогенных бактерий в мясе или для обеззараживания специй.

Примечание — Примерами важных эффектов облучения являются: подавление жизнеспособных пищевых бактерий, вирусов и паразитов; фитосанитарная обработка (например дезинфекция фруктов и овощей), предотвращение прорастания; задержка созревания; изменения в химическом составе продукта; изменение качества продукта. Дальнейшее обсуждение этих эффектов выходит за рамки данного руководства (см. Руководства ASTM F 1355, F 1356, F 1736 и F 1885).

4.2 Весьма важно надлежащим образом изложить вопросы радиационной обработки продуктов, поскольку степень биологического эффекта может зависеть от различных факторов, таких как тип источника излучения, мощность поглощенной дозы, энергия излучения, состояние окружающей среды в процессе облучения, тип используемого излучения. В данном руководстве предпринята попытка представить информацию, освещающую методологию и способ представления результатов измерений поглощенной дозы радиации, которые обеспечивают повторяемость в экспериментах, проводимых различными исследователями.

Примечание — Факторы, которые могут влиять на результат воздействия излучения на сельскохозяйственные продукты, включают в себя: сорт, вид, разновидность, жизнестойкость, время хранения, исходное качество, состояние спелости, температуру, содержание влаги, pH, вид упаковки, условия транспортировки и хранения. Хотя влияние этих факторов не обсуждается в данном руководстве, они должны учитываться при планировании экспериментов (см. Руководства ASTM F 1355, F 1356, F 1640, F 1736 и F 1885).

4.3 Эксперимент должен обеспечивать максимальную равномерность облучения образца. На практике поглощенная доза в образце будет варьировать в некоторых пределах. Для определения уровней, положения и воспроизводимости максимальной (D_{max}) и минимальной (D_{min}) поглощенных доз для данного перечня характеристик эксперимента используется пространственное распределение поглощенной дозы (карта поглощенных доз). Дозиметры, которые используются для получения карты поглощенных доз, должны быть работоспособны в интервалах доз и градиентов доз, близких к тем, которые ожидаются в облучаемых образцах.

4.4 Полезную информацию о распределении поглощенной дозы в облученном образце, в особенности вблизи границ раздела материалов, могут дать теоретические расчеты (см. Руководство ASTM E 2232).

5 Установки для облучения и виды обработки

5.1 ***Типы установок для облучения***: В данном руководстве рассматриваются установки, в которых для исследования влияния ионизирующего излучения на пищевые и сельскохозяйственные продукты используется гамма-излучение, рентгеновское (тормозное) излучение и ускоренные электроны.

Примечание — В разделах 5 и 6 дается краткий обзор типов установок для облучения и их рабочих характеристик. Рабочие характеристики источников радиации, вид радиации, энергия фотонов или электронов, размеры и плотность образцов, подвергаемых облучению – все эти факторы влияют на процесс поглощения падающего излучения в экспериментальных образцах. Исследователям, незнакомым с рабочими характеристиками источников излучения, убедительно рекомендуется перед началом экспериментов ознакомиться с соответствующими ссылочными материалами [2-10].

5.2 ***Автономные гамма- и рентгеновские (тормозные) облучатели с сухим хранилищем***

В настоящее время в большинстве исследований, проводимых с пищевыми и сельскохозяйственными продуктами, используются гамма-облучатели либо на основе ^{137}Cs, либо на основе ^{60}Co, а также рентгеновские (тормозные) автономные облучатели. Эти установки экранированы свинцом (или другим подходящим материалом с большим атомным номером) и

обычно снабжены механизмом для перемещения контейнера с образцами от места загрузки до места облучения.

Примечание — Как правило, автономные гамма-облучатели *с сухим хранилищем* имеют ограниченный объем камеры для облучения. Этот тип облучателя классифицируется как ANSI Category 1, Self-contained Dry Storage Gamma Irradiators [11].

5.2.1 На практике в автономных гамма-облучателях предусмотрено круговое распределение источников, так что поглощенная доза достаточно равномерна относительно центра, в котором помещается облучаемый образец.

5.2.2 Другой метод получения равномерной дозы в образце при использовании гамма- и рентгеновских установок состоит в том, чтобы вращать контейнер с образцом в поле излучения с помощью поворотного стола облучателя.

5.3 *Автономные водяные гамма-облучатели с водяным хранилищем* — Облучение образцов может также проводиться в водяном гамма-облучателе. В этих установках источник излучения находится в хранилище в виде постоянно экранированного резервуара (обычно заполненного водой). Образцы для облучения помещаются в водонепроницаемую камеру и в ней опускаются в воду рядом с источником излучения.

Примечание — Этот тип облучателя классифицируется как ANSI Category III, Self-Contained Wet Source Storage Gamma Irradiators [12].

5.4 *Крупномасштабные гамма-установки для облучения* — Гамма-облучение исследуемых образцов выполняется также на крупномасштабных облучательных установках с хранилищем сухого типа, либо с водяным резервуаром. В этих установках источник излучения представляет собой набор стержней, содержащих ^{60}Co и способных опускаться в большую облучательную камеру и подниматься из нее. При возврате из облучательной камеры источник экранируется водой (водяной тип) или подходящим материалом с большим атомным номером (сухой тип), а также обоими способами.

Примечание —Эти типы облучателей классифицируются как ANSI Category IV, Dry Storage Gamma Irradiators [13].

5.4.1 *Режим непрерывной работы* — Обычный метод облучения контейнеров с образцами, находящихся на конвейере, заключающийся в том, что для получения более равномерной поглощенной дозы конвейер совершает один оборот или более вокруг центрального источника. Когда облучатель не используется, источник излучения извлекается из облучательной камеры.

5.4.2 *Порционный режим* — Альтернативный подход заключается в том, что контейнеры с образцами помещаются в облучательную камеру в то время, когда источник излучения экранирован, после чего источник перемещается в рабочее положение на время, необходимое для достижения желаемой поглощенной дозы.

5.5 *Электронные и рентгеновские (тормозные) установки*:

5.5.1 *Электронные установки* — Источники электронного излучения (с энергией электронов более 300 кэВ) представляют собой ускорители либо прямого действия (управляемые разностью потенциалов), либо непрямого действия (с СВЧ-генератором). Поля излучения зависят от характеристик и конструкции ускорителей. К таким характеристикам относятся параметры электронного пучка, а именно, спектр энергии электронов, средний ток электронного пучка и распределение тока пучка по поверхности продукта.

5.5.1.1 Ускорители, как правило, формируют узкий пучок электронов, который затем рассеивается таким образом, чтобы охватить всю ширину конвейера, на котором находятся образцы, подлежащие облучению. Рассеяние электронного пучка может осуществляться с помощью магнитного сканера (путем быстрого сканирования пучка, т.е. путем быстрых поворотов в ту и другую сторону), а также с помощью магнитных дефокусирующих линз или рассеивающих фольг.

5.5.2 *Рентгеновская (тормозная) установка* — Рентгеновский (тормозной) генератор вырабатывает коротковолновое электромагнитное излучение, которое подобно гамма-излучению радиоактивных изотопов. Хотя влияние этих видов излучения на облучаемые материалы в общем одинаково, тем не менее они различаются своими энергетическими спектрами, угловыми распределениями и мощностью дозы.

