

Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение

А.Н. Павлов¹, Т.В. Чиж¹, А.С. Снегирев¹, Н.И. Санжарова¹, А.П. Черняев^{2,3}, П.Ю. Борщеговская², В.С. Ипатова², Ю.А. Дорн¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В настоящем обзоре приведены основные виды и технические характеристики источников ионизирующего излучения, применяемых в настоящее время для радиационной обработки пищевых продуктов. Рассматривается понятие поглощенной дозы ионизирующего излучения в контексте технологических целей такой обработки. Представлены сведения об основных дозиметрических системах, используемых в современной практике дозиметрического контроля, а также критерии их калибровки, обсуждается построение распределения поглощенной дозы по продукту при проведении его радиационной обработки. Перечислены международные нормативные документы по использованию дозиметрических систем, а также приводится информация о современном состоянии отечественной нормативно-правовой базы в области дозиметрии обработки продуктов ионизирующим излучением.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, поглощенная доза, распределение дозы, дозиметрические системы, радиационная обработка, нормативные документы.

Введение

В настоящее время одной из ключевых проблем продовольственной безопасности является разработка эффективных технологий обработки пищевой продукции, обеспечивающих, с одной стороны, улучшение и сохранение качества, а с другой – продление сроков хранения и реализации. Существующие технологии обработки основаны на использовании химических веществ, потенциально опасных для здоровья человека и окружающей среды. Одним из перспективных направлений является применение физических факторов, в частности, ионизирующего излучения, в технологиях производства, переработки и хранения пищевой продукции [1–4]. В различных странах функционирует более 500 специализированных центров по радиационной обработке различных видов пищевой продукции. Данная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами [5, 6]. Основными направлениями применения технологий являются: обеспечение микробиологической безопасности пищевых продуктов и снижения потерь при хранении в результате подавления микроорганизмов порчи; увеличение сроков хранения (реализации) продукции при задержке

прорастания клубне- и корнеплодов и ингибировании созревания свежих фруктов и овощей; фитосанитарная обработка специй, пряностей, сухофруктов и др.; радиационная дезинсекция зерновых культур, круп, бобовых для уничтожения паразитов, насекомых-вредителей и их личинок.

Нормативная база по облучению пищевой продукции создавалась основными международными организациями под эгидой Международной продовольственной организации ООН (ФАО), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [7]. В 1983 г. был принят основополагающий нормативный документ CODEX STAN 106-1983¹ «Общий стандарт на пищевые продукты, обработанные проникающим излучением», который регламентирует допустимые к использованию источники ионизирующего излучения, правила гигиены, управление процессом и технологические требования, а также определяет порядок действий при проверке продукции после облучения. Международной консультативной группой по облучению продуктов питания (ICGFI) был разработан ряд документов по радиационной обработке конкретных ви-

¹ CAC (Codex Alimentarius Commission). Codex General Standard for Irradiated Foods. CODEX STAN 106-1983. 2003. Rev.1.

Чиж Тарас Васильевич

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

Адрес для переписки: 249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: taras.chizh@rambler.ru

дов пищевых продуктов с рекомендациями о верхнем пороге применяемой дозы облучения с учетом достижения необходимой технологической цели; требований к видам установок и дозиметрии процесса облучения [8].

На территории Российской Федерации и стран-членов Евразийского экономического союза базовым нормативным документом, учитывающим международные требования, является ГОСТ ISO 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением»².

В CODEX STAN 106-1983 определено, что при облучении любого продукта максимальная «общая средняя доза» должна составлять не более 10 кГр. Максимально допустимое значение поглощенной дозы в пищевой продукции основано на токсикологических данных. Для ряда категорий продуктов определены диапазоны доз ионизирующего излучения, которые обеспечивают достижение необходимых параметров целей обработки, в частности, микробиологической или фитосанитарной безопасности, и не приводят к изменению физико-химических и органолептических свойств обрабатываемой продукции. Необходимое значение поглощенной дозы в облучаемой продукции варьирует в зависимости от целей обработки и условий ее проведения [8]. В связи с этим большое значение имеет вопрос использования различных дозиметрических систем для контроля процесса радиационной обработки. На сегодняшний день разработан и регламентирован международными и национальными стандартами ряд методов дозиметрии, базирующихся на различных физико-химических принципах.

В настоящем обзоре представлены: виды и технические характеристики источников ионизирующего излучения, применяемых для радиационной обработки пищевых продуктов; основные дозиметрические системы, используемые в современной практике дозиметрического контроля; нормативные документы по использованию дозиметрических систем и современное состояние отечественной нормативно-правовой базы.

1. Характеристика источников излучения

Для радиационной обработки пищевых продуктов разрешено применять установки со следующими видами ионизирующего излучения:

- электронное излучение с энергией не более 10 МэВ;
- γ -излучение радиоизотопа ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,27$ года, $E = 1,25$ МэВ);

– γ -излучение радиоизотопа ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ года, $E = 0,66$ МэВ);

– рентгеновское (тормозное) излучение, генерируемое ускорителями электронов с энергией не более 5 МэВ.

Ограничение верхнего энергетического предела для электронного и тормозного излучений связано с тем, что при указанных энергиях не происходят процессы образования радиоактивных изотопов в продукте [9].

Каждый вид излучателя, генерирующий перечисленные типы излучений, имеет собственные характеристики. Для ускорителей электронов основными характеристиками являются энергетический спектр электронов, ток пучка и, в зависимости от конструкции, мгновенный (импульсный) ток с указанием длительности импульса и частоты следования^{3,4}, для рентгеновской установки – напряжение между электродами, ток трубки, материал анода, его толщина; спектр рентгеновского излучения⁵.

