

ФИЗИКА ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА / PHYSICS OF CHARGED PARTICLE BEAMS AND ACCELERATION ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.21>

ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ СИНУС-320 ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ КАКАО-ПОРОШКА

Научная статья

Афанасьев К.¹, Гаузштейн В.^{2,*}, Баранова М.³, Ростов В.⁴

²ORCID : 0000-0001-9072-0893;

^{1,2,4}Институт сильноточной электроники Со РАН, Томск, Российская Федерация

³Теклеор LLC, Обнинск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (gauzshtein[at]tpu.ru)

Аннотация

В статье на примере какао-порошка исследована возможность использования импульсно-периодического ускорителя электронов СИНУС-320 для стерилизации пищевых продуктов. Исследование проводилось методом статистического моделирования с использованием пакета GEANT4. Результаты представлены в виде зависимости поглощенной дозы облучения от глубины воздействия. Исходными данными для исследования были ускоряющее напряжение (350 кВ, 400 кВ, 450 кВ и 500 кВ), толщина алюминиевой анодной фольги (30 мкм, 50 мкм и 70 мкм), а также толщину облученного слоя какао-порошка (3 мм, 4 мм и 5 мм). Результаты исследования показали, что использование генератора СИНУС-320 позволяет эффективно стерилизовать какао-порошок толщиной слоя 3-5 мм. Этого можно добиться за счет сочетания правильно подобранного ускоряющего напряжения и толщины анодной фольги.

Ключевые слова: стерилизация пищевых продуктов, GEANT4, сильноточный ускоритель электронов.

APPLICATION OF HIGH CURRENT PULSED-PERIODIC ELECTRON ACCELERATOR SINUS-320 FOR COCOA POWDER STERILIZATION

Research article

Afanasev K.¹, Gauzshtein V.^{2,*}, Baranova M.³, Rostov V.⁴

²ORCID : 0000-0001-9072-0893;

^{1,2,4}Institute of High-Current Electronics Sb RAS, Tomsk, Russian Federation

³Tekleor LLC, Obninsk, Russian Federation

* Corresponding author (gauzshtein[at]tpu.ru)

Abstract

In the article, the possibility of using pulse-periodic electron accelerator SINUS-320 for sterilization of food products is studied on the example of cocoa powder. The research was carried out by the method of statistical modelling using the GEANT4 package. The results are presented in the form of dependence of the absorbed irradiation dose on the exposure depth. The initial data for the study were the accelerating voltage (350 kV, 400 kV, 450 kV and 500 kV), the thickness of aluminium anode foil (30 µm, 50 µm and 70 µm) and the thickness of the irradiated layer of cocoa powder (3 mm, 4 mm and 5 mm). The results of the study showed that the use of the SINUS-320 generator allows effective sterilization of cocoa powder with a layer thickness of 3-5 mm. This can be achieved through a combination of properly selected accelerating voltage and thickness of the anode foil.

Keywords: food sterilization, GEANT4, high-current electron accelerator.

Введение

Один из методов стерилизации пищевых продуктов – обработка ионизирующим излучением. Процесс облучения тщательно контролируется с соблюдением параметров и времени обработки для достижения определенных результатов. Стерилизация с использованием ионизирующего излучения помогает предотвратить рост микроорганизмов, ответственных за порчу пищевых продуктов, таких как бактерии и плесень, за счет воздействия на их молекулярную структуру. Во время этих процедур могут использоваться два типа частиц: электроны и гамма-кванты. Воздействие этих типов ионизирующего излучения на вещество принципиально одинаково. Разница между ними заключается прежде всего в источнике их происхождения. Для пищевой промышленности используется электронное излучение с максимальной энергией частиц до 20 МэВ и гамма-излучение с энергией до 10 МэВ. Такой диапазон энергий слишком низок, чтобы способствовать возникновению наведенной радиоактивности в продуктах переработки. Гамма-излучение имеет наибольшую проникающую способность, тогда как проникающая способность электронов значительно ниже. Поэтому ускоренные электроны чаще всего используются для обработки продуктов в относительно тонких упаковках или сыпучих продуктах, таких как какао-порошок или зерна. Основным технологическим параметром, характеризующим степень радиационного воздействия продукции, является поглощенная доза ионизирующего излучения. Поглощенная доза – это определенное количество энергии, поглощенное продуктом во время его воздействия радиации. Подробный обзор применения технологий электронного и рентгеновского облучения в пищевой промышленности представлен в работах [1], [3], [4], [5], [6].

Несмотря на низкую проникающую способность, электронное излучение чаще всего применяется для стерилизации пищевых продуктов. В этом случае могут быть использованы различные типы ускорителей, в том числе бетатроны, линейные ускорители и электронные синхротроны. Каждый из этих типов ускорителей имеет свои преимущества и недостатки.