5.5.2.1 Электроны совершают ускоренное движение к металлической мишени, или «конвертеру», сделанному из металла с большим атомным номером (обычно из вольфрама или тантала). Столкновение электронов с мишенью сопровождается генерацией рентгеновского (тормозного) излучения с широким непрерывным энергетическим спектром.

5.5.3 *Транспортировка образцов*. Образцы обычно перемещаются в радиационном поле с помощью конвейера. Из-за узкого углового распределения излучения применение конвейеров для транспортировки образцов в поле излучения, по сравнению со статическими системами облучения или системами с перемещением образцов внутри загрузки, улучшает равномерность дозы по объему загрузки.

5.5.4 Более детальную информацию об установках с электронным пучком и рентгеновских (тормозных) установках и режимах их работы можно получить из документов ISO/ASTM Practices 51431, 51608 и 51649.

6 Характеристики источников излучения

6.1 ***Гамма-облучатели***

6.1.1 Источник излучения, применяемый в гамма-установках и рассматриваемый в данном руководстве, состоит обычно из герметизированных элементов, содержащих внутри ^{60}Co или ^{137}Cs, представляющих собой, как правило, набор стержней и образующих плоскую или цилиндрическую решетку или несколько таких решеток.

6.1.2 Кобальт-60 излучает фотоны с дискретными значениями энергии приблизительно 1,17 и 1,33 МэВ примерно одинаковой интенсивности. Цезий-137 излучает фотоны с энергией примерно 0,662 МэВ [14].

6.1.3 Период полураспада ^{60}Co и ^{137}Cs регулярно пересматривается и результаты обновляются. В последних публикациях приводятся значения 1925,20 ± 0,25 суток для ^{60}Co и 11018,3 ± 9,5 суток для ^{137}Cs [15].

6.1.4 Для гамма-источников единственной известной причиной изменения уровня радиации является уменьшение активности, вызванное радиоактивным распадом. Это уменьшение активности источника, которая вынуждает увеличивать время облучения для получения одной и той же дозы, может быть вычислено или получено с помощью таблиц, которыми снабжает потребителя производитель облучателя (см. Руководство ISO/ASTM 51204).

Примечание — На вычисления времени распада могут наложиться погрешности, вызванные присутствием радиактивных примесей в источнике радиации (например, небольшое количество ^{134}Cs как примеси в ^{137}Cs).

6.2 ***Электронный ускоритель (режимы генерации электронов и рентгеновского (тормозного) излучения):***

6.2.1 Для электронного ускорителя основными характеристиками электронного пучка являются энергетический спектр электронов, ток пучка и, в зависимости от конструкции, мгновенный (импульсный) ток с указанием длительности импульса и частоты следования (см. Руководства ISO/ASTM 51431, 51649 и 51818).

6.2.1.1 В ускорителях прямого действия используется высоковольтные генераторы постоянного тока (dc) или импульсного напряжения; при этом электроны обычно ускоряются до энергий, не превосходящих 5 МэВ.

6.2.1.2 В ускорителях непрямого действия используются высокочастотные электромагнитные волны или источники переменного тока (ac) СВЧ или УВЧ диапазона для получения электронов с энергией, как правило, от 3 МэВ до 15 МэВ.

6.2.2 В рентгеновских (тормозных) установках, кроме характеристик, перечисленных в 6.2.1, важной характеристикой является конструкция мишени, служащей для генерации рентгеновского излучения. Хотя рентгеновское (тормозное) излучение похоже на гамма-излучение радионуклидов ^{60}Co или ^{137}Cs, благодаря чему воздействие этих излучений на материалы в общих чертах одинаково, эти виды излучений отличаются своими энергетическими спектрами, угловым распределением и мощностью поглощенной дозы. Непрерывный энергетический спектр рентгеновского (тормозного) излучения простирается вплоть до максимального значения энергии электронов, бомбардирующих рентгеновскую мишень (см. Руководство ISO/ASTM 51608). В ряде случаев для подавления низкоэнергетической области спектра излучения (с тем, чтобы улучшить равномерность дозы) используется фильтрация спектра.

Примечание — В некоторых странах законодательно может ограничиваться максимальная энергия электронов или рентгеновского (тормозного) излучения, применяемых для облучения потребительских пищевых продуктов.

7 Дозиметрические системы

7.1 Дозиметрические системы используются для определения поглощенной дозы, обычно относительно поглощенной дозы в воде. Они состоят из дозиметров, измерительных приборов и связанных с ними референсных эталонов, а также документации по применению системы.

7.2 Дозиметры могут быть разделены на четыре основных класса в соответствии с их относительными качественными показателями и областями применения: первичный эталон, референсный эталон, эталон-переносчик и рабочие дозиметры. В ISO/ASTM Guide 51261содержится

информация, касающаяся выбора дозиметрических систем для различных применений. В большинстве исследований используются рабочие дозиметры и дозиметры типа эталон-переносчик.

7.2.1 *Дозиметры типа первичного эталона* — Дозиметры типа первичного эталона утверждаются и поддерживаются национальными лабораториями эталонов с целью калибровки радиационного окружения (полей) и для калибровки дозиметров других типов. Наиболее часто применяются первичные эталоны в виде ионизационных камер и калориметров.

7.2.2 *Дозиметры типа референсный эталон* — Дозиметры типа референсный эталон применяются для калибровки радиационного окружения и рабочих дозиметров. Примеры дозиметров типа референсный эталон вместе с их диапазоном измеряемых доз приведены в Руководстве ISO/ASTM 51261.

7.2.3 *Дозиметры типа эталон-переносчик* — Дозиметры типа эталон-переносчик представляют собой специально отобранные дозиметры для переноса информации о поглощенной дозе из аккредитованной или национальной лаборатории эталонов на конкретную рабочую установку для облучения с целью подтверждения, что эта установка удовлетворяет требованию прослеживаемости. При использовании таких дозиметров должны тщательно соблюдаться условия, установленные выпускающей лабораторией. Дозиметры типа референсный эталон могут быть отобраны либо из референсных эталонов, либо из рабочих дозиметров, руководствуясь критериями, приведенными в Руководстве ISO/ASTM 51261.

7.2.4 *Рабочие дозиметры* — Рабочие дозиметры могут использоваться для контроля процесса облучения и картирования доз облучения. Для того чтобы измерения были надежными и точными необходимо использовать надлежащие дозиметрические методики, включая калибровку. Примеры рабочих дозиметров вместе с указанием их диапазонов измеряемых доз приведены в таблице 1 и в руководстве ISO/ASTM 51261.