Для установок с гамма-источниками, состоящих из герметизированных элементов и представляющих собой, как правило, набор стержней и образующих плоскую или цилиндрическую решетку или несколько таких решеток, содержащих внутри изотопы ^{60}Co (^{137}Cs), основными характеристиками являются тип облучателя, активность источника и геометрия гамма-излучателя, а также спектр излучения⁶.

Выбор типа излучения и его источника при проведении радиационной обработки зависит от вида продукции, а также от целей обработки. При использовании гамма-установок облучение продукции происходит в промышленных упаковках, обеспечивается облучение больших объемов продукции с соблюдением технологически рекомендуемого верхнего предела значений поглощенной дозы. Основной проблемой использования установок с радиоактивными источниками является потребность в корректировке технологического процесса облучения в зависимости от распада радионуклидов и периодическая замена источников излучения ^{60}Co (^{137}Cs).

Основное преимущество ускорителей с электронным и рентгеновским (тормозным) излучением – они генерируют ионизирующее излучение только во включенном состоянии.

Мощность пучка электронов плавно регулируется от 0 до максимальной, у них нет спада активности излучения вследствие идущего процесса распада, они не требуют, в отличие от гамма-установок, регулярной дозагрузки новыми источниками ионизирующего излучения. Основной проблемой ускорителей электронов является относи-

² ГОСТ ISO 14470-2014. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением. Введ. 2016-01-01 [GOST ISO 14470-2014. Food irradiation. Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food. Introduced on 2016-01-01. (In Russ.)]

³ ISO/ASTM 51818:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 80 and 300 keV.

⁴ ISO/ASTM 51649:2015. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV.

⁵ ISO/ASTM 51608:2015. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an X-ray (bremsstrahlung) facility for radiation processing at energies between 50 keV and 7.5 MeV.

⁶ ISO/ASTM 51702:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for dosimetry in gamma irradiation facilities for food processing.

тельно небольшая проникающая способность электронного пучка. Проникающая способность зависит от энергии электронов и плотности облучаемого продукта (чем выше плотность вещества, тем меньше глубина проникновения). Для обработки продуктов питания с высокой плотностью энергии электронов 5 или даже 10 МэВ может быть недостаточно. В таком случае можно применять обработку тормозным излучением, но при этом энергия электронов ограничивается 5 МэВ, и значительно возрастает, по сравнению с гамма-установками, себестоимость облучения [10].

2. Физические характеристики радиационной обработки

Поглощенная доза

Метод базируется на ионизации и возбуждении атомов вещества вследствие передачи ему энергии излучения. Интенсивность физико-химических процессов, запускаемых излучением, зависит от его физических характеристик, таких как тип и энергия воздействующих частиц, переданная объему продукта энергия, интенсивность излучения, линейная передача энергии излучения, линейная плотность ионизации и др. [11]. Не вся переданная энергия расходуется в пределах данного объема. Та часть энергии, которая остается в рассматриваемом объеме, составляет поглощенную энергию. Средняя поглощенная энергия рассматривается как детерминированная величина, а ее величина рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta E = \sum \varepsilon_{in} - \sum \varepsilon_{out} + \sum Q_1 - \sum Q_2, \quad (1)$$

где $\sum \varepsilon_{in}$ – сумма кинетических энергий всех частиц, как непосредственно, так и косвенно ионизирующих, входящих в рассматриваемый объем; $\sum \varepsilon_{out}$ – суммарная кинетическая энергия всех частиц, покинувших данный объем; $\sum Q_1$ – суммарная выделившаяся в результате

ядерных превращений энергия; $\sum Q_2$ – суммарная затраченная на ядерные превращения энергия.

Для обработанных ионизирующим излучением продуктов питания формула (1) принимает вид (2), т.к. используемые в радиационном методе энергии не инициируют ядерные превращения:

$$\Delta E = \sum \varepsilon_{in} - \sum \varepsilon_{out}, \quad (2)$$

Важнейшей характеристикой радиационного метода является доза D , поглощенная объектом обработки. Она равна отношению средней энергии dE , поглощенной элементарным объемом dV , к массе dm вещества в этом объеме [11]:

$$D = \frac{dE}{dm} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}, \quad (3)$$

Точное измерение дозы, поглощенной продуктом, необходимо для определения и контроля оптимальных параметров радиационной обработки. В таблице 1 приведены классы различных пищевых продуктов с указаниями максимально применяемых значений доз для достижения конкретных целей облучения [12].

Распределение поглощенной дозы по объему продукта

При проведении радиационной обработки важно контролировать не только интегральную дозу, но и ее распределение по объему продукта. Различные режимы обработки предполагают отличные друг от друга дозовые распределения по глубине обрабатываемого объекта. Также необходимо учитывать такие параметры, как движение конвейера во время облучения, энергию излучения, схему, геометрию образцов, их плотность и т.п.

Схема облучения продукции на электронном ускорителе включает: расположение объекта в форме параллелепипеда; конвейерную ленту, движущуюся со скоростью $V_{\text{конв}}$; два источника электронного излучения от ускорителей электронов с энергией 10 МэВ (рис. 1) [8].

