

Обработка охлажденной форели пучками ускоренных электронов

У. А. Близинок¹, П. Ю. Борщеговская¹, Ф. Р. Студеникин^{1,*}, А. П. Черняев^{1,2}, Д. С. Юров²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 03.07.2018; Подписана в печать 22.10.2018)

В данной работе обсуждаются результаты экспериментального исследования по воздействию ионизирующего излучения на обсемененность свежей охлажденной форели. Приводятся примеры структурных изменений в продукте при облучении в высоких дозах и зависимости количества бактерий КМАФАнМ в исследуемых образцах от поглощенной дозы, измеренные на 3, 6 и 9 сутки после облучения

PACS: 87.53.-j

УДК: 539.1.047

Ключевые слова: радиационная обработка, пучки ускоренных электронов, изменение структуры форели после облучения.

ВВЕДЕНИЕ

Ионизирующие излучения широко применяются для радиационной обработки многих продуктов питания с целью стерилизации и удлинения сроков их хранения. Одно из достоинств радиационной обработки в том, что продукция может находиться в упаковке, что исключает риск ее последующего загрязнения. Радиационная обработка пищевых продуктов, не изменяющая температуру продукта, становится альтернативой традиционной термической пастеризации и стерилизации, которые вызывают необратимые изменения химического состава пищевых продуктов.

В качестве излучателей для радиационно-технологических установок используют ускорители электронов с энергией от 5 до 10 МэВ, гамма-излучение радиоизотопов ⁶⁰Со и ¹³⁷Сs, а также тормозное излучение с энергией не более 5 МэВ, генерируемое ускорителями электронов [1].

В мире пучками ускоренных электронов обрабатывают мясную и рыбную продукцию, морепродукты (в дозах до 7 кГр), сельскохозяйственную продукцию (до 0.25 кГр), в весенне-летние месяцы — скоропортящиеся ягоды и фрукты (до 3 кГр), а также концентраты фруктовых соков и другие виды продукции (до 7 кГр) [2–4].

Поглощенные дозы в продукте до 1 кГр способны подавить активность таких паразитов, как широкий лентец (*Dibothrocephalus latus*) [5]. Поглощенные дозы ниже 10 кГр могут сокращать или уничтожать вегетативные клетки спорообразующих и неспорообразующих микроорганизмов, таких как бациллы или виды синегнойной палочки (*Bacillus* и *Pseudomonas*), вызывающей порчу свежего продукта, таким образом, продлевая срок его хранения при низких температурах до 2°C. Поглощенные дозы до 10 кГр могут уничтожать или существенно сокращать вегетативные клет-

ки патогенных спорообразующих и неспорообразующих микроорганизмов, таких как клостридия (*Clostridia*), вибрион (*Vibrio* spp), сальмонелла (*Salmonellae*), листерия моноцитогенная (*Listeria monocytogenes*) или стафилококк золотистый (*Staphylococcus aureus*), которые могут присутствовать в свежем или замороженном продукте [6, 7]. Различные типы микроорганизмов обладают разной радиочувствительностью. Так для уничтожения бактерий *Salm. Typhimurium* необходима доза 3 кГр, а для уничтожения бактерий *E. Coli* потребуется доза 6 кГр. Основная часть микроорганизмов, вызывающих порчу продуктов, инактивируется дозами до 6 кГр. Наиболее чувствительны грамотрицательные бактерии. Слабой устойчивостью отличаются психрофильные бактерии. Более устойчивы грамположительные бактерии, особенно некоторые микрококки (*Micrococcus roseus* и *Micrococcus tetragenus*) [7].