Таблица 1– Примеры рабочих дозиметров (см. Руководство ISO/ASTM 51261)

Наименование рабочего вещества дозиметра или его типа	Наименование измерительного прибора	Диапазон измеряемой поглощенной дозы (Гр)	Ссылочный документ
Аланин	ЭПР спектрометр	$1 - 10^{5}$	ISO/ASTM 51607
Полиметилметакрилат	УФ/оптический спектрофотометр	$10^{2} – 10^{5}$	ISO/ASTM 51276
Триацетат целлюлозы	Спектрофотометр	$5x10^{3} – 3x10^{5}$	ISO/ASTM 51650
Термолюминесцентный (ТЛД)	Термолюминесцентный считыватель	$1 -10^{5}$	ISO/ASTM 51956
Пленка из флюорида лития	Флюориметр	$50 – 3x10^{5}$	ASTM E 2304
Радиохромные пленки, растворы и оптические волноводы	Оптический спектрофотометр	$1 -10^{5}$	ISO/ASTM 51275 ISO/ASTM 51540 ISO/ASTM 51310
Раствор сульфата церия	Потенциометр или УФ-спектрофотометр	$5x10^{2} – 5x10^{4}$	ISO/ASTM 51205
Раствор Фрике	УФ-спектрофотометр	$20 – 4x10^{2}$	ASTM E 1026
Раствор этанола в хлорбензоле	Спектрофотометр, цветовое титрование, ВЧ-проводимость	$10^{1.10} - 2x10^{5}$	ISO/ASTM 51538
На основе МОП-транзистора	Электронный считыватель	$1 – 2x10^{2}$	(16)

7.3 При выборе рабочей дозиметрической системы, соответствующей предпринимаемой исследовательской работе, необходимо обращать внимание на характеристики источника излучения и экспериментальной установки, которые могут повлиять на показания дозиметра (например, диапазон измеряемых значений поглощенной дозы, тип источника излучения, мощность дозы, энергию электронов или фотонов, а также параметры окружающей среды, такие как температура, влажность и освещенность), а также соответствующие значения неопределенности отмеченных

параметров. Более детально критерии выбора перечислены в руководстве ISO/ASTM 51261. При использовании электронного ускорителя, выбирая дозиметр, важно также учитывать влияние мощности поглощенной дозы (средней и пиковой мощностей для импульсных ускорителей), импульсной мощности и длительности импульса (при необходимости).

7.3.1 При использовании, обслуживании, хранении, выполнении особых мер предосторожности, калибровке и т. п. для конкретных рабочих дозиметрических систем, должны соблюдаться условия, изложенные в стандартах ASTM или ISO/ASTM, а также в рекомендациях изготовителя.

7.4 Прежде чем приступить к работе необходимо произвести калибровку дозиметрической системы. Калибровочная кривая, приложенная к дозиметру, полученному от поставщика, должна рассматриваться лишь как общая (предварительная) информация и не должна использоваться без независимой проверки ее применимости. Калибровка всей закупленной партии дозиметров должна проводиться на постоянной основе через определенные промежутки времени. Такой контроль может рассматриваться как форма проверки калибровочных данных.

7.4.1 Поверка может выполняться путем облучения набора дозиметров при трех разных значениях дозы (в пределах диапазона калибровки), с использованием того же держателя дозиметра, что и в случае облучения при калибровке, и при размещении дозиметра в референсном положении с известным значением мощности дозы. Эти значения дозы сравниваются затем со значениями, вычисленными на основе показаний облученных дозиметров и указанной для них функции отклика. Совпадение результатов в трех точках в пределах неопределенности системы служит подтверждением правильности функции отклика.

7.4.2 *Измерительные приборы* — Измерительный прибор является неотъемлемой частью дозиметрической системы, вследствие чего калибровка дозиметрической системы должна быть увязана с конкретным прибором. Калибровка системы с одним прибором недействительна для другого прибора. Влияние любых изменений в измерительном приборе или его ремонта должно быть надлежащим образом оценено. При капитальном ремонте может потребоваться либо контроль калибровки (например, процедура поверки), либо полная перекалибровка дозиметрической системы. Перед использованием прибор должен калиброваться таким образом, чтобы обеспечить прослеживаемость до национального или международного эталона. Руководство по калибровке спектрофотометра, применяемого в различных видах дозиметрии, приводится в ASTM E 925.

7.4.3 *Процедура калибровки* – Процедура калибровки в основном заключается в облучении дозиметров набором известных доз, охватывающим необходимый диапазон доз, считывании показаний облученных дозиметров с помощью калиброванного измерительного прибора и построении функции отклика (калибровочной кривой). Подробности см. в руководстве ISO/ASTM 51261.

7.4.3.1 *Калибровочное облучение дозиметров* – Дозиметры облучают в диапазоне доз несколько большем, чем диапазон измеряемых доз. Нелинейный характер большинства функций отклика означает неприемлемость экстраполяций. Для диапазона доз, меньшего одной декады, используют как минимум четыре значения дозы, образующих арифметическую прогрессию (например, 1, 3, 5 и 7 кГр). Для диапазона доз, большего одной декады, используют не менее 5 значений дозы на декаду, так, чтобы они образовывали геометрическую прогрессию (например, 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10 кГр для двух декад). Для каждого значения дозы используют набор дозиметров, включающих в в себя от 3 до 5 дозиметров.

7.4.3.2 *Внешние условия* – У большинства дозиметров отклик на радиационное воздействие зависит от внешних условий, таких как температура при облучении и после облучения, влажность и мощность дозы. Поскольку калибровочное соотношение, применяемое для данной дозиметрической системы, справедливо только в условиях, которые имели место во время проведения калибровки, условия калибровки должны быть максимально близки к условиям, в которых выполняются повседневные измерения доз, что обеспечивает минимизацию погрешности, вызванной этими эффектами. Таким образом, калибровочное облучение можно проводить одним из двух способов: облучая дозиметры с помощью облучателя, который создает поглощенную дозу (или мощность поглощенной дозы), величина которой обладает свойством прослеживаемости до национальных или международно признанных эталонов, или же с помощью того облучателя, на котором проводятся текущие научные эксперименты.

Примечание – Хотя в данном руководстве не рассматриваются детально количественные характеристики, относящиеся к внешним условиям, таким как температура и влажность облучаемых пищевых или сельскохозяйственных продуктов, тем не менее указанные количественные характеристики следует приводить в отчете о работе, поскольку они могут влиять на отклик дозиметра (см. Руководство ISO/ASTM 51261).

7.4.3.3 *Облучение в дозиметрической лаборатории, аккредитованной на право проведения калибровки* – В данном случае используют облучение рабочих дозиметров в референсном радиационном поле калибровочной лаборатории. Хотя точное воспроизведение реальных условий исследования в калибровочной лаборатории, вообще говоря, невозможно, необходимо все же пытаться облучать дозиметры, используя мощность дозы и температурные условия максимально близкие к тем значениям, которые будут иметь место во время обычных текущих экспериментов.

7.4.3.4 *Облучение в автономном облучателе* – В этом случае рабочие дозиметры облучают в определенном референсном положении в радиационном поле, где точно известно значение мощности дозы (предпочтительно, чтобы это положение совпадало с положением исследуемых образцов во время их облучения в текущих экспериментах). Мощность дозы в референсном положении определяют, используя дозиметрические эталоны-переносчики аккредитованной калибровочной дозиметрической лаборатории. Это значение мощности дозы действительно для фиксированной геометрии облучения, для одного определенного держателя дозиметра и фиксированного положения его в радиационном поле. Если рабочий дозиметр и дозиметрический эталон-переносчик имеют существенно различную форму и размеры, конструкция держателя должна быть хорошо проработана; например, характеристики ослабления в обоих случаях должны быть схожи. Для того чтобы обеспечить определенные дозы облучения рабочих дозиметров, можно выбирать различные значения времени облучения (см. Руководство ISO/ASTM 52116).