Технологически рекомендуемые пределы поглощенных доз

Таблица 1

[Table 1]

Authorization of irradiation by classes of food and advisory technological dose limits

Классы пищевых продуктов [Classes of food]	Цель облучения [Main purposes of food irradiation]	Максимальная доза, кГр [Maximum dose, kGy]
Класс 1: Луковицы, корнеплоды, клубни [Class 1: Bulbs, roots, tubers]	Замедление прорастания в процессе хранения [Sprout inhibition in storage]	0,2
Класс 2: Свежие фрукты и овощи, не включенные в 1 класс [Class 2: Fresh fruits and vegetables, not included in class 1]	Замедление созревания	1,0
	Уничтожение насекомых	1,0
	Увеличение срока хранения	2,5
	Карантинный контроль импортируемой и экспортируемой сельскохозяйственной продукции [Inhibition of ripening Insect disinfection Shelf-life extension Quarantine treatment for import and export trade]	1,0
Класс 3: Зерно злаковых и мука, орехи, семена масличных культур, бобовые, сушеные фрукты [Class 3: Cereals and flours, nuts, oilseeds, legumes, dried fruits]	Уничтожение насекомых	1,0
	Снижение количества микроорганизмов [Insect disinfection Microbial decontamination]	5,0

Классы пищевых продуктов [Classes of food]	Цель облучения [Main purposes of food irradiation]	Максимальная доза, кГр [Maximum dose, kGy]
	Снижение количества определенных патогенных микроорганизмов	5,0
	Увеличение срока хранения	3,0
Класс 4: Рыба, морепродукты (свежие или замороженные) и продукты их переработки [Class 4: Fish, seafood (fresh or frozen), and processed foods]	Контроль заражения паразитами в продукции, поставляемой на внутренний рынок [Microbial pathogen decontamination Shelf-life extension Microbial pathogen control in products sold on the domestic market]	2,0
	Сокращение количества патогенных микроорганизмов	7,0
	Увеличение срока хранения	3,0
Класс 5: Сырое мясо птицы, говядина, свинина (свежее или замороженное) и продукты их переработки [Class 5: Raw poultry, beef, pork (fresh or frozen), and processed foods]	Контроль заражения паразитами в продукции, поставляемой на внутренний рынок [Microbial pathogen decontamination Shelf-life extension Microbial pathogen control in products sold on the domestic market]	2,0
Класс 6: Сухие овощи, специи, приправы, корма для животных, сухие травы и травяные чаи [Class 6: Dry vegetables, spices, condiments, animal feeds, dry herbs, and herbal teas]	Снижение количества патогенных микроорганизмов	10,0
	Уничтожение насекомых [Microbial pathogen decontamination Insect disinfection]	1,0
Класс 7: Сухие продукты животного происхождения [Class 7: Dry products of animal origin]	Дезинфекция	1,0
	Сдерживание роста плесеней [Disinfection Mold growth control]	3,0
Класс 8: Смешанная пища (космическая и больничная еда, армейские рационы, специи и др.) [Class 8: Mixed food (space and hospital food, army rations, spices, etc.)]	Снижение количества микроорганизмов	>10
	Стерилизация	>10
	Карантинный контроль импортируемой и экспортируемой сельскохозяйственной продукции [Microbial decontamination Sterilization Quarantine treatment for import and export trade]	>10

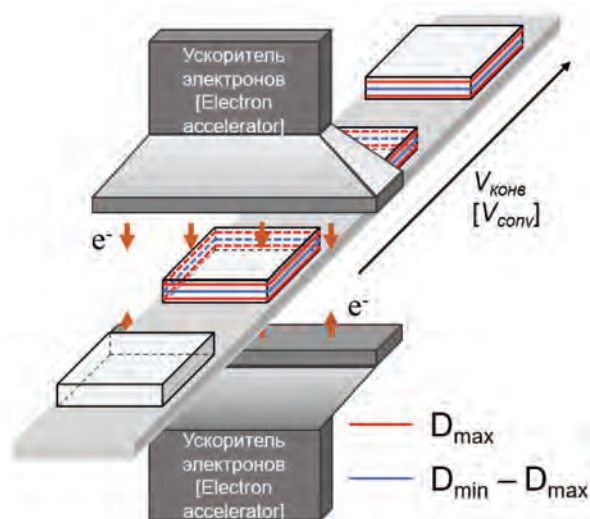


Рис. 1. Технология обработки электронным излучением
[Fig. 1. The technology for electron irradiation processing]

Варьируя скорость конвейера $V_{\text{конв}}$ и ток пучка электронов, можно контролировать интегральную дозу, поглощенную продуктом.

Схема облучения продукции на гамма-установке включает: расположение объекта в форме куба, движущегося вместе с конвейерной лентой со скоростью $V_{\text{конв}}$ и облучаемого с двух противоположных сторон источником гамма-излучения, содержащим несколько источников ^{60}Co или ^{137}Cs (рис. 2).

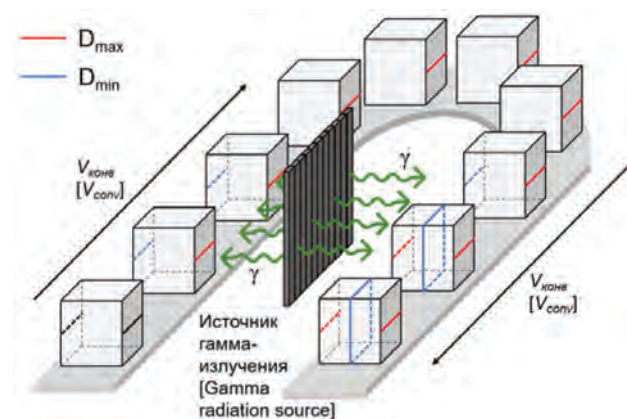


Рис. 2. Технология обработки гамма-излучением
[Fig. 2. The technology for gamma radiation processing]

На распределение дозы по объему продукта влияют не только характеристики установки, плотность продукта, но также размеры и геометрия упаковки.