В данной работе мы исследовали применение сильноточного импульсно-периодического ускорителя электронов СИНУС-320 для стерилизации какао-порошка. В качестве инструмента исследования использовался программный пакет GEANT4 [7]. Отметим, что используемый инструмент GEANT4 позволяет учитывать все виды излучения, необходимые для моделирования поглощенных доз в любом физическом объеме.

Основной задачей было показать возможности использования ускорителя СИНУС-320 для качественной стерилизации пищевых продуктов, а также подбора оптимального режима работы. Основной особенностью генератора СИНУС-320 является относительно низкая энергия ускоренных электронов (до 500 кэВ). В связи с этим необходимо определить оптимальную толщину слоя облучаемого изделия. К очевидным преимуществам использования генератора СИНУС-320 относятся большой ток пучка (до 5 кА).

Модель, использованная для исследования распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого какао-порошка, описана в следующей главе. Далее в главе 3 приводятся результаты исследования для различных режимов работы ускорителя. В заключении подведены итоги исследования и даны рекомендации по достижению оптимального режима работы ускорителя СИНУС-320.

Методы и принципы исследования

Исследование проводилось посредством статистического моделирования с использованием программного пакета GEANT4. Основу модели составляют предложенная конструкция стерилизатора и параметры электронного пучка. С технической стороны стерилизатор состоит из ускорителя электронов, конвейерной ленты и свинцового экрана. Общий вид стерилизатора и подробное место стерилизации показаны на рисунке 1. Облучаемый продукт располагается на ленточном конвейере из нержавеющей стали, расположенном непосредственно под ускорителем. Ускоритель в этой модели состоит из катода, анода и внешнего стального корпуса. Подробное описание импульсно-периодического ускорителя электронов на основе генератора СИНУС-320 представлено в работах [8], [9], [10].

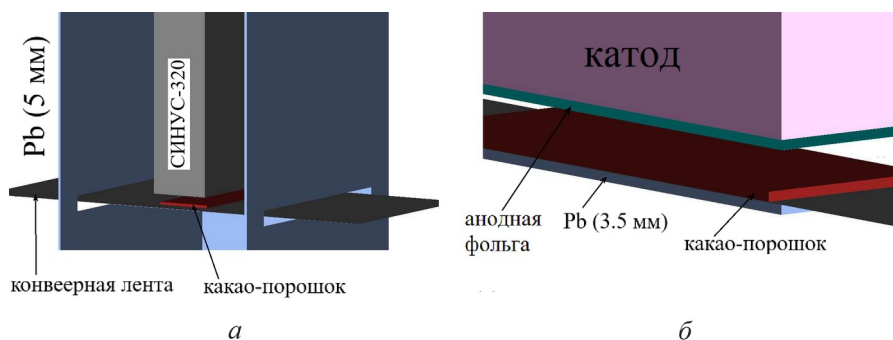


Рисунок 1 - Конструкция стерилизатора:

а - общая схема стерилизатора; б - детальный вид места стерилизации

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.21.1>

В качестве анода используется алюминиевая фольга толщиной несколько десятков микрон. Пучок ускоренных электронов генерируется вблизи поверхности катода. Начальное положение электронов равномерно распределено по поверхности катода. Направление электронов – вертикально вниз к аноду. Пространство между катодом и анодом – вакуумом. Электроны достигают поверхности облученного изделия, проникая через анодную фольгу. Доза облучения определялась как удельная поглощенная энергия на единицу массы продукта. Энергетический спектр электронов в исходном состоянии зависит от напряжения ускорения генератора. На рисунке 2 показаны спектры электронов для напряжений 350 кВ, 400 кВ, 450 кВ и 500 кВ. Приведенные данные для энергетических спектров соответствуют измеренному импульсу напряжения в режиме ускорения электронов. Как показано на рисунке, существует небольшая доля электронов, энергия которых превышала максимально возможную энергию при однократном ускорении. Такой эффект обусловлен спецификой работы СИНУС-320.

