

РАСЧЕТ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО ЗАЛА УНУ ГУР-120 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Дорн Ю.А.¹, Адарова А.И.², Чиж Т.В.¹, Нийонсенга Э.³, Павлов А.Н.¹, Кураченко Ю.А.¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
249035, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1

²Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии»
Минздрава России,

249036, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королева, д. 4

³ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

249039, Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д. 1



Согласно ГОСТ ISO 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением», дозиметрия должна осуществляться для получения гарантий того, чтобы в каждом акте облучения пищевого продукта была достигнута строго определенная поглощенная доза. Для оптимизации процесса проведения научно-исследовательской и производственной работы по облучению сельскохозяйственной и пищевой продукции разработана модель расчета дозиметрических параметров уникальной научной гамма-установки НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ ГУР-120 (далее УНУ ГУР-120, регистрационный номер 2795259 на портале scr-rg.ru, дата регистрации: 12.10.2021) с использованием численных методов расчета переноса частиц, в частности, метода Монте-Карло. Применение модели обеспечивает расчет карты распределения поглощенных доз в облучательном зале УНУ ГУР-120, в результате которого оптимизируется время облучения, увеличивается производительность установки, снижаются энергозатраты. УНУ ГУР-120 была разработана, спроектирована и введена в эксплуатацию в 1980-х гг. прошлого века. Основной задачей установки было обеспечение зоны равномерного облучения сельскохозяйственных растений в период вегетации. Инженерные расчеты по расположению блоков облучения и распределению дозиметрических полей были проведены в соответствии с этой задачей с учетом возможности регулирования мощности дозы

© Дорн Ю.А., Адарова А.И., Чиж Т.В., Нийонсенга Э., Павлов А.Н., Кураченко Ю.А., 2024

в центре зала размером 2,5 м на 2,5 м от 0,1 до 25 Гр/ч, что уже не имеет и не имело аналогов в мире. В настоящее время установка модернизирована, загружена источниками ионизирующего излучения по максимуму, круг решаемых задач расширился, требуемая мощность дозы колеблется в пределах от 0,1 до 10000 Гр/ч, а разброс поглощенных доз колеблется в пределах от 1 до 500000 Гр. Соответственно для оптимизации процесса радиационной обработки необходимо достоверное значение дозиметрических параметров по всему облучательному залу УНУ ГУР-120 с возможностью проведения облучения различных видов продукции и материалов одновременно. Параметры установки – конструкция и расположения блоков, возможность регулирования мощности дозы в больших пределах – и проведение одновременного облучения продукции для различных целей говорят о ее уникальности. Описание геометрии трехмерных математических моделей выглядит неординарной задачей. Ее удалось решить с использованием пакета прикладных программ MCNP. Показано, что расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Полученная удовлетворительная сходимости расчетных и экспериментальных результатов доказывает возможность использования программного пакета MCNP для описания распределения поглощенных доз во всем объеме облучательного зала УНУ ГУР-120. Применение данной модели значительно увеличит научно-технический и производственный потенциал установки. Анализ результатов моделирования также позволяет минимизировать время облучения продукции при условии достижения необходимой дозы, что увеличивает производительность установки, ее экономическую эффективность и снижает соответственно энергетические затраты.

Ключевые слова: моделирование методом Монте-Карло, гамма-излучение, уникальная научная гамма-установка радиационного облучения ГУР-120, поглощенная доза, программа MCNP5.

Для цитирования: Дорн Ю.А., Адарова А.И., Чиж Т.В., Нийонсенга Э., Павлов А.Н., Кураченко Ю.А. Расчет дозиметрических характеристик облучательного зала УНУ ГУР-120 с использованием численной модели Монте-Карло для планирования процессов радиационной обработки. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 180–190. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.15>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение объемов производства агропромышленной продукции и улучшение ее качества – это одна из ключевых задач для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации [1, 2].

Безопасность пищевой и сельскохозяйственной продукции при радиационной обработке должна обеспечиваться за счет правильного планирования и контроля параметров процесса облучения ионизирующим излучением [3].