Примечание – Сертифицированная мощность дозы должна быть измерена национальной или аккредитованной лабораторией.

7.4.3.5 *Облучение на промышленной установке* – Некоторые промышленные установки можно попытаться использовать в плане расширения сферы их применения, с тем чтобы часть их бюджета рабочего времени использовалась для радиационных исследований. В этом случае калибровочное облучение рабочих дозиметров в промышленном облучателе с использованием референсного дозиметра или дозиметрического эталона-переносчика позволит получить калибровочную кривую или функцию отклика, действительную для реальных производственных условий облучения, сохраняющихся во время калибровки. В этом методе учитывается комбинация окружающих условий, причем в такой степени, что показания референсного дозиметра или дозиметра-переносчика могут быть скорректированы в соответствии с разницей окружающих условий в калибровочной лаборатории и в промышленном облучателе (см. Руководство ISO/ASTM 51261).

7.4.3.6 *Получение функции отклика* – Из данных (экспериментальных) калибровки получают функцию, которая позволяет определять дозу по показаниям дозиметра (см. Руководства ISO/ASTM 52261 и 51707). Хотя эту функцию можно получить, используя построенный вручную график зависимости показаний дозиметра от дозы, на практике обычно используется процедура математической подгонки (регрессионный анализ), позволяющая получить аналитическую связь между показаниями дозиметра и дозой. Строго говоря, доза должна рассматриваться как независимая переменная (x). Однако это может привести к уравнению, которое трудно решить относительно дозы, которая является искомой величиной. На практике более удобно считать, что доза является зависимой переменной (переменной y). При условии, что диапазон доз не превышает одной декады, эта процедура не приведет к заметной погрешности (см. Руководство ISO/ASTM 51707 и NPL Report CIRM 29).

Примечания

1 Коммерчески доступное программное обеспечение позволяет получить решения путем обращения полиномиальных выражений, что приводит прямым путем к нужному результату с помощью нелинейной регрессии. Математические функции, которые отражают ожидаемое поведение дозиметра, могут быть инвертированы также и аналитически (см. Приложение А).

2 Вообще говоря, невозможно рекомендовать определенный тип математического выражения для представления нелинейной связи между показаниями дозиметра и дозой. Во многих случаях полиномиальная функция (например, *показания дозиметра* = $a + b \cdot$*доза* + $c \cdot$(*доза*)^2 +...) адекватно описывает искомую связь. При этом необходимо использовать показания индивидуальных дозиметров, т.е. неусредненные показания набора дозиметров, облученных одной и той же дозой. Это позволяет оценить разброс показаний различных дозиметров и увидеть «выпадающие» точки. При выборе полиномиальной функции главным моментом является использование полинома наименьшей степени, способного адекватно представлять совокупность данных. Один из наилучших методов определения порядка полинома основан на анализе распределения остатков относительно дозы для возрастающих значений степени полинома (см. CIRM 29). Следует выбирать минимальную степень полинома, при которой отсутствует систематический тренд.

3 Остаток (или ошибка) представляет собой необъясненную (или остаточную) вариацию после подбора регрессионной модели. Это разность (или левый выброс) между наблюдаемым значением переменной и значением, даваемым регрессионной моделью. «Относительный остаток» - это остаток, деленный либо на наблюдаемое значение, либо на расчетное. При математической подгонке используют не относительные остатки, а сами остатки. Сумма остатков (включая квадрат суммы остатков) является величиной, подлежащей минимизации при подборе калибровочной кривой. На графике остатков может наблюдаться упорядоченное

монотонное изменение результатов от положительных к отрицательным или наоборот. В этом случае следует увеличить порядок полинома. Выбор порядка полинома следует остановить на том значении, при котором отсутствует систематический тренд.

4 Располагая коммерчески доступным программным обеспечением, прежде чем обратиться к полиномиальному уравнению следует рассмотреть вариант использования неполиномиальных функций. Ожидаемая физико-химическая связь явлений, весьма вероятно, является неполиномиальной. Если показания дозиметра подчиняются известному математическому соотношению или физическому закону, например, логарифмическому, то следует использовать именно эту функцию или закон.

7.4.3.7 Исследователю рекомендуется поддерживать контакт с национальной метрологической лабораторией или с аккредитованной на право калибровочных работ дозиметрической лабораторией для правильной ориентировки.

8 Оценка эксплуатационных характеристик

8.1 Показывают и документируют, что экспериментальная процедура дает воспроизводимое распределение дозы в данном образце. Документация должна включать в себя описание измерительной аппаратуры и оборудования, необходимого для точного повторения эксперимента.

8.2 *Тестирование оборудования и калибровка*:

8.2.1 *Производственное оборудование* – Поглощенная доза в образце зависит от параметров эксперимента.

8.2.1.1 Тестируют необходимое оборудование и измерительную аппаратуру.

8.2.1.2 Для обеспечения гарантий того, что необходимое оборудование и измерительная аппаратура, которые участвуют в создании дозы облучения, проходят периодическую калибровку, выполняют документированную программу калибровки. Примерами таких программ являются программа калибровки таймера и программа проверки вращения поворотного стола.

8.2.2 *Измерительные приборы* –Точность определения поглощенной дозы зависит от правильной работы и калибровки аналитического оборудования при считывании показаний дозиметров.

8.2.2.1 Периодически проверяют работоспособность оборудования, с тем чтобы гарантировать функционирование в соответствии с эксплуатационной документацией. При любой модернизации или после сервисного обслуживания повторяют эту проверку прежде чем использовать оборудование в целях калибровки дозиметрической системы. Эта проверка может выполняться с использованием референсных эталонов, таких как калиброванные по плотности пропускания оптические фильтры, спектральные эталоны или калиброванные по толщине пластины, поставляемые изготовителем, а также национальной или аккредитованной лабораторией эталонов.

8.2.2.2 Работа оборудования должна периодически проверяться, а также должна проводиться его повторная калибровка.

9 Методология экспериментов и картирование дозы

9.1 *Цель* – Целью дозиметрии является оказание помощи в установлении наиболее удобной геометрии облучения образцов и продуктов, включая выбор всех ключевых параметров процесса и предоставление доказательств воспроизводимости дозы и ее распределения.

9.1.1 Поглощенная доза, полученная любой частью образца или продукта, зависит от характеристик облучателя и параметров эксперимента, таких как тип источника и его геометрия, геометрия облучения, состав и плотность продукта, а также распределение продукта.

9.2 *Картирование дозы* – Упомянутая цель достигается путем построения карты распределения поглощенной дозы по образцу; при этом может идти речь либо о единичном экземпляре продукта, такого как лук или картофель, либо о группе продуктов – например, коробке лука или картофеля. См. ASTM Руководство E2303.