Таким образом, интегральная доза, поглощенная продуктом, ее распределение по объему зависят от физических параметров радиационной обработки (энергия источника излучения; тип источника и его геометрия; технология облучения; плотность, размеры и геометрия упаковки). Указанные параметры являются основными составляющими эффективности процесса облучения [13–16].

3. Дозиметрические системы, применяемые при радиационной обработке

Целью дозиметрии при разработке регламента радиационной обработки является установление оптимальной геометрии облучения продуктов, включая выбор всех ключевых параметров процесса и предоставление доказательств воспроизводимости дозы и ее распределения. Выбор и использование конкретных измерительных систем дозиметрии должны обосновываться с учетом диапазона доз, типа излучения, максимально возможной эффективности облучения для достижения заданной технологической задачи.

Классификация дозиметрических систем

Для каждого метода дозиметрии существует свой рабочий диапазон доз и метод анализа, дающий достоверный и точный, в пределах погрешности, результат дозиметрических исследований.

В таблице 2 приведены используемые в современной практике дозиметрические системы, методы анализа полученных системой данных, рекомендуемые к применению рабочие диапазоны доз, а также погрешности дозиметрических приборов⁷.

Калибровка систем дозиметрии

Выбор и использование дозиметрических систем осуществляются с учетом диапазона доз, типа излучения, а также влияния таких факторов, как мощность дозы, требуемый уровень погрешности измерений и пространственное разрешение. Дозиметры, применяемые в ходе радиационной обработки, должны быть откалиброваны в соответствии национальными стандартами ISO/ASTM 51261:2013, с использованием специальной калибровочной функции с поглощенной дозой в качестве аргумента.

Процедура калибровки заключается в облучении дозиметров в определенном диапазоне доз, считывании показаний с помощью калиброванного измерительного прибора и построении функции отклика (калибровочной функции). Существует несколько основных методов калибровки дозиметров [8].

Картирование поглощенной дозы при радиационной обработке

Целью картирования является определение областей продукта, где достигаются максимальные и минимальные значения поглощенной дозы и их связи со значениями поглощенной дозы в тех точках, которые используются для мониторинга значений дозы в процессах обработки продукта.

При картировании дозиметры следует размещать по всему образцу, как на поверхности, так и внутри образца, если это возможно. Для построения качественной карты дозы в объеме продукта необходимо выбирать схемы размещения дозиметров так, чтобы можно было максимально точно обнаружить положения минимальных и максимальных значений доз [8]. При картировании учитываются: характеристики объекта облучения; схемы перемещения и конфигурация контейнера; физико-технические характеристики облучателя; анализ результатов измерений дозы и

Дозиметрические системы, методы их анализа и рекомендуемые дозы

Таблица 2

[Table 2]

Dosimetry Systems and Their Limits of Applicability				
Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Метод анализа [Method of analysis]	Рабочий диапазон, Гр [Radiation dose range, Gy]	Погрешность [Uncertainty]	Название стандарта [Standards products]
Дозиметр Фрике [Fricke dosimeter]	УФ-спектрофотометрия [UV/VIS Spectrophotometry]	2·10 ⁻² – 4·10 ²	1%	ASTM E 1026 ⁸
Цериевый дозиметр [Ceric-cerous sulfate dosimeter]	УФ-спектрофотометрия [UV/VIS Spectrophotometry]	5·10 ⁻² – 5·10 ⁴	3%	ISO/ASTM 51205 ⁹
Дихромат серебра [Dichromate dosimeter]	УФ- или оптическая спектрофотометрия [UV/VIS or optical Spectrophotometry]	2·10 ³ – 4·10 ⁴	1%	ISO/ASTM 51401 ¹⁰

⁷ ISO/ASTM 51261:2013. Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing.

⁸ ASTM E1026-13. American society for testing and materials, Standard practice for using the Fricke reference standard dosimetry system.

⁹ ISO/ASTM 51205:2017. International organization for standardization, American society for testing and materials, Standard practice for use of the ceric-cerous sulphate dosimetry system.

¹⁰ ISO/ASTM 51401:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of a dichromate dosimetry system.