Для радиационной обработки рыбной продукции применяются ускоренные электроны и гамма-излучение. В низких дозах в диапазоне от 0.1 до 1.0 кГр проводят дезинсекцию сушеной рыбы. В дозах от 1 до 7 кГр проводят обработку свежей рыбы с целью увеличения ее сроков хранения и уничтожения болезнетворных бактерий (колиформы, сальмонеллы) и паразитов [8]. Облучение потрошеной рыбы сразу после вылова и дальнейшее хранение продукта в контейнерах с измельченным льдом позволяет увеличить срок хранения свежей охлажденной рыбы до 20 дней. Так, например анчоус хранится при температуре +3°C 13 дней, а после обработки в дозе 2 кГр срок хранения увеличивается до 17 дней. Рыба сиг хранится при температуре +3°C 7 дней, а после обработки в дозе 1.22 кГр до 20 дней [9].

Согласно данным Росрыболовства объем российского вылова рыбы и морепродуктов в 2013 г. составил 4.14 млн тонн, а в 2017 г. — 4.8 млн тонн. Объем вылова в России ежегодно увеличивается во всех промысловых регионах, что требует совершенствования методов хранения и обработки рыбной продукции.

*E-mail: f.studenikin@gmail.com

Целью данной работы являлось исследование обсеменности свежей охлажденной рыбной продукции после радиационной обработки пучком электронов с энергией 1 МэВ.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — форель потрошенная, охлажденная. Предварительно рыба была выловлена, далее рыбу разделали, помыли при температуре воды не более +15°C и упаковали в короба со льдом. Затем транспортировали в течение суток в холодильной камере при температуре от 0°C до 2°C. Непосредственно перед радиационной обработкой рыбу нарезали кусками массой 50 г, размером 20 см x 3 см, толщиной 0.8 см. Все образцы были помещены в вакуумную полиэтиленовую упаковку. Образцы охлажденной рыбы облучались поочередно с двух сторон пучком ускоренных электронов, получаемых от промышленного ускорителя электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 на энергию 1 МэВ со средней мощностью пучка 25 кВт, который может быть использован для реализации целого ряда радиационных технологий.

Для каждой дозы облучения куски рыбы в упаковке помещались на специальную дюралюминиевую пластину непосредственно перед пучком. Все эксперименты проводились при температуре 18°C, температура облучаемой пластины, на которую помещались образцы во время облучения, составляла 12°C. Расстояние от выхода лучей до пластины 12 см. Схема облучения представлена на рис. 1.



Рис. 1: Схема облучения объекта пучком ускоренных электронов

Образцы облучались в 5 различных дозах. Далее облученные и контрольные необлученные образцы помещались в контейнеры и транспортировались в лабораторию при 18°C, где осуществлялся контроль количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КОЕ/г), которое затем сравнивалось с соответствующим контрольным показателем необлученной рыбы. В лаборатории все образцы хранились при 6°C.

2. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДОЗЫ В ПРОДУКТЕ

Для расчета поглощенной дозы в облученных образцах при помощи программного комплекса GEANT4 было проведено компьютерное моделирование прохождения пучка электронов через кусок рыбы, с учетом параметров облучения и технических характеристик уско-

рителя электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001.

Моделировалась следующая схема эксперимента: на дюралюминиевой пластине (длина 35 см, ширина 5.2 см, толщина 2 мм) размещен фантом — водяной параллелепипед (длина 20 см, ширина 3 см, толщина 0.8 см) в полиэтиленовой оболочке (толщина 0.024 см). Расстояние от выхода лучей до пластины 12 см. Количество электронов в пучке составляло 50 млн, энергия частиц задавалась в соответствии с энергетическим спектром излучения ускорителя. В поперечном срезе пучок представлял собой прямоугольник размером 3 см на 60 см.

Водный фантом был разбит на 8 слоев по 0.1 см для оценки дозового распределения по глубине. Программа позволяет получить значение поглощенной энергии в каждом слое фантома. Далее проводился расчет поглощенной дозы в слое и поглощенной дозы во всем объеме фантома

$$D_{\text{в фантоме}} = \frac{\sum_{i=1}^N dE_{\text{в } i\text{-слое}}}{M_{\text{фантома}}}$$

На рис. 2 представлено распределение поглощенной дозы с глубиной проникновения электронов в водный фантом при его облучении с двух сторон.