9.2.1 В идеале процесс облучения должен планироваться таким образом, чтобы образец облучался равномерно. На практике в образце будут существовать определенные вариации поглощенной дозы. Картирование поглощенной дозы используется для определения величины и положения значений D_{max} и D_{min} для данного набора параметров эксперимента, включая определенную (фиксированную) референсную геометрию, которая затем должна повторяться в ходе всех экспериментов. При изменении размеров контейнера (коробки, ящика) или конфигурации продукта может потребоваться повторное измерение распределения дозы.

9.2.2 При картировании дозы дозиметры располагают по всему образцу, как на поверхности, так и внутри образца. Необходимо выбрать схемы размещения дозиметров, с помощью которых

можно обнаружить положения значений D_{max} и D_{min} (см. Руководство ASTM E2303). Некоторые дозиметры имеют вид полосок или листов, позволяя исследователю получить одно- или двумерное распределение дозы и уменьшить количество дозиметров, необходимых для получения карты доз.

Примечание — Прежде чем приступить к картированию доз исследователь должен ознакомиться с соответствующими стандартами ISO/ASTM и с научной литературой [5, 6, 9]. Дозиметрические данные, полученные в предыдущих экспериментах, или теоретические расчеты могут дать полезную информацию для определения количества и места расположения дозиметров, необходимых для процедуры картирования.

9.2.3 Пример размещения решетки из дозиметров в трехмерной структуре, которая может имитировать коробку или ящик пищевого или сельскохозяйственного продукта, представлена на рис.1. Дозиметры (представленные маленькими прямоугольниками) размещены по всей коробке для того чтобы получить карту поглощенных доз внутри коробки или ящика. При повторении процедуры картирования дозы с использованием фиксированной референсной геометрии можно установить степень воспроизводимости распределения дозы.

Примечание — При проведении исследований, связанных с подавлением паразитов, патогенных бактерий, вирусов и т.п., часто используют небольшие образцы, с тем чтобы минимизировать количество пищевого или сельскохозяйственного материала, зараженного данной биологической компонентой. Такая практика способствует ограничению распространения инфекционного биологического агента и облегчает лабораторному персоналу безопасную работу с материалом в контролируемой обстановке. Эти образцы могут иметь очень малый объем и вес. В этом случае исследователь может использовать небольшие дозиметры для получения карты поглощенных доз в незараженном материале. В тех случаях, когда материал, подлежащий облучению, имеет размеры порядка нескольких миллиметров или массу порядка нескольких граммов, дозиметры могут прикрепляться к стенкам контейнеров, содержащих образцы, и в такой конфигурации измеряется поглощенная доза.

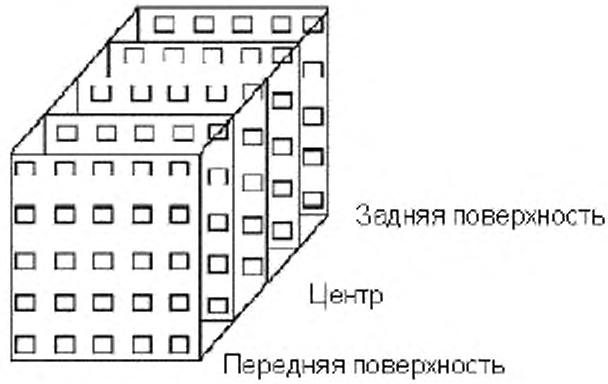

Рисунок 1 – Размещение дозиметров для картирования дозы в контейнере с продуктом в случае фотонного облучения.

Примечание — В случае облучения свободно текущей жидкости или порошкообразных образцов картирование поглощенной дозы может оказаться неосуществимым. В таких случаях допустимым вариантом являются теоретические расчеты распределения поглощенной дозы (см. Руководство ASTM E 2232). Для жидкостей практичным решением может быть подвешивание дозиметров в полужидком агаре.

9.2.4 Положения и значения D_{max} и D_{min} в образце должны быть определены по данным карты доз и занесены в отчет. В тех случаях, когда имеет место большая разница между D_{max} и D_{min} в образце, необходимо принять меры для минимизации этой разницы (см. 9.3). Если разница все же остается значительно больше неопределенности измерений дозы, следует соотнести радиационный эффект в конкретной точке образца с поглощенной дозой в этой точке.

Примечание – Например, исследователь проводит эксперименты с целью определить влияние ионизирующего излучения на развитие гнили в картофеле. Для того чтобы получить статистически достоверные данные требуется много клубней. Когда ящик (коробка) с картофелем облучается на вращающейся платформе с двух или четырех сторон, поглощенная доза меняется в некотором диапазоне значений, в результате чего клубни в центре коробки получат поглощенную дозу меньшую, чем клубни, находящиеся у стенок коробки или в ее углах. Таким образом важно, чтобы клубни не смешивались после облучения и чтобы распределение дозы внутри ящика (коробки) с картофелем было известно. Клубни аккуратно вынимаются с тем, чтобы данные

исследований отдельных клубней можно было связать с полученной поглощенной дозой и со специфическим биологическим эффектом (в данном случае с развитием гнили), который был вызван поглощенной дозой.

9.2.5 Изменения в системе перемещения продукта, а также изменения характеристик источника излучения могут влиять на распределение поглощенной дозы и поэтому требуют повторения процедуры картирования дозы.

9.3 *Неравномерность дозы*:

9.3.1 Если падающее излучение существенно ослабляется в облучаемом образце, могут образоваться большие градиенты поглощенной дозы. Равномерность дозы в образце можно улучшить путем облучения образца на вращающемся поворотном столе или же облучая его с двух или четырех сторон. Следует также рассмотреть возможность изменения конфигурации загрузки образца. Большие градиенты поглощенной дозы можно также минимизировать, уменьшая объем образца.

9.3.2 Для уменьшения эффекта низкоэнергетического рассеянного излучения от материалов вне образца следует выбирать контейнер, который по составу близок к материалу образца (например, полиэтилен, полистирол или полиметилметакрилат для биологических образцов).

9.3.3 При некоторых типах геометрии облучения, особенно когда коллимируется гамма- или рентгеновское (тормозное) излучение, поглощенная доза на поверхности образца может быть значительно меньше равновесной дозы, которая имеет место в глубине материала, равной по порядку величины максимальному пробегу вторичных электронов (около 3 мм в полимерном материале для гамма-излучения кобальта-60 и 3 – 5 мм для 5 МэВ-рентгеновского (тормозного) излучения). Для получения большей равномерности дозы внутри образца толщина стенок контейнера должна быть приблизительно равна приведенным выше значениям. Разъяснение вопросов, связанных со вторичными электронами и электронным равновесием, можно найти в [17].

9.3.4 Вариации поглощенной дозы могут быть значительными в пищевых и сельскохозяйственных продуктах, у которых плотность и состав меняются внутри продукта. Примерами служат переходы между мягкой и костной тканями или между скорлупой и мякотью фрукта. Следует предпринять попытку количественной оценки таких вариаций поглощенной дозы, помещая достаточное количество дозиметров на переходах указанного выше типа или в непосредственной близости от них.

9.3.5 В ряде случаев облучаемый образец может помещаться довольно близко к источнику излучения, что приводит к значительному градиенту поглощенной дозы около периферии образца. В таких случаях при выборе дозиметрической системы важно, чтобы эта система позволяла детектировать указанные градиенты. Получить полезную информацию о градиентах дозы позволяют малогабаритные дозиметры, а также дозиметрические полоски или листы.