Дозиметрическая система [Dosimetry system]	Метод анализа [Method of analysis]	Рабочий диапазон, Гр [Radiation dose range, Gy]	Погрешность [Uncertainty]	Название стандарта [Standards products]
Этанол-хлорбензол (ECB-дозиметр) [Ethanol-Chlorobenzene (ECB) dosimeter]	Цветовое титрование, ВЧ-осциллометрия [Color titration, High-frequency titration]	10 – 2·10 ⁶	3%	ISO/ASTM 51538 ¹¹
L-аланин [Alanine-EPR dosimeter]	ЭПР-спектрометрия [EPR spectrometry]	1 – 1,5·10 ⁵	0,5%	ISO/ASTM 51607 ¹²
Полиметилметакрилат (PMMA) [Polymethyl methacrylate (PMMA) dosimeter]	УФ- или оптическая спектро- фотометрия [UV/VIS or optical Spectrophotometry]	10 ³ – 5·10 ⁴	4%	ISO/ASTM 51276 ¹³
Радиоохромная пленка FWT-60 [Radiochromic film FWT-60]	Оптическая спектрофотометрия [Optical spectrophotometry]	10 ³ – 10 ⁵	3%	ISO/ASTM 51275 ¹⁴
Радиоохромная пленка В3 [Radiochromic film В3]	Оптическая спектрофотометрия [Optical spectrophotometry]	10 ³ – 10 ⁵	3%	ISO/ASTM 51275
Калориметрия [Calorimetry]	Измерение сопротивления/ температуры [Resistance / temperature measurement]	10 ² – 5·10 ⁴	2%	ISO/ASTM 51631 ¹⁵
Триацетат целлюлозы [Cellulose Triacetate (CTA) dosimeter]	УФ-спектрофотометрия [UV/VIS Spectrophotometry]	10 ⁴ – 3·10 ⁵	3%	ISO/ASTM 51650 ¹⁶
Термолюминесцентный дозиметр (TLD) [Thermoluminescence dosimeter (TLD)]	Термолюминесцентное датирование [Thermoluminescence dating]	1 – 10 ⁴	2%	ISO/ASTM 51956 ¹⁷
LiF (литий-фтор) пленочный дозиметр [LiF photo-fluorescent film dosimeter]	Оптически-стимулированная люминесценция [Optically stimulated luminescence]	50 – 3·10 ⁵	3%	ASTM E 2304 ¹⁸

оценка погрешности измерений; расположение областей в объекте облучения, где достигаются значения минимальной дозы и максимальной дозы; диапазон времени для целевых диапазонов доз; коэффициенты между значениями минимальной и максимальной дозы, измеренными эталонным и рабочим дозиметрами; пределы доз для эталонного и рабочего дозиметров; тип, расположение и частота

расположения дозиметров, которые используются в ходе обработки данного типа продукции¹⁹.

После составления карты доз устанавливается взаимосвязь между значениями измеряемых доз и физико-техническими характеристиками работы облучателя. Полученную карту дозовых полей используют во время эксплуатационной аттестации объекта обработки, когда

¹¹ ISO/ASTM 51538:2017. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of the ethanol-chlorobenzene dosimetry system.

¹² ISO/ASTM Standard 51607:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of the alanine-EPR dosimetry system.

¹³ ISO/ASTM 51276:2012. International organization for standardization, American society for testing and materials, Standard practice for use of a polymethylmethacrylate dosimetry system.

¹⁴ ISO/ASTM 51275:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of a radiochromic film dosimetry system.

¹⁵ ISO/ASTM 51631:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of calorimetric dosimetry systems for electron beam dose measurements and dosimeter calibrations.

¹⁶ ISO/ASTM 51650:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Standard practice for use of cellulose acetate dosimetry systems.

¹⁷ ISO/ASTM 51956:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for use of a thermoluminescence – dosimetry system (TLD system) for radiation processing.

¹⁸ ASTM E2304-03(2011). American society for testing and materials, Standard practice for use of a LiF photo-fluorescent film dosimetry system.

¹⁹ ISO/ASTM 52303:2015. Guide for absorbed-dose mapping in radiation processing facilities.

облучение выполняется с однородным материалом, и во время аттестации производительности – когда облучение выполняется с неоднородным материалом (для реальных продуктов питания).

Дозиметрические системы при радиационной обработке продуктов питания: Нормативная база Евразийского экономического союза (ЕАЭС)

Основным стандартом по радиационной обработке продуктов питания ЕАЭС является ГОСТ ISO 14470-2014, включающий следующие основные положения:

- обеспечение требований к облучению пищевых продуктов в соответствии с действующими стандартами и практикой;
- выработка предписаний, способствующих достижению соглашения по техническим вопросам между заказчиком и оператором облучателя;
- разработка системы ведения документации с учетом управления процессом облучения продуктов.

В соответствии с требованиями ГОСТ ISO 14470-2014 дозиметрия должна осуществляться для получения гарантий того, что в каждом акте облучения пищевого продукта им была получена строго определенная поглощенная доза. Поглощенная доза должна измеряться с использованием дозиметрической системы, специально разработанной для этой цели. Необходимо также осуществлять контроль и документально регистрировать поглощенную дозу для проверки на соответствие техническим условиям обработки.

Межгосударственным советом ЕАЭС по стандартизации, метрологии и сертификации приняты следующие стандарты в области дозиметрии:

- ГОСТ 34157-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением²⁰;
- ГОСТ 34156-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов гамма-излучением²¹;
- ГОСТ 34155-2017. Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты²².

Данные стандарты гармонизированы с международными документами и содержат описание дозиметрических

систем, необходимых для оценки операционного и технологического качества процессов повседневной обработки пищевых продуктов пучками высокоэнергетических электронов, рентгеновским (тормозным) излучением и гамма-излучением.

Рабочий диапазон доз, необходимый для достижения целей радиационной обработки, регламентируется государственными стандартами, при разработке которых учитывались результаты научных исследований по влиянию ионизирующего излучения на различные характеристики продуктов питания. На сегодняшний день продолжают исследования по поиску необходимых дозовых диапазонов для различных категорий продуктов. После проведения облучения продукт должен соответствовать общим стандартам качества, предъявляемым к данному виду продукции.

Применение дозиметрических систем регулируется специально разработанным ГОСТом для обеспечения единства измерений ГОСТ 8.070-2014²³. Данный документ регламентирует схему измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотонного и электронного излучений в диапазоне энергий фотонного излучения от 0,015 до 50 МэВ и электронного излучения от 5 до 50 МэВ, полученных от государственных первичных эталонов поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы. В качестве первичного эталона утвержден Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий²⁴. Максимальное значение мощности поглощенной дозы, воспроизводимое эталоном (по электронному излучению), составляет $2 \cdot 10^5$ Гр/с [17]. В таблице 3 представлены основные характеристики эталона ГЭТ 209-2014 для фотонного, электронного и бета-излучений.