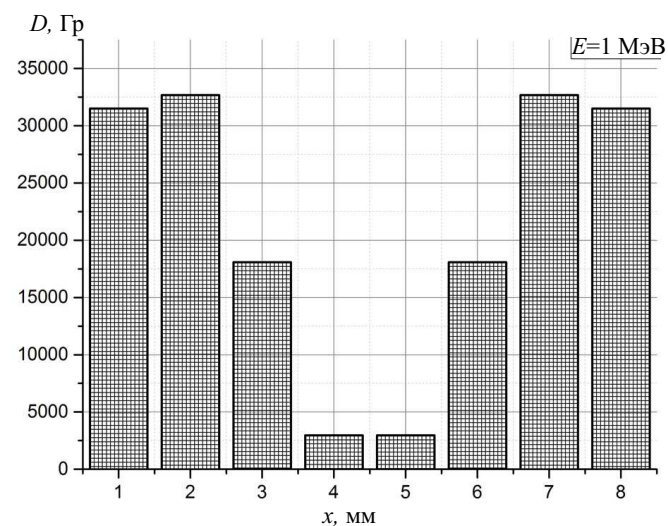


Рис. 2: Гистограмма распределения поглощенной дозы в каждом слое фантома толщиной 1 мм за сеанс облучения с двух сторон пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ

Как видно из рис. 2, крайние слои фантома облучаются в более высоких дозах по сравнению с внутренними слоями.

При моделировании считается падающий на дюралюминиевую пластину заряд во время облучения. Зная измеренный заряд на дюралюминиевой пластине при проведении эксперимента, производился расчет поглощенной дозы в продукте при каждом сеансе облучения.

Для проверки разработанного алгоритма расчета поглощенной дозы использовались радиохромные дози-



Рис. 3: Куски охлажденной форели, облученные в вакуумной упаковке в различных дозах и необлученный контрольный образец

метрические пленки GEX В3. Пленка помещалась на дюралюминиевую пластину, расположенную на расстоянии 12 см от выхода лучей. Проводилось облучение, после которого происходило сравнение поглощенной дозы в пленке, определенной по изменению её оптической плотности, с рассчитанным, при помощи алгоритма, значением. Поглощенная доза в пленке, рассчитанная при помощи разработанного алгоритма, отличалась от измеренной экспериментально не более чем на 15%. Данные отличия связаны с погрешностью в измерении заряда при облучении, а также с приближениями алгоритма, такими как однородность облучаемого объекта и вылетающие под одним углом электроны.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 приведены средние значения заряда на дюралюминиевой пластине и результаты расчетов поглощенной дозы в исследуемых образцах.

Таблица 1: Значения заряда, измеренного при облучении на пластине, и поглощенные дозы в продукте, рассчитанные при помощи GEANT4

Заряд, нКл	Поглощенная доза, кГр
650	0.02
6450	0.2
64500	2
192500	6.3
651000	21.3

На рис. 3 представлены фотографии облученных в различных дозах кусков рыбы, а также контроль-

ного необлученного образца. При облучении в дозах до 2 кГр структура и органолептические свойства форели не изменялись, при этом после облучения форели в дозах 6 кГр и 21 кГр наблюдались существенные изменения цвета и консистенции продукта, по сравнению с контрольным необлученным образцом.

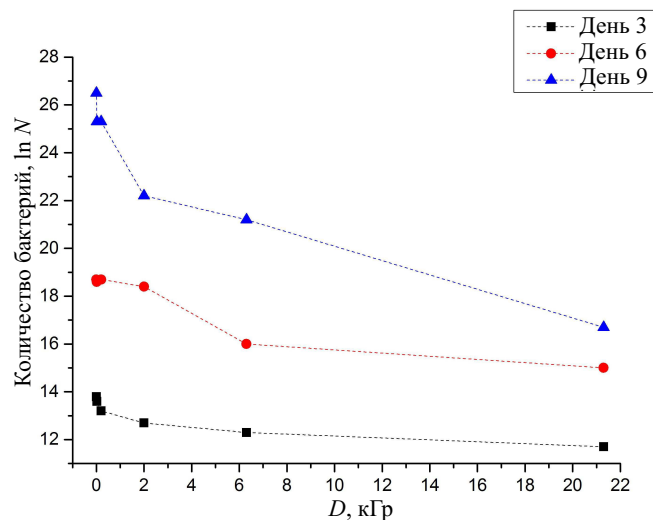


Рис. 4: Зависимости количества бактерий КМАФАнМ ($\ln N$) в образцах от дозы облучения (кГр), измеренные на 3, 6 и 9 сутки после облучения