Критерием контроля является поглощенная доза, которая определяется параметрами источника облучения (паспортной активностью, периодом полураспада источника ионизирующего излучения (ИИИ), месторасположением в контейнере-облучателе), равномерностью распределения дозы и характеристиками объекта (плотностью, объемом и расположением относительно источника излучения). Величина поглощенной дозы определяется задачами применения облучения, например, антимицробная обработка, подавление на-

секомы вредителей, стимуляция улучшения всхожести семенного материала или испытание радиационной стойкости различных материалов и т.д. Поглощенная доза должна обеспечить достижение необходимого эффекта при сохранении качества и безопасности облучаемых объектов для потребителей.

Основным контролируемым параметром для оценки качества радиационной обработки в технологиях радиационного облучения является поглощенная доза. Это критерий, характеризующий надежность оборудования радиационно-технических установок (далее РТУ) и позволяющий получить оценку эффективности использования ИИИ в ходе технологической обработки [4]. Необходимым условием обеспечения безопасности облучаемой продукции является определение карты распределения поглощенной дозы в облучаемом объекте. Определение геометрии облучения продукции (способ упаковки продукции, размер транспортной тары, фиксированная ориентация тары с продукцией на конвейере относительно направления облучения) с учетом основных параметров облучательной установки позволяет достичь оптимального распределения доз и предотвратить возможность получения некачественной продукции. Проведенный предварительно расчет с использованием программы MCNP5 позволяет правильно осуществить выбор и использование конкретных измерительных систем дозиметрии с учетом полученного численным методом диапазона доз для достижения заданных параметров технологического процесса. Правильный выбор дозиметрической системы обеспечивает эффективный контроль дозы облучения, что позволит обеспечить надлежащее качество и безопасность процесса радиационной обработки [5–8].

При осуществлении дозиметрии часто применяют численные методы расчета переноса частиц, включая метод Монте-Карло. Среди наиболее популярных программных пакетов можно выделить Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP).

Монте-Карло-моделирование является эффективной технологией для описания взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. С его помощью можно симулировать распределение поглощенной дозы внутри облучаемого объекта, оптимизировать параметры облучения и предсказывать результаты различных сценариев облучения. Это позволяет точно оценить, как частицы излучения взаимодействуют с материалами и распределяются внутри них, что критически важно для контроля и оптимизации процесса облучения [9–11].

Целью работы являлось изучение возможности планирования сценариев облучения с использованием программных пакетов MCNP на УНУ ГУР-120 путем сравнения результатов моделирования с результатами прямых дозиметрических измерений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения облучения была использована УНУ ГУР-120 (рис. 1).

Установка ГУР-120 состоит из восьми блоков-облучателей, четыре против четырех. Тип – стационарная, исследовательская с сухим способом защиты. Параметры облучательского помещения: объем – 380 м³, площадь – 67,5 м², длина – 11,43 м, ширина – 5,9 м, высота – 5,6 м. Количество загруженных источников – 80 шт. Характеристики источников ионизирующего излучения: радионуклид Co-60, тип ГИК-7-4, суммарная активность по папортам – $2,38 \times 10^{15}$ Бк. Суммарная активность источников Co-60 на момент облучения – $1,86 \times 10^{15}$ Бк.



Рис. 1. Установка ГУР-120 для радиационной обработки сельскохозяйственной продукции

Прямые измерения дозовых полей проводили с использованием дозиметрической системы Фрикке. Радиационно-химическая реакция, протекающая в дозиметре Фрикке при действии ионизирующего излучения, состоит в окислении двухвалентного железа до трехвалентного в сернокислом растворе в присутствии кислорода. Система состоит из дозиметра соответствующих аналитических приборов, классифицируется как эталонная стандартная дозиметрическая система Фрикке. Используется для радиоизотопных гамма-установок при энергии фотонов больше 0.6 МэВ, для пучков электронов, энергия которых больше 8 МэВ и для X-излучения (тормозного излучения), где энергия электронов, используемых для получения фотонов, равна или больше 2 МэВ. Для приготовления дозиметрического раствора Фрикке соль Мора (550 мг) растворяли в 100 мл трижды дистиллированной воды, добавляли 55 мг NaCl и перемешивали до полного растворения. В полученный раствор добавляли серную кислоту (22 мл) и доводили объем дозиметрического раствора до 1 л тридистиллированной водой. Химические дозиметры Фрикке облучали в полипропиленовых пробирках объемом 5 мл. Схематичное расположение пробирок с раствором представлено на рис. 2. Каждая пробирка была выставлена на определенное расстояние от выбранного блока (3-1) УНУ ГУР-120 и облучалась в течение времени, представленном в табл. 1.