В 2016 г. был принят «План разработки межгосударственных нормативных документов об обеспечении единства измерений при радиационной обработке пищевых

²⁰ ГОСТ 34157-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением. Введ. 2019-02-01 [GOST 34157-2017. Standard Practice for Dosimetry in Electron Beam and X-Ray (Bremsstrahlung) Irradiation Facilities for Food Processing. Introduced on 2019-02-01. (In Russ.)]

²¹ ГОСТ 34156-2017. Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов гамма-излучением. Введ. 2019-02-01 [GOST 34156-2017. Practice for dosimetry in gamma Irradiation facilities for food processing. Introduced on 2019-02-01. (In Russ.)]

²² ГОСТ 34155-2017. Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты. Введ. 2019-02-01 [GOST 34155-2017. Guide for dosimetry in radiation research on food and agricultural products. – Introduced on 2019-02-01. (In Russ.)]

²³ ГОСТ 8.070-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотонного и электронного излучений. Введ. 2015-07-01 [GOST 8.070-2014. State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification schedule for means measuring absorbed doses and rate of absorbed dose, dose equivalent and rate of equivalent doses of photon and electron radiation. Introduced on 2015-07-01. (In Russ.)]

²⁴ ГЭТ 209-2014. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий [GET 209-2014. The state primary special standard of the unit of absorbed dose rate of intense photon, electron and beta radiation for radiation technology. (In Russ.)]

Основные характеристики эталона ГЭТ 209-2014

Таблица 3

[Table 3]

The Main Characteristics of The Standard GET 209-2014]

Диапазоны значений величин [Value ranges]	Фотонное излучение [Photon radiation]	Электронное излучение [Electron radiation]	Бета-излучение [Beta radiation]
Характеристики [Characteristics]			
Энергии излучения, МэВ [Radiation energy, MeV]	0,66 – ¹³⁷ Cs 1,25 – ⁶⁰ Co	От 3 до 10 [from 3 to 10]	До 2,3 (макс) ⁹⁰ Y+ ⁹⁰ Sr [up to 2,3 (max) ⁹⁰ Y+ ⁹⁰ Sr]
Мощности поглощенной дозы, Гр/с [Absorbed dose rate, Gy/s]	От 0,3 до 10 ³ [from 0,3 to 10 ³]	От 10 ² до 2×10 ⁵ [from 10 ² to 2×10 ⁵]	От 0,3 до 10 ² [from 0,3 to 10 ²]
Среднее квадратическое отклонение [Standard deviation]	1,5×10 ⁻³	5×10 ⁻³	5×10 ⁻³
Суммарная стандартная неопределенность [Total standard uncertainty]	6×10 ⁻³	2,8×10 ⁻²	1,4×10 ⁻²
Суммарная расширенная неопределенность, K=2 [Total expanded uncertainty, K = 2]	7×10 ⁻³	2,4×10 ⁻²	1,4×10 ⁻²

продуктов. Государство разработчик – Россия». В результате реализации плана утвержден в качестве рабочего средства измерений межгосударственный стандартный образец поглощенной дозы на основе радиоохромных пленок для фотонного и электронного излучений (сополимер с 4-диэтиламиноазобензоловым красителем) «СО ПД(Э) – 1/10» ГСО 8916-2007 [18], который разрешено использовать при работе на радиационных технических установках, использующих радионуклидные источники и ускорители электронов.

С 1 июля 2020 г. введен межгосударственный стандарт ГОСТ 8.664-2019²⁵. Настоящий стандарт распространяется на пищевые продукты, обрабатываемые ионизирующим излучением, и устанавливает общие требования к дозиметрии на этапах подготовки и проведения процесса радиационной обработки на радиационно-технологических установках с ускорителями электронов (тормозное и электронное излучение) и с радионуклидными источниками ионизирующих излучений.

Заключение

При сопоставлении международных и национальных систем нормативного регулирования радиационной обработки продуктов можно сделать вывод о том, что на данный момент в России достаточно информации, позволяющей конкретному производителю регламентировать процесс облучения пищевых продуктов.

При этом необходимо отметить, что одного официально утвержденного на территории ЕАЭС рабочего средства измерений «СО ПД(Э) – 1/10» недостаточно для осуществления надлежащего дозиметрического контроля процесса радиационной обработки продуктов питания. Необходимо разработать (на основе международных) и принять межгосударственные стандарты ЕАЭС, регламентирующие использование конкретных дозиметрических систем, необходимых для достижения заданной компетенции технологического процесса облучения.

Важно отметить, что Роспотребнадзором разработан и находится на стадии согласования проект Решения Совета Евразийской экономической комиссии «О внесении изменений в технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011)», в соответствии с которым вводится понятие «облучение (радиационная обработка) пищевой продукции», а также устанавливаются требования безопасности облученных пищевых продуктов. Отсутствие в ТР ТС 021/2011 данных поправок является сдерживающим фактором для более широкого использования радиационных технологий в различных отраслях агропромышленного комплекса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-316-90012.

²⁵ ГОСТ 8.664-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Пищевые продукты. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к дозиметрическому обеспечению. Введ. 2020-07-01 [GOST 8.664-2019. State system for ensuring the uniformity of measurements. Foodstuffs. Foodstuffs radiation processing. Requirements to dosimetry provision. Introduced on 2020-07-01. (In Russ.)]