На рис. 4 представлены зависимости количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, измеренных экспериментально на 3, 6 и 9 сутки после проведения облучения, от поглощенной дозы, рассчитанной с помощью программного кода.

Как видно из рис. 4, с увеличением дозы облучения количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и бактерий уменьшается. При этом их количество возрастало с увеличением сроков хранения. Сохранение жизнеспособности бактерий даже при высоких дозах связано с тем, что внутренние слои были облучены в более низких дозах по сравнению с внешними слоями рыбы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате эксперимента было установлено, что при воздействии пучка ускоренных электронов с энергией 1 МэВ количество мезофильных аэробных,

факультативно-анаэробных микроорганизмов уменьшалось с увеличением дозы облучения в диапазоне от 21 Гр до 21 кГр. При этом остаточные радионуклиды и патогенные микроорганизмы после обработки обнаружены не были.

Зная схему облучения, параметры ускорителя, размеры пучка, энергетический спектр частиц, ток пучка, поглощенный при облучении заряд, возможно использовать разработанный с помощью программного кода GEANT4 алгоритм для расчетов поглощенной дозы в различных продуктах для других типов ускорителей электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-016-00198 а.

-
- [1] Кодекс Алиментариус. Облученные продукты питания. Совместная программа ФАО/ВОЗ по стандартам на пищевые продукты. М.: Вест Мир, 2007.
- [2] Hsiang-Mei L, Yu-Chi C, Yin-Hsuan C et al. Trends in Food Science & Technology. 2015. **44**. P. 66.
- [3] Todoriki S., Hayashi T. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2004. **84**(15). P. 2010.
- [4] Hayashi T., Todoriki S. «Treatment of Foods with Soft-electrons (Low-energy Electrons)». JAERI-Conf. 2002.
- [5] Josephson. E. S., Peterson. M. S. ed. Preservation of Food by Ionizing Radiation. **II**. Ch. 6. CRC Press. Inc., Boca Raton. Pб, 1983.
- [6] Ehlermann D. A. E., Morehouse K. M. Rad. Phys. and Chem. 2016. **129**, December. P. 53.
- [7] Josephson. E. S., Peterson M. S. ed. Preservation of Food by Ionizing Radiation. **III**. Ch. 2. CRC Press. Inc., Boca Raton. Pб, 1983.
- [8] Cleland M. R. Industrial applications of electron accelerators. CAS - CERN Accelerator School and KVI: Specialised CAS Course on Small Accelerators, Zeegse, The Netherlands, 24 May - 2 Jun 2005. P. 383. (CERN-2006-012).
- [9] Arvanitoyannis I. S., Stratakos A., Mente E. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2008. **49**, N 1. P. 68. DOI:10.1080/10408390701764278.

Treatment of chilled trout by beams of accelerated electrons

U. A. Bliznyuk¹, P. U. Borchevovskaya¹, F. R. Studenikin^{1,a}, A. P. Chernyev^{1,2}, D. S. Yurov²

¹Department of General Physics and Molecular Electronics, Faculty of Physics

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics

Lomonosov Moscow State University

Moscow 119991, Russia

E-mail: ^af.studenikin@gmail.com

This study illustrates the impact of 1 MeV electrons at different doses on bacteria quantity in chilled trout. It was determined that the irradiation of fish led to a significant decrease in bacteria quantity in it. Some structure changes in the product were determined after the treatment of irradiation in doses from 2 kGy to 21 kGy.

PACS: 