Исследование проводилось на одном из восьми блоков установки ГУР-120. При этом при проведении расчетов и экспериментальных измерений в работе были задействованы

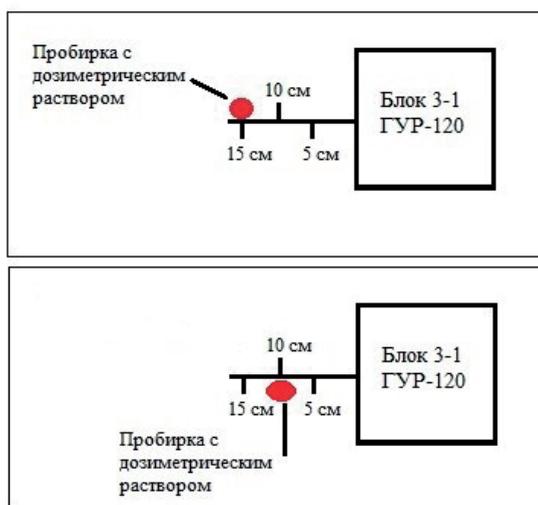


Рис. 2. Несколько вариантов расположения дозиметра Фрикке относительно блока 3-1 установки ГУР-120

Таблица 1

Схема проведения исследования

№ п/п	№ пробирки	Расстояние от блока, см	Время облучения, мин
1	1	0	1
2	2	5	4
3	3	10	6
4	4	15	15
5	5	20	15
6	6	25	20
7	7	30	20
8	8	35	30
9	9	40	30
10	10	45	30
11	11	50	30
12	12	55	60
13	13	60	60

все блоки установки, поскольку они соединены попарно, и в показания результатов дозиметрии значительный вклад вносит каждый соседний блок и все блоки вместе.

Было выполнено расчетное моделирование переноса частиц в среде методом Монте-Карло. В качестве транспортного кода был выбран программный пакет MCNP версии 5.

Поскольку существует вклад в поглощенную дозу от соседних блоков облучательной гамма-установки, модель облучения была выстроена на основе реальной геометрии радиационной установки ГУР-120 (рис. 3–5). В качестве модели дозиметра была выбрана сфера, имитирующая дозиметр Фрикке. Было получено тринадцать моделей гамма-установки ГУР-120, отличающиеся между собой расположением сферы относительно блока облучателя согласно табл. 1.

Все изображения были получены с помощью визуального редактора программы MCNP5.

Расчеты распределения поглощенных доз были проведены для 13-ти сфер, имитирующих расположение ферросульфатных дозиметров. В каждом из смоделированных

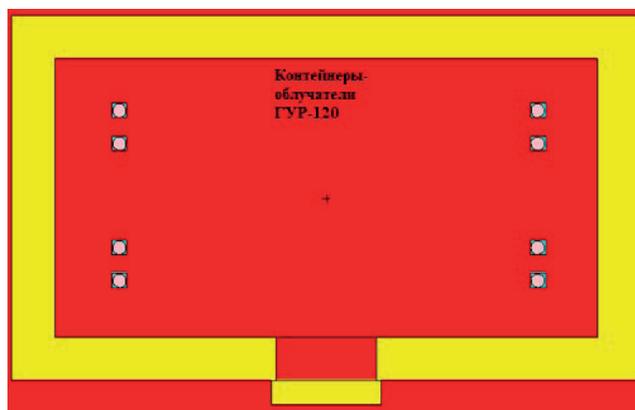


Рис. 3. Геометрия зала облучения ГУР-120 в плоскости XY

процессов критерием поглощенной дозы гамма-излучения являлась потеря энергии, задаваемая в программном коде MCNP5 как оценка F6 (энергия, выделенная фотонами в ячейке на единицу массы ячейки) с размерностью, выраженной в МэВ/г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используя исходные данные об УНУ ГУР-120, а также о материальном составе применяемого дозиметра Фрикке, с помощью программы MCNP5 смоделировали систему «источник – дозиметрический раствор Фрикке». На рисунке 6 представлены геометрия контейнера-облучателя установки ГУР-120 и сфера, которая имитирует дозиметр Фрикке (расстояние от контейнера-облучателя 5 см, суммарная активность источников в контейнере 3-1 (10 шт.) на момент облучения – $2,38 \times 10^{14}$ Бк).