9.3.6 После того как для данного экспериментального проекта установлена референсная геометрия и окончательно установлен определенный перечень параметров эксперимента, следует получить дозиметрические данные, характеризующие вариации поглощенной дозы, обусловленные статистическими флуктуациями, имеющими место в пределах нормальных условий эксперимента. Степень таких вариаций можно установить путем картирования дозы в нескольких идентичных образцах в идентичных условиях облучения. Полученные статистические вариации распределения поглощенной дозы в облучаемом образце необходимо оценить количественно и зафиксировать как часть экспериментальных результатов.

9.4 *Позиции для эксплуатационного мониторинга* – Если расположение точки D_{min} трудно доступно в ходе эксперимента, можно использовать альтернативную позицию (позиции) для эксплуатационного мониторинга дозы (см.10.2). Во время картирования поглощенной дозы следует установить связь между дозами, найденными для альтернативных позиций, и величиной D_{min}, а также показать, что эта связь воспроизводима и задокументировать результаты.

9.5 *Охлажденные или замороженные продукты* — Поглощенная доза не зависит от температуры пищевого или сельскохозяйственного продукта. Однако отклик дозиметра может зависеть от температуры. Фактически отклик почти всех дозиметров зависит от температуры, и эта зависимость часто меняется с изменением уровня поглощенной дозы и/или мощности дозы. Таким образом, при облучении охлажденных или замороженных пищевых продуктов картирование дозы может выполняться одним из следующих методов:

9.5.1 Картирование поглощенной дозы может выполняться с образцом или имитатором образца при температуре окружающей среды (комнатной температуре). При этом требуется, чтобы не было никаких изменений в любом из параметров, влияющих на поглощенную дозу при облучении пищевого или сельскохозяйственного продукта. Картирование дозы при температуре окружающей среды включает в себя размещение одного или большего числа дозиметров в позиции для эксплуатационного мониторинга (см. 9.4), которая была бы изолирована от температурных

градиентов в образце во время повседневных экспериментов. Во время проведения экспериментов с охлажденными или замороженными образцами рабочие дозиметры размещают именно в этой позиции для эксплуатационного мониторинга (см. 10.2).

9.5.2 Картирование поглощенной дозы может выполняться при температуре, до которой образец будет охлажден или заморожен во время во время реальных экспериментов, с помощью дозиметрической системы, характеристики которой известны при этой температуре или отклик которой незначительно зависит от температуры. Температура образца и дозиметров при облучении должна поддерживаться относительно постоянной (например, путем использования изолированного контейнера).

9.6 *Облучатели непрерывного потока* — Картирование поглощенной дозы, описанное в п.9.2, может быть неприменимо для продуктов, текущих в зоне облучения. В этом случае D_{max} и D_{min} оценивают, используя подходящее количество дозиметров, случайным образом смешанных с потоком и переносимых им через зону облучения [4]. Для получения статистически значимых результатов используют достаточное количество дозиметров. Альтернативным подходом является определение D_{max} и D_{min} посредством вычислений (см. ASTM E 2381).

10 Дозиметрия в ходе проведения эксперимента

10.1 *Цель* — После того как будет установлена воспроизводимость распределения поглощенной дозы при данном комплексе условий эксперимента (см. 9.3.6), в ходе эксперимента периодически проводят измерения поглощенной дозы с использованием надлежащей статистики. Неукоснительное соблюдение этого требования необходимо для подтверждения статуса надлежащей лабораторной практики (GLP).

10.2 В условиях воспроизводимых экспериментов измерения поглощенной дозы в позициях D_{max} и D_{min} или в альтернативных позициях для эксплуатационного мониторинга, установленных во время процедуры картирования дозы (см.9.4), должны быть достаточны для того, чтобы можно было указать, находятся ли условия эксперимента в рамках технических требований (см. рис. 2).

10.3 *Конфигурация загрузки образца* – В экспериментах используют ту же самую конфигурацию загрузки и геометрию облучения, которые были определены ранее (см. раздел 9).

10.4 *Выбор целевой дозы* - В протокол эксперимента обычно включают несколько целевых доз, с тем, чтобы помочь определить оптимальную для заданного процесса (или изучаемого эффекта) поглощенную дозу.

10.4.1 Существенно, чтобы выбор целевых доз учитывал реальные вариации дозы по объему образца. Таким образом, шаг (интервал/разность) последовательных целевых доз должен быть больше, чем разница между D_{max} и D_{min} для соответствующих целевых доз (см. рис.3).

10.4.2 При необходимости можно рассмотреть вопрос о применении определенных промежуточных значений доз (см. руководство ISO/ASTM 52116).

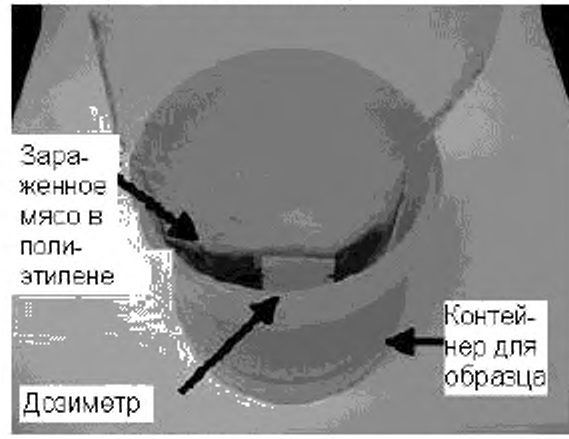

Рисунок 2 – Экспериментальная установка для облучения сырого мяса

Примечание – Эта экспериментальная установка для облучения мясного сырья, зараженного собственными мясными патогенами, была спроектирована для выявления влияния ионизирующего излучения на жизнеспособность патогенов. 100 г мясного сырья, зараженного собственными мясными патогенами, помещалась в пластмассовую капсулу, используемую для микробиологических образцов, которая в свою

очередь помещалась в вертикальном положении в центр пластикового контейнера. Карта доз для данной конфигурации образца (включающей в себя вес, размеры, плотность) была получена сначала для незараженного сырого мяса. Образец сырого мяса имел конфигурацию, улучшающую равномерность дозы. Затем, в рабочем режиме облучения, образец и контейнер устанавливались в центре поля излучения автономного гамма-облучателя с сухим хранилищем. Та же самая геометрия (референсная геометрия) использовалась во всех повторных экспериментах. Контейнер, в который помещен образец, имеет примерно ту же плотность, что и сам образец мяса. Поскольку размещение дозиметра внутри образца было бы неприемлемо с точки зрения безопасности, он прикреплялся к стенке контейнера с образцом в заранее определенном положении (положении эксплуатационного мониторинга), с тем, чтобы контролировать поглощенную дозу в ходе обычных экспериментов. Все повторные измерения сопровождают статистическим анализом.