Литература

- Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority // EFSA Journal. 2011. Vol. 9, No. 4. P. 2107.
- Козьмин Г.В., Кобялко В.О., Лыков И.Н., и др. Радиационные агробиотехнологии: исследования микробиологической безопасности и качества облучённой продукции // Сборник трудов регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований. Калуга, 01 января 2014 г. Калуга: КГИРО, 2015. С. 216-225.
- Козьмин Г.В., Кобялко В.О., Лыков И.Н., и др. Качество и безопасность многокомпонентных пищевых продуктов в зависимости от дозиметрических параметров облучения // Сборник трудов регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований Калуга, 01 января 2015 г. Калуга: КГИРО, 2016. С. 230-239.
- Исамов Н.Н., Санжарова Н.И., Кобялко В.О., и др. Применение радиационных технологий для обеспечения безопасности продуктов животного происхождения // Все о мясе. 2017. № 1. С. 11-15.
- Козьмин Г.В., Гераскин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
- Черняев А.П., Варзарь С.М., Белоусов А.В., и др. Перспективы развития радиационных технологий в России // Ядерная физика. 2019. Т. 82, № 5. С. 425-439.
- Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. World Health Organization: Geneva. 1981.
- Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. Technical Report Series No. 481. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2015. 85 P.
- Chernyaev A.P., Bliznyuk U.A., Borschegovskaya P.Yu., et al. Treatment of Refrigerated Trout with 1 MeV Electron Beam to Control Its Microbiological Parameters // J. Physics of Atomic Nuclei. 2018. Vol. 81, No. 11. P. 1656-1659.
- Барабанов В.В., Безуглов В.В., Брызгин А.А., и др. Мощные импульсные линейные ускорители электронов ИЛУ и их применение в пищевой промышленности // Сборник докладов круглого стола в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, Москва, 21 сентября 2016 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. С. 48-55.
- Климанов В.А., Крамер-Агеев Е.А., Смирнов В.В. Дозиметрия ионизирующих излучений: учеб. пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 740 с.
- Guidelines for the Authorization of Food Irradiation Generally or by Classes of Food. ICGFI Document No. 15, Vienna, 1994.
- Пименов Е.П., Павлов А.Н., Козьмин Г.В., и др. Исследование эффективности радиационной стерилизации растительного сырья с использованием установок ГУР-120 // Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 4. С. 37-42.
- Bliznyuk U.A., Borschegovskaya P.Yu., Chernyaev A.P., et al. Computer simulation to determine food irradiation dose levels // J. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 365. P. 012002.
- Черняев А.П., Авдюхина В.М., Близняк У.А., и др. Исследование эффективности радиационной обработки форели электронным с рентгеновским излучением // Известия РАН, серия физическая. 2020. Т. 84, № 4. С. 501-507.
- Близняк У.А., Авдюхина В.М., Борщеговская П.Ю., и др. Инновационные подходы к развитию радиационных технологий обработки биообъектов // Известия РАН, серия физическая. 2018. Т. 82, № 6. С. 824-828.
- Генералова В.В., Гурский М.Н., Громов А.А., и др. Эталон единицы мощности поглощенной дозы для радиационных технологий // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Радиационные Технологии в Сельском Хозяйстве и Пищевой Промышленности: Состояние и Перспективы 2018», Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 147-151.
- Громов А.А., Жанжора А.П., Коваленко О.И., Тенишев В.П. Обработка пищевых продуктов ионизирующим излучением в Российской Федерации // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Радиационные Технологии в Сельском Хозяйстве и Пищевой Промышленности: Состояние и Перспективы 2018», Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 151-154.

Поступила: 03.07.2020 г.

Павлов Александр Николаевич – кандидат биологических наук, главный специалист Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Чиж Тарас Васильевич – младший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии. **Адрес для переписки:** 249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: taras.chizh@rambler.ru

Снегирев Алексей Сергеевич – младший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Санжарова Наталья Ивановна – доктор биологических наук, профессор, директор Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Черняев Александр Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, заведующий лабораторией пучковых технологий и медицинской физики Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Борщеговская Полина Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Ипатова Виктория Сергеевна – магистрант кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Дорн Юлия Андреевна – аспирант Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Для цитирования: Павлов А.Н., Чиж Т.В., Снегирев А.С., Санжарова Н.И., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., Ипатова В.С., Дорн Ю.А. Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 40-50. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50

Technological process of food irradiation and dosimetric support

Aleksandr N. Pavlov¹, Taras V. Chizh¹, Aleksey S. Snegirev¹, Natalya I. Sanzharova¹, Aleksandr P. Chernyaev^{2,3}, Polina Yu. Borshegovskaya², Viktoriya S. Ipatova², Yuliya A. Dorn¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

The study represents the main types and technical characteristics of irradiation sources currently used for processing of foodstuffs. An absorbed irradiation dose is considered in the context of the technological goals of such treatment. The article discusses the standard dosimetry systems for irradiation treatment of foods, as well as the criteria for calibration and mapping of doses absorbed by a product. The article includes several references to international and Russian regulatory documents on dosimetry systems for food irradiation.

Key words: ionizing radiation, absorbed dose, dose distribution, dosimetry systems, irradiation processing, regulatory documents.