Сопоставление значений поглощенных доз гамма-излучения, полученных в результате облучения дозиметрического раствора Фрикке, измеренных в 13-ти точках, с результатами моделирования показало их хорошую согласованность между собой (рис. 7). Среднеквадратичная ошибка составила 6,4%, что свидетельствует о том, что модель MCNP достаточно точно воспроизводит сценарий облучения. Максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превысило 15%, что дополнительно подтверждает надежность моделирования.

Корреляционный анализ с использованием коэффициента Пирсона подтвердил тесную линейную связь (коэффициент корреляции равен 0,994 между измеренными и расчетными данными, что указывает на адекват-

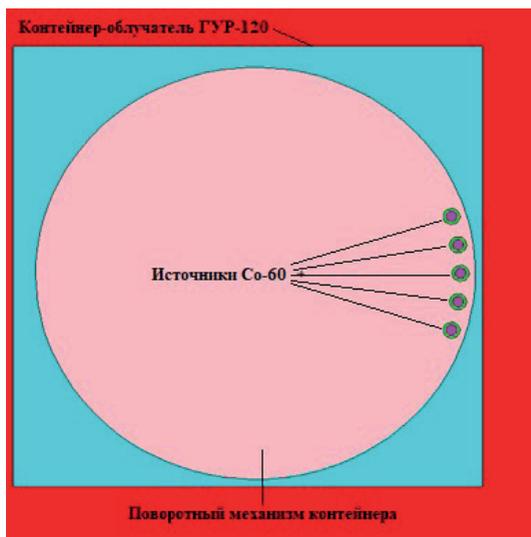


Рис. 4. Геометрия контейнера-облучателя ГУР-120 в плоскости XY

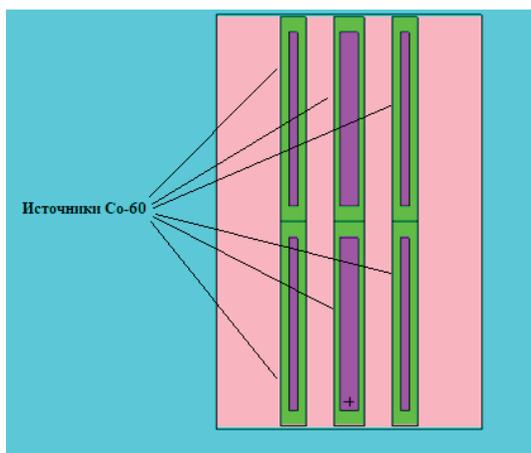


Рис. 5. Геометрия контейнера-облучателя ГУР-120 в плоскости YZ

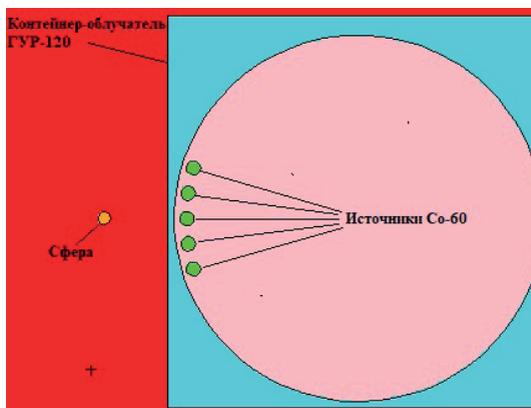


Рис. 6. Геометрия контейнера-облучателя ГУР-120 и сферы на расстоянии от блока 5 см (плоскость XY)

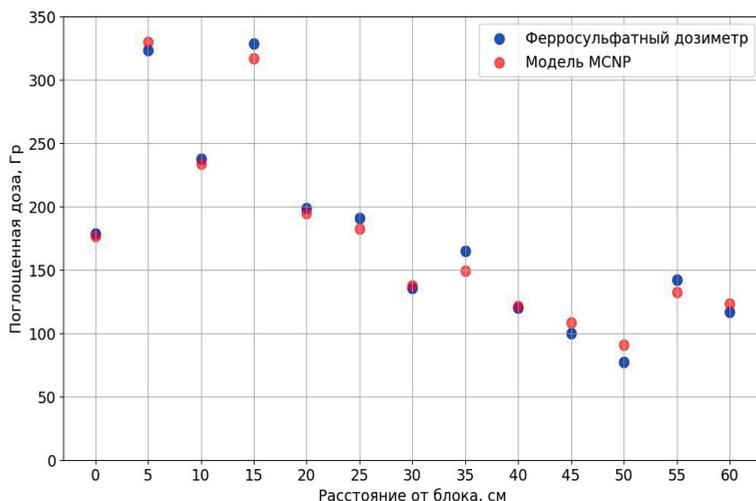


Рис. 7. Результаты моделирования и расчетов поглощенной дозы

ность модели). Результаты t -теста для связанных выборок ($t=0,52$, $df=12$, $p > 0,05$) не выявили статистически значимых различий между двумя группами данных, подчеркивая статистическую согласованность измерений и расчетов.