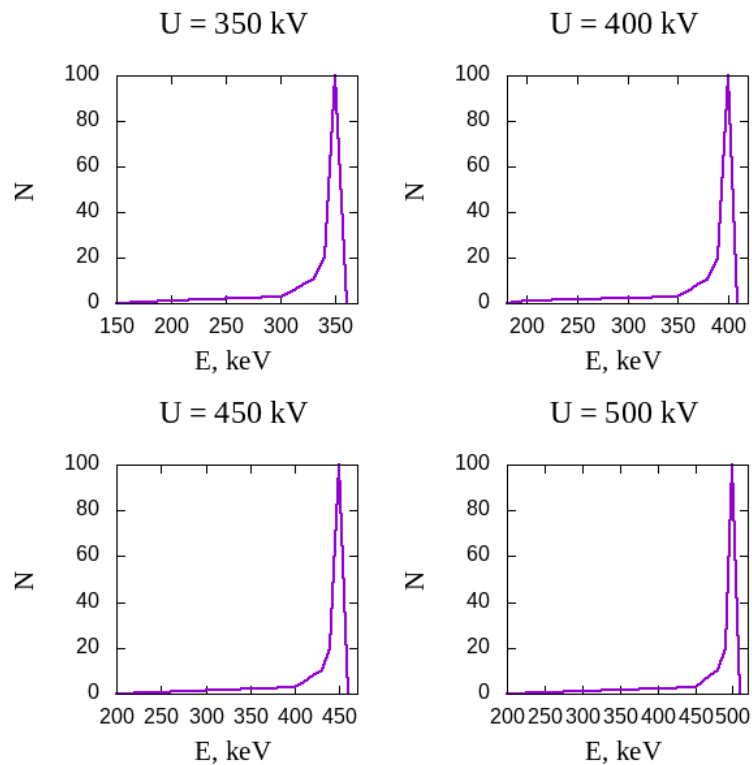


Рисунок 2 - Энергетический спектр электронов для разных ускоряющих напряжений
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.21.2>

Следует отметить, что электроны теряют часть своей энергии при прохождении через анодную фольгу и воздушный зазор между анодом и какао-порошком. Таким образом, низкоэнергетическая составляющая электронного спектра подавляется до достижения какао-порошка.

Основные результаты

Разработанная модель была использована для изучения распределения поглощенной дозы в зависимости от глубины проникновения в какао-порошок. Исходными данными, использованными в исследовании, были ускоряющее напряжение (350 кВ, 400 кВ, 450 кВ и 500 кВ), толщина алюминиевой анодной фольги (30 мкм, 50 мкм и 70 мкм), а также толщина облученного слоя какао-порошка (3 мм, 4 мм и 5 мм). Результаты представлены на рисунке 3. Левый, средний и правый столбцы на рисунке 3 соответствуют анодной фольге толщиной 30 мкм, 50 мкм и 70 мкм соответственно. Верхняя, средняя и нижняя части рисунка 3 соответствуют толщине облучаемого какао-порошка 3 мм, 4 мм и 5 мм соответственно. На каждом рисунке показаны результаты для четырех значений ускоряющего напряжения: 350 кВ (желтый), 400 кВ (фиолетовый), 450 кВ (синий) и 500 кВ (зеленый). Результаты получены при времени облучения 13 нс (один импульс).

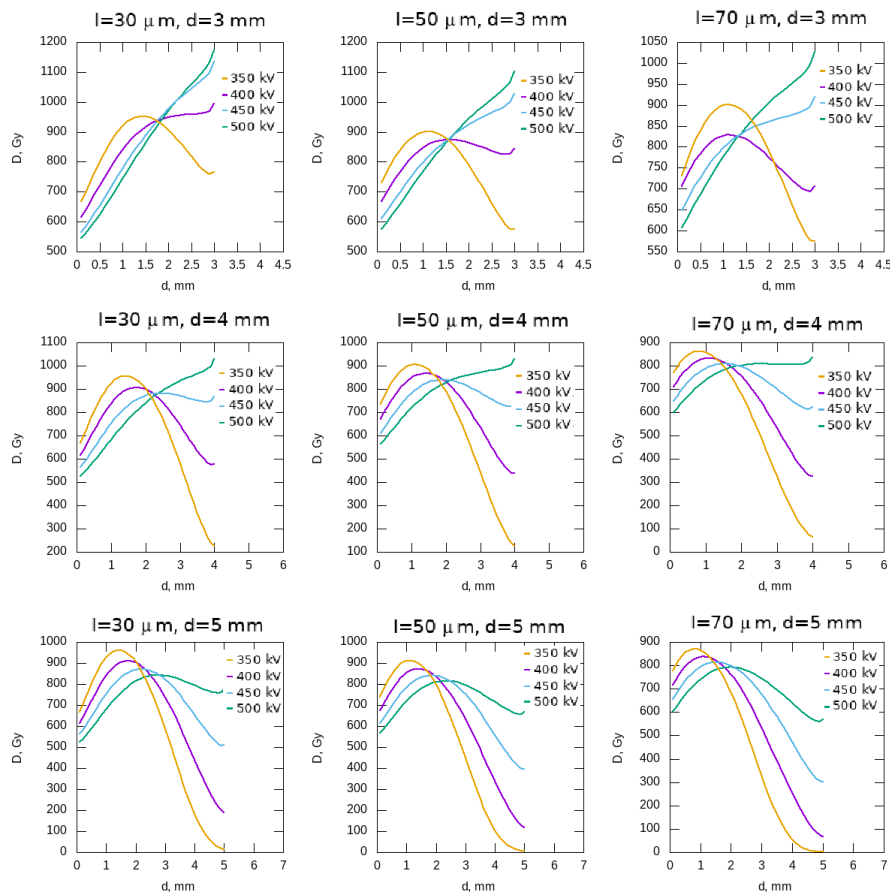


Рисунок 3 - Результаты расследования
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.21.3>