References

- Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority. *EFSA Journal*. 2011;9(4): 2107.
- Kozmin GV, Kobyalko VO, Lykov IN, Sarukhanov VYa, Zyakun AM, Pavlov AN, et al. Radiation agrobiotechnologies: studies of microbiological safety and quality of irradiated products. In: Proceedings of the Regional Competition of Fundamental Research Projects, Kaluga: KGIRO; 2015. P. 216-225 (In Russian)
- Kozmin GV, Kobyalko VO, Lykov IN, Sarukhanov VYa, Zyakun AM, Pavlov AN, et al. Quality and safety of multicomponent food products depending on dosimetric parameters of irradiation. In: Proceedings of the Regional Competition of Fundamental Research Projects, Kaluga: KGIRO; 2016. P. 230-239 (In Russian)
- Isamov NN, Sanzharova NI, Kobyalko VO, Kozmin GV, Pavlov AN, Gubareva OS, et al. Using radiation technologies to provide safety of foods of animal origin. *Vse o myase = All about meat*. 2017;1: 11-15 (In Russian)
- Kozmin GV, Geraskin SA, Sanzharova NI. Radiation technologies in agriculture and food industry. Obninsk: VNIIRAE; 2015. 400 p. (In Russian)
- Chernyaev AP, Varzar SM, Belousov AV, Zheltonozhskaya MV, Lykova EN. Prospects of Development of Radiation Technologies in Russia. *Physics of Atomic Nuclei*. 2019;82(5): 425-439 (In Russian)
- Wholesomeness of Irradiated Food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech. Report Ser. 659. World Health Organization: Geneva; 1981.
- Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. Technical Report Series № 481. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2015. 85 P.
- Chernyaev AP, Bliznyuk UA, Borshegovskaya PYu, Ipatova VS, Nikitina ZK, Gordonova IK, et al. Treatment of Refrigerated Trout with 1 MeV Electron Beam to Control Its Microbiological Parameters. *Physics of Atomic Nuclei*. 2018;81(11): 1656-1659.
- Barabanov BB, Bezuglov BB, Bryazgin AA, Vlasov AYu, Voronin LA, Korobeynikov MV, et al. Powerful pulse linear electron accelerators ILU and their application in the food industry. In: A collection of round-table reports at the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry; Obninsk: RIRAE; 2016. P. 48-55 (In Russian)
- Klimanov VA, Kramer-Ageev EA, Smirnov VV. Dosimetry of ionizing radiation: a Training manual. Moscow: NRNU MEPhI; 2015. 740 p. (In Russian)
- Guidelines for the Authorization of Food Irradiation Generally or by Classes of Food. ICGFI Document No. 15, Vienna; 1994.
- Pimenov EP, Pavlov AN, Kozmin GV, Spirin EV, Sanzharova NI. Study of the effectiveness of radiation sterilization of plant materials using the GUR-120 installation. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2013;22(4): 37-42 (In Russian)
- Bliznyuk UA, Borchegovskaya PYu, Chernyaev AP, Avdukhina VM, Ipatova VS, Leontev VA, et al. Computer simulation to de-

Taras V. Chizh

Russian Institute of Radiology and Agroecology

Address for correspondence: Kievskoe shosse 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032; E-mail: taras.chizh@rambler.ru

- termine food irradiation dose levels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;365: 012002.
15. Chernyaev AP, Avdyukhina VM, Bliznyuk UA, Borshegovskaya PYu, Ipatova VS, Leontev VA, et al. Study of the effectiveness of treating trout with electron beam and x-ray radiation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020;84(4): 385-390 (In Russian)
 16. Bliznyuk UA, Avdyukhina VM, Borchegovskaya PYu, Rozanov VV, Studenikin FR, Chernyaev AP, et al. Innovative Approaches to Developing Radiation Technologies for Processing Biological Objects. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018;82(6): 740-744 (In Russian)
 17. Generalova VV, Gursky MN, Gromov AA, Zhanzhora AP, Emelyanenko IA, Kovalenko OI, et al. Standard unit of absorbed dose rate for radiation technologies. In: *Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects 2018: Proceedings of the International Research and Practice Conference*; 2018 Sept 26-28; Obninsk, Russia. Obninsk: RIRAE; 2018. P. 147-151 (In Russian)
 18. Gromov AA, Zhanzhora AP, Kovalenko OI, Tenishev VP. Food processing by ionizing radiation in Russia Federation. In: *Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects 2018: Proceedings of the International Research and Practice Conference*; 2018 Sept 26-28; Obninsk, Russia. Obninsk: RIRAE; 2018. P. 151-154 (In Russian)

Received: July 03, 2020

Aleksandr N. Pavlov – PhD in Biological sciences, Chief Specialist of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For correspondence: Taras V. Chizh – Junior Researcher of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology (Kievskoe shosse 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032; E-mail: taras.chizh@rambler.ru)

Aleksey S. Snegirev – Junior Researcher of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Natalya I. Sanzharova – Doctor of Biological Sciences, Professor, Director of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Aleksandr P. Chernyaev – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Accelerator Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University; Head of the Laboratory of Beam Technologies and Medical Physics, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Polina Yu. Borshegovskaya – Ph.D. in Physico-mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Accelerator Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Victoria S. Ipatova – Master's Degree student of the Department of Accelerator Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Yuliya A. Dorn – Postgraduate at the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Pavlov A.N., Chizh T.V., Snegirev A.S., Sanzharova N.I., Chernyaev A.P., Borshegovskaya P.Yu., Ipatova V.S., Dorn Yu.A. Technological process of food irradiation and dosimetric support. *Radiatsionnaya Gygiena* = *Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 4. P. 40-50. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50