Среднее различие между измеренными и рассчитанными дозами составило 1,26 Гр ($SE=2,43$, $d=0,14$). Стандартная ошибка (SE), равная 2,43, указывает на значительную вариабельность различий, однако значение критерия размера эффекта (Cohen's $d=0,14$) указывает на очень маленький эффект. Это означает, что расхождения между измеренными и рассчитанными дозами не являются значительными с практической точки зрения и не приводят к существенным изменениям в процессе облучения. Это подтверждает применимость модели для предсказания поглощенных доз гамма-излучения.

Данное исследование показывает, что описанный подход необходимо использовать для анализа сценариев облучения сельскохозяйственной продукции на УНУ ГУР-120.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование гамма-установки радиационного облучения ГУР-120 с помощью метода Монте-Карло. Результаты расчетных поглощенных доз удовлетворительно согласуются с результатами измерений. Полученные результаты доказывают необходимость использования программного кода MCNP для моделирования процесса переноса излучения на УНУ ГУР-120, что позволит быстро и эффективно прогнозировать и модифицировать характеристики излучения для корректного проведения радиобиологических исследований и радиационной обработки различных видов сельскохозяйственной и промышленной продукции.

Проведенные исследовательские расчеты позволяют использовать установку с максимальной экономической эффективностью и проводить качественное планирование технологического процесса облучения различных материалов в большом диапазоне поглощенных доз.

Литература

1. *Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.* / Под общ. ред. Г.В. Козьмина, С.А. Гераськина, Н.И. Санжаровой. – Обнинск: ВНИИРАЭ. – 2015. – 399 с. ISBN 978 5 903386 39 0.
2. *Мусина О.Н., Коновалов К.Л.* Радиационная обработка ионизирующим излучением продовольственного сырья и пищевых продуктов. // Пищевая промышленность. – 2016. – № 8. – С. 46–49.
3. *Перова Н.В., Тенишев В.П.* Обеспечение безопасности пищевой и сельскохозяйственной продукции при обработке ионизирующим излучением / Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы». Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ. – 2018. – С. 169–171. Электронный ресурс: https://rt2018.rirae.ru/images/Documents/SbornikRT2018_web.pdf (дата доступа 01.04.2024).
4. *Павлов А.Н., Чиж Т.В., Воробьев М.С.* Дозиметрические системы в современной практике радиационной обработки. / Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы». Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ. – 2018. – С. 166–168. Электронный ресурс: https://rt2018.rirae.ru/images/Documents/SbornikRT2018_web.pdf (дата доступа 01.04.2024).
5. *Павлов А.Н.* Исследование радиобиологических показателей эффективности экспериментально-производственного процесса радиационной обработки сельскохозяйственной продукции растительного происхождения. Автореф. дисс. канд. биол. наук. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии. – Обнинск. – 2016. – 23 с. Электронный ресурс: <https://ds.rirae.ru/images/Documents/att/Pavlov/AvtoreferatPavlov.pdf> (дата доступа 01.04.2024).
6. *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: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50>
7. ISO/ASTM 51261:2013. Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing. Электронный ресурс: <https://www.iso.org/standard/60211.html> (дата доступа 01.04.2024).
8. ISO/ASTM 52303:2015. Guide for absorbed-dose mapping in radiation processing facilities. Электронный ресурс: <https://www.iso.org/ru/standard/67807.html> (дата доступа 01.04.2024).
9. *Bliznyuk U.A., Borchegovskaya P.Yu., Chernyaev A.P., Avdukhina V.M., Ipatova V.S., Leontev V.A., Studenikin F.R.* Computer simulation to determine food irradiation dose levels. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 365:012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/365/1/012002>
10. *Dridi W, Daoudi M, Farah K, Hosni F.* Monte Carlo validation of dose mapping for the Tunisian Gamma Irradiation Facility using the MCNP6 code. // Radiat Phys Chem. – 2020. – Vol. 173:108942 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108942>
11. *Gual M.R., Pereira C., Mesquita A.Z.* Application of a new source model of a panoramic gamma irradiator on dose map formation in an irradiated product. // Appl Radiat Isot. – 2019. – Vol. 144. – PP. 87–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.12.002>