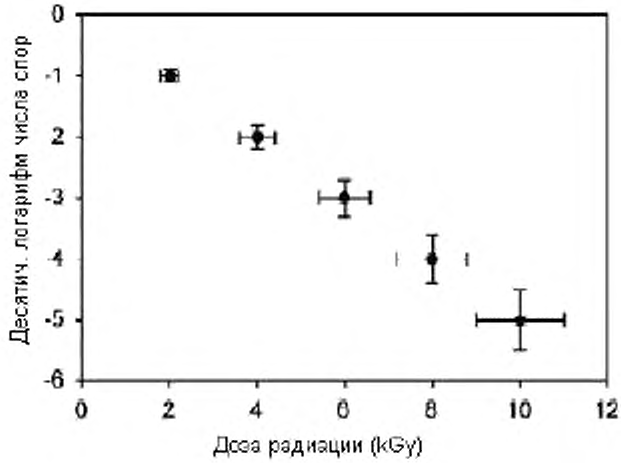

Рисунок 3 – Выбор шага целевой дозы

Примечание — Пример выбора ширины шага для целевой дозы. На графике представлено уменьшение жизнеспособности бактериальных спор, инокулированных в пищевой продукт, как функция от дозы ионизирующего излучения. Заметим, что эксперимент был поставлен таким образом, что линии ошибки измерения поглощенной дозы, включая D_{max} и D_{min}, не перекрываются. Графики зависимости эффекта от дозы могут быть либо линейными, либо нелинейными в зависимости от типа исследуемого эффекта.

10.5 *Влияние внешних условий* – Поскольку отклик дозиметра подвержен влиянию внешних условий, должны быть приняты меры, обеспечивающие совпадение этих условий во время экспериментов и во время калибровочного облучения дозиметров. Измеренное значение отклика дозиметра корректируют, с тем чтобы учесть любые известные эффекты, например, такие, как влияние температуры. Необходимо уделить внимание установке и хранению дозиметров до и после облучения (см. руководство ISO/ASTM 51261 и другие руководства ISO/ASTM по использованию специальных дозиметрических систем).

10.6 *Охлажденные и замороженные пищевые продукты* – Используют дозиметрическую систему, которая проверялась при той же температуре, при которой проводится эксперимент, или же такую, которая слабо реагирует на изменения температуры. Если используется дозиметрическая система, которая сильно реагирует на изменения температуры, рабочие дозиметры помещают в точки эксплуатационного мониторинга, которые изолированы от температурного градиента (см. 9.4 и 9.5). См. руководство ISO/ASTM 51261 и руководства по применению индивидуальных дозиметрических систем, перечисленных в 2.1 и 2.2.

10.7 *Геометрия непрерывного потока* — Для некоторых типов облучателей непрерывного потока (например, когда имеют дело с непрерывным потоком жидкости или гранул) может оказаться невозможным в ходе эксперимента поместить дозиметры в позициях D_{max} и D_{min}. В этом случае вводят несколько дозиметров, случайным образом смешанных с продуктом и переносимых им через зону облучения в начале экспериментального прогона. При длительном прогоне через зону облучения дозиметры добавляют в середине и ближе к окончанию экспериментального прогона. Для каждой серии поглощенной дозы требуется несколько дозиметров, с тем, чтобы гарантировать получение

истинных значений D_{max} и D_{min}. При этой процедуре требуется, чтобы дозиметры проходили через зону облучения по тому же пути, что и экспериментальный образец [4].

10.8 Следует использовать статистический анализ текущих измерений поглощенной дозы, чтобы отследить возможные непредвиденные изменения в ходе эксперимента.

Примечание — При представлении исследователями результатов экспериментов либо в виде технических отчетов, либо рецензируемых публикаций в научных журналах необходимо приводить величины статистических вариаций дозы, имеющих место в экспериментальной системе. Это относится к вариациям отклика дозиметра для данного набора дозиметров или к вариациям между результатами повторных экспериментов, в которых используется референсная геометрия для данного пищевого или сельскохозяйственного продукта. В дополнение к характеристикам пищевого или сельскохозяйственного продукта, подлежащего облучению (pH, плотность, возраст, жизнестойкость, активность воды, температура продукта в ходе эксперимента и т.д.), необходимо приводить дозиметрические данные, включающие значения D_{max} и D_{min}. Хотя это и невозможно для очень малых образцов, лучшим вариантом представления результатов является включение в отчет графических данных (карты доз), касающихся вариаций поглощенной дозы, которые имеют место внутри облучаемого образца. Для оценки погрешности, связанной с вариациями и флуктуациями в ходе эксперимента, используют статистические характеристики, такие как стандартная погрешность среднего или стандартное отклонение и доверительные интервалы. Эта статистическая информация является неполной, если не указано число наблюдений.

11 Документация

11.1 Фиксируют, когда это уместно, и включают в отчет следующую информацию:

11.1.1 Тип облучателя и вид (виды) радиации, излучаемой источником;

11.1.2 Для ускорителей сообщают наиболее вероятную энергию (включая также данные о фильтрации, если она есть), ток пучка и установленные значения напряжения в ускорителе, скорость конвейера или скорость транспортировки продукта. Для рентгеновских (тормозных) установок указывают положение мишени;

11.1.3 Расстояние между источником и поверхностью или центром облучаемого образца;

11.1.4 Физические данные облучаемого образца, например, размеры, масса, состав;

11.1.5 Характеристики контейнера или устройства для удержания образца во время облучения;

11.1.6 Геометрия источника, включая распределение радионуклидов (при необходимости);

11.1.7 Вариация мощности дозы (или поглощенной дозы) внутри образца;

11.1.8 Температура и атмосферные условия, поддерживаемые вблизи образца в процессе облучения;

11.1.9 Тип(ы) и идентификационный(е) номер(а) применяемых дозиметров, включая их конструктивное оформление и положение в образце

11.1.10 Описание функции отклика или калибровочной кривой дозиметрической системы, отвечающей фактическим условиям эксперимента, с указанием ее прослеживаемости до национальных и международных эталонов;

11.1.11 Содержание влаги и pH образца;

11.1.12 Число повторений эксперимента;

11.1.13 Полное описание образца, подлежащего облучению, например, сорт, разновидность, стадия жизни насекомых или простейших, фаза роста бактерий. При облучении фруктов в описание включают ассортимент, возраст, жизнестойкость, спелость, зрелость, цвет, свидетельства фитотоксических явлений (если есть), метод, длительность и температуру хранения до и после облучения. При облучении мяса или птицы точно указывают облучаемый продукт, указывают, содержались ли кости, указывают форму нарезки, возраст, жестокость способа забоя, метод хранения и/или транспортировки, физические размеры. В общем, включают подробности, касающиеся факторов, которые, как было замечено, влияют на качество продукта при любой другой технологии обработки;

11.1.14 Описание упаковки или упаковочных материалов, которые находятся в контакте с образцом.

11.2 Лаборатория сохраняет записи о всех оригинальных наблюдениях, вычислениях, полученных данных и данных калибровки. Записи должны содержать информацию достаточную для воспроизведения каждого измерения и соответствующих вычислений. Эти записи включают в себя сведения о персонале, участвовавшем в измерениях или вычислениях.

12 Неопределенность измерений

12.1 Измерения поглощенной дозы имеют смысл, если они сопровождаются оценкой неопределенности.

12.2 Составляющие неопределенности должны быть отнесены к одной из двух категорий:

12.2.1 Тип А − Оценивание статистическими методами, или

12.2.2 Тип В − Оценивание другими методами.