Примечание: левая часть соответствует толщине анодной фольги 30 мкм, средняя - 50 мкм, правая - 70 мкм; верхняя часть соответствует толщине слоя какао-порошка 3 мм, средняя - 4 мм, нижняя - 5 мм; на каждом рисунке показаны результаты для четырех значений ускоряющего напряжения; желтая линия соответствует напряжению 350 кВ, фиолетовая - 400 кВ, синяя - 450 кВ, зеленый - 500 кВ

Обсуждение

Полученные результаты показали, что генератор СИНУС-320 может быть использован для эффективной стерилизации какао-порошка толщиной слоя 3-5 мм. Это достигается подбором правильной комбинации ускоряющего напряжения и толщины анодной фольги. Например, при $U = 500$ кВ, $l = 70$ мкм и $d = 5$ мм разброс поглощенной дозы не превышал 30% (от 600 Гр до 800 Гр за один импульс).

Из полученных результатов также видно, что поглощенная доза отличается для разной толщины слоев какао-порошка на глубине более 2 мм. при одинаковых прочих условиях облучения. С увеличением толщины слоя какао-порошка поглощенная доза уменьшается. Очевидно, что наблюдается эффект переотражения излучения от конвейерной ленты, состоящей из нержавеющей стали. Этот эффект также можно использовать для выбора оптимальной толщины слоя облучаемого изделия.

Заключение

В работе методом статистического моделирования было проведено предварительное исследование применения генератора СИНУС-320 для стерилизации какао-порошка. Показано, что генератор СИНУС-320 позволяет эффективно стерилизовать какао-порошок толщиной слоя 3-5 мм при ускоряющем напряжении 350-500 кВ. Очевидно, что описанный метод подходит к стерилизации продуктов, близких по плотности и элементному составу к какао-порошку, таких как мука, кофе и т.д. Следует отметить, что метод с использованием программного комплекса GEANT4 полностью оправдал себя. Представленный выше подход можно использовать для аналогичных целей, где используются ускорители электронов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Findlay D. Experimental Electron Beam Irradiation of Food and the Induction of Radioactivity / D. Findlay, T. Parsons, M. Sene // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes.* — 1992. — 43. — p. 567–575..
2. Ic E. Food Safety and Irradiation Related Sanitary and Phytosanitary Approaches – Chinese Perspective / E. Ic, N. Cetinkaya // *Radiation Physics and Chemistry.* — 2021. — 181. — p. 109324.
3. Lung H.M. Agriculture: Electron Beam Irradiation Technology Applications in the Food Industry / H.M. Lung, Y.C. Cheng, Y.H. Chang, H.W. Huang, B.B. Yanga, C.Y. Wang // *Encyclopedia of Nuclear Energy.* — 2021. — 4. — p. 313–329.
4. Pillai S. Microbial Decontamination of Food by Electron Beam Irradiation / S. Pillai, E. Pillai // *Trends in Food Science and Technology.* — 2015. — 4. — p. 66-78.
5. Bliznyuk U. Effect of Electron and X-ray Irradiation on Microbiological and Chemical Parameters of Chilled Turkey / U. Bliznyuk // *Scientific Reports.* — 2022. — 12. — p. 750.
6. Morgunov V. GEANT4 Validation for X-ray Treatment of Wooden Cultural Heritage Artefacts / V. Morgunov // *Applied Radiation and Isotopes.* — 2021. — 169. — p. 109565.
7. Agostinelli S. Geant4 – a Simulation Toolkit / S. Agostinelli // *Nuclear Instruments and Methods A.* — 2003. — 506. — p. 250–303.
8. Korovin S. High-current Pulsed-repetitive Electron Accelerator “Sinus-320”: Formation and Diagnostics of a Wide-aperture Beam / S. Korovin, V. Rostov // *Russian Physics Journal.* — 1996. — 39. — p. 1177.
9. Korovin S. Pulsed Power-driven High-power Microwave Sources / S. Korovin, V. Rostov, S. Polevin et al. // *Proceedings of the IEEE.* — 2004. — 92. — p. 1082.
10. Rostov V. High-current Nanosecond Pulse-periodic Electron Accelerators Utilizing a Tesla Transformer / V. Rostov, V. Barmin, V. Landl et al. // *Russian Physics Journal.* — 2019. — 62. — p. 1253.