Поступила в редакцию 22.05.2024

АвторыДорн Юлия Андреевна, главный специалист,E-mail: julya.dorn@yandex.ruАдарова Алевтина Ивановна, инженер,E-mail: alya.adarova@mail.ru

Чиж Тарас Васильевич, младший научный сотрудник,

E-mail: taras.chizh@rambler.ru

Нийонсенга Эли, студент,

E-mail: eliniy20@oiate.ru

Павлов Александр Николаевич, старший научный сотрудник, к.биол.н.,

E-mail: 49434@mail.ru

Кураченко Юрий Александрович, главный специалист, д.ф.-м.н.,

E-mail: ykurachenko@mail.ru

UDC 539.1

Calculation of Dosimetric Characteristics for the UNU GUR-120 Irradiation Hall Using a Numerical Monte Carlo Method for Planning Radiation Treatment Processes

Dorn Yu.A.¹, Adarova A.I.², Chizh T.V.¹, Niyonsenga E.³, Pavlov A.N.¹, Kurachenko Yu.A.¹

¹ *Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”,
1, bld. 1 Kievskoe Sh., 249035 Obninsk, Kaluga reg., Russia*

² *Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb – branch of the Federal State Budgetary
Institution “National Medical Research Center of Radiology” of the Ministry of Health of Russia,
4 Koroleva St., 249036 Obninsk, Kaluga reg., Russia*

³ *IATE MEPhI,*

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

In accordance with GOST ISO 14470-2014 “Food Irradiation. Requirements for Development, Validation and Routine Control of the Process of Food Irradiation using Ionizing Radiation”, radiation monitoring needs to be undertaken to ensure that a strictly defined absorbed dose is achieved in each food product irradiation act. To optimize the research and production process for irradiation of agricultural and food products, a model has been developed to calculate the dosimetric parameters of RIRAE GUR-120, a unique research gamma irradiation facility based at the Kurchatov Institute Research Center (hereinafter UNU GUR-120, reg. No. 2795259 on the ckr-rf.ru website, reg. date: 12.10.2021) using numerical methods for the particle transport calculation, specifically the Monte Carlo method. Using the model makes it possible to calculate the distribution of absorbed doses in the UNU GUR-120 irradiation hall, as a result of which the irradiation time is optimized, the facility efficiency is increased, and energy consumption is reduced.

The UNU GUR-120 facility was developed, designed and put into operation in the 1980s. The facility’s key mission was to provide an area for uniform irradiation of agricultural plants in the growing season. Engineering calculations for the layout of irradiation units and the distribution of dosimetric fields were undertaken in accordance with this mission, taking into account the capability to regulate the dose rate at the center of a hall with the dimensions of 2.5×2.5 m in a range of 0.1 Gy/h to 25 Gy/h, which has no analogs globally. Currently, the facility has been upgraded, loaded with ionizing radiation sources to the maximum extent, and, in addition, has the range of its applications extended with the required dose rate varying in a range of 0.1 Gy/h to 10,000 Gy/h, and the absorbed dose interval being between 1 Gy and 500,000 Gy. Accordingly, optimizing the radiation treatment process requires one to know the reliable value of dosimetric parameters across the UNU GUR-120 irradiation hall, which allows simultaneous irradiation of different product and material types. The parameters of the UNU GUR-120 (design and

arrangement of irradiation units, capability to adjust the dose rate within a broad range, and simultaneous irradiation of products for different purposes) make it a unique facility. It appears to be an extraordinary task to describe the geometry of three-dimensional mathematical models. It has been solved successfully using the MCNP software package. The calculated values have been shown to be in good agreement with experimental data. The satisfactory reproducibility of calculated and experimental results obtained has shown that it is possible to use the MCNP software package to describe the distribution of absorbed doses across the UNU GUR-120 irradiation hall to allow research on the distribution of the absorbed gamma radiation dose within irradiated products.

Analyzing the simulation results also allows minimizing the product exposure time provided that the required dose is reached, which increases the facility efficiency, increases the facility's cost effectiveness, and reduces, accordingly, the energy consumption.

Keywords: Monte Monte Carlo simulation, gamma radiation, unique GUR-120 gamma irradiation facility, absorbed dose, MCNP5 code.

For citation: Dorn Yu.A., Adarova A.I., Chizh T.V., Niyonsenga E., Pavlov A.N., Kurachenko Yu.A. Calculation of Dosimetric Characteristics for the UNU GUR-120 Irradiation Hall Using a Numerical Monte Carlo Method for Planning Radiation Treatment Processes. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 180–190; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.15> (in Russian).

References

1. *Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry*. Edited by G.V. Koz'min, S.A. Geras'kin, N.I. Sanzharova. Obninsk. RIRAE, 2015, 399 p. ISBN 978 5 903386 39 0 (in Russian).
2. Musina O. N., Konovalov K. L. Radiation treatment of food raw materials and food products with ionizing radiation. *Pishchevaya promyshlennost*. 2016, no. 8, pp. 46–49 (in Russian).
3. Perova N.V., Tenishev V.P. Ensuring the safety of food and agricultural products when treated with ionizing radiation. *Proc. of the International Research and Practice Conference. Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects*. Obninsk, RIRAE Publ., 2018, pp. 169–171. Available at: https://rt2018.rirae.ru/images/Documents/SbornikRT2018_web.pdf (accessed Apr. 01, 2024) (in Russian).
4. Pavlov A.N., Chizh T.V., Vorobiev M.S. Dosimetry systems in modern practice of radiation processing. *Proc. of the International Research and Practice Conference. Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects*. Obninsk, RIRAE Publ., 2018, pp. 166–168. Available at: https://rt2018.rirae.ru/images/Documents/SbornikRT2018_web.pdf (accessed Apr. 01, 2024) (in Russian).
5. Pavlov A.N. *Study of radiobiological indicators of the effectiveness of the experimental-production process of radiation treatment of plant-origin agricultural products*. Abstract of the diss. Cand. Sci. (Biol.). Obninsk. All-Russian Scientific Research Institute of Radiology and Agroecology, 2016, 23 p. Available at: <https://ds.rirae.ru/images/Documents/att/Pavlov/AvtoreferatPavlov.pdf> (accessed Apr. 01, 2024) (in Russian).
6. Pavlov A.N., Chizh T.V., Snegirev A.S., Sanzharova N.I., Chernyaev A.P., Borshchegovskaya P.Yu., Ipatova V.S., Dorn Yu.A. Technological process of food irradiation and dosimetric support. *Radiacionnaya gigiena*. 2020, v. 13, no. 4, pp. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50> (in Russian).
7. ISO/ASTM 51261:2013. Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing. Available at: <https://www.iso.org/standard/60211.html> (accessed Apr. 01, 2024).
8. ISO/ASTM 52303:2015. Guide for absorbed-dose mapping in radiation processing facilities. Available at: <https://www.iso.org/ru/standard/67807.html> (accessed Apr. 01, 2024).

9. Bliznyuk U.A., Borchegovskaya P.Yu, Chernyaev A.P., Avdukhina V.M., Ipatova V.S., Leontev V.A., Studenikin F.R. Computer simulation to determine food irradiation dose levels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, v. 365: 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/365/1/012002>
10. Dridi W., Daoudi M., Farah K., Hosni F. Monte Carlo validation of dose mapping for the Tunisian Gamma Irradiation Facility using the MCNP6 code. *Radiat Phys Chem*. 2020, v. 173: 108942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108942>
11. Gual M.R., Pereira C., Mesquita A.Z. Application of a new source model of a panoramic gamma irradiator on dose map formation in an irradiated product. *Appl Radiat Isot*. 2019, v. 144, pp. 87–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.12.002>

Authors

Yulia A. Dorn, chief specialist,

E-mail: julya.dorn@yandex.ru

Alevtina I. Adarova, engineer,

E-mail: alya.adarova@mail.ru

Taras V. Chizh, junior researcher,

E-mail: taras.chizh@rambler.ru

Eli Niyonsenga, student,

E-mail: elinij20@oiate.ru

Alexander N. Pavlov, senior researcher, Cand. Sci. (Biological),

E-mail: 49434@mail.ru

Yuri A. Kurachenko, chief specialist, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: ykurachenko@mail.ru