12.3 Для классификации неопределенностей широко применяются и другие способы, которые также могут быть полезны в отчете по поводу неопределенности. Например, для описания различных категорий неопределенности используют термины «точность», а также «случайная погрешность» и «систематическая погрешность».

Примечания

1 Отнесение неопределенностей к типу А или типу В основано на методике оценки неопределенностей, опубликованной в 1995 г. Международной организацией по стандартизации (ISO) в Руководстве по выражению неопределенности измерений [18]. Цель этого документа заключается в том, чтобы способствовать пониманию того, как развиваются концепции неопределенности, и создать основу для сравнения результатов измерений в международном масштабе.

2 Руководство ISO/ASTM 51707 определяет возможные источники неопределенности в дозиметрии, проводимой на установках для радиационной обработки, и предлагает процедуры оценки величин результирующих неопределенностей при измерении поглощенной дозы с помощью дозиметрической системы. Документ содержит определения и пояснения основных концепций измерения, включая оценку измеренного значения некоторой величины, «истинное» значение, погрешность и неопределенность. Обсуждаются составляющие неопределенности и методы, позволяющие оценить значения этих составляющих. Предлагаются также методы вычисления суммарной стандартной неопределенности и оценки расширенной (полной) неопределенности.

Приложение А

А.1 Компьютерное программное обеспечение

А.1.1 Сложность вычислений, необходимых для подгонки модели калибровки и оценки поглощенной дозы неизбежно приводит к использованию компьютерных программ для выполнения этих вычислений. Существует много коммерчески доступных пакетов программ, позволяющих выполнять некоторые или все представляющие интерес вычисления.

А.1.2 Примерами пакетов программ являются общие статистические пакеты такие как SAS, Statistica, Statlab, Stata, Sigman Stat или Minitab; специализированные пакеты/языки такие как MathCad, Splus или GraphPad или программы для повседневных нужд, встроенные в электронные таблицы, такие как Excel.

А.1.3 Многие статистические пакеты предполагают, что данные скомпонованы в независимые (X,Y) пары. Для таких статистических пакетов структура данных, возникающая при калибровке дозиметра, когда одно значение X используется для многих значений Y, является нетипичной. По этой причине хорошее качество результатов вычислений не может быть достигнуто с помощью только стандартных опций программы; оно достигается некоторым комбинированием надлежащим образом выбранных элементов стандартного вывода, обеспечиваемого данной программой. Для проведения такой работы необходимо детальное понимание обоих методов расчета, т.е. как выполняемого данным статистическим пакетом, так и реально требуемого для обработки результатов.

А.1.4 Большинство статистических пакетов не имеют программ численного обращения (инвертирования) необходимых для оценки поглощенной дозы и неопределенности поглощенной дозы. Эта операция рассматривается как математическая функция и, соответственно, ее можно найти в более математически ориентированных пакетах, таких как *MathCad* или *MatLab* или среди математических функций электронных таблиц.

А.1.5 При выполнении калибровки дозиметра и оценке дозы с использованием статистических пакетов общего назначения и/или электронных таблиц может возникнуть необходимость в объединении нескольких выходных данных для проведения представляющих интерес вычислений.

Библиография

[1] Codex General Standard for Irradiated Foods (CODEX STAN 106-1983, Rev. – 2003) and Recommended International Code of Practice for Radiation Processing of Food (CAC/RCP 19-1979, Rev. – 2003), Codex Alimentarius, Food and Agriculture Organization and World Health Organization, Rome, 2003

[2] Preservation of Food by Ionizing Radiation, Vols 1–3, Josephson E. S., and Peterson M. S., eds., CRC Press, Boca Raton, FL, 1983

[3] McLaughlin W. L., Jarrett, Sr., R. D., and Olejnik T. A., Dosimetry, Preservation of Food by Ionizing Radiation, Vol. 1, CRC Press, Boca Raton, FL, 1983, chap. 8

[4] Ehlermann D. A. E., Dose Distribution and Methods for its Determination in Bulk Particulate Food Materials, Health Impact, Identification, and Dosimetry of Irradiated Food, Bögl K. W., Regulla D. F., and Suess M. J., eds., A World Health Organization Report, Institut für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Munchen, 1988, pp. 415–419

[5] Farkas J., Irradiation of Dry Food Ingredients, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1988

[6] Food Irradiation, a Technique for Preserving and Improving the Safety of Food, ISBN: 9241542403, A World Health Organization Report, Geneva, 1988

[7] Diehl., J.F., Safety of Irradiated Food, CRC Press, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, NY, USA, 1995

[8] Food Irradiation: Principles and Applications, Molins R.A., ed., John Wiley & Sons, New York, NY, 2001

[9] Dosimetry for Food Irradiation, Technical Reports Series No. 409, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002

[10] Urbain W. M., Food Irradiation, Academic Press, Inc., New York, 1986.

[11] ANSI N433.1-1978, Safe Design and Use of Self-Contained, Dry Storage Gamma Irradiators, American National Standards Institute, 1430 Broadway, New York, NY, 10018

[12] ANSI/HPS N43.15-2001, American National Standard, Safe Design and Use of Self-Contained Wet Source Storage Gamma Irradiators (Category III), American National Standards Institute, 1430 Broadway, New York, NY, 10018

[13] ANSI/HPS N43.10-2001, American National Standard, Safe Design and Use of Panoramic, Wet Source Storage Gamma Irradiators (Category IV) and Dry Source Storage Gamma Irradiators (Category II), American National Standards Institute, 1430 Broadway, New York, NY, 10018

[14] Hand Book of Chemistry and Physics, 89th ed, CRC Press, Boca Rat, FL, 2009

[15] Unterweger M. P. (2003), Radionuclide Half-life Measurements at the National Institute of Standards and Technology (version 3.0), available online: http:/physics.nist.gov/Halflife (2009, Febtuary 20), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA

[16] Hartshorn A., Mackay G., Spender M., and Thomson I., Absorbed Dose Mapping in Self-Shielded Irradiators Using Direct Reading MOSFET Dosimeters, presented at Health Physics Society Annual Meeting, July, 1995, Available from Thomson and Nielsen Electronics, 25E Northside Road, Nepean, Ontario, Canada K2H8S1

[17] Radiation Dosimetry, Vol 1, Attix F. H., and Roesch W. C., eds., Academic Press, New York and London, 1968

[18] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, 1995, ISBN 92-67-10188-9

УДК 664:539.1.047:539.1.06:006.354 ОКС 17.240
67.020

Ключевые слова: поглощенная доза, картирование поглощенной дозы, измерение поглощенной дозы, тормозное излучение, дозиметрическая система, электронный пучок, пищевой продукт, пищевые и сельскохозяйственные продукты, гамма-излучение, гамма-лучи, ионизирующее излучение, неопределенность измерений, радиационные исследования, рабочий дозиметр, рентгеновское излучение, рентгеновский луч

Подписано в печать 01.04.2014. Формат 60x84 1/8.
Усл. печ. л. 2,79. Тираж 31 экз. Заказ 1608

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»,

123995 Москва, Гранатный пер., 4.

info@gostinfo.ru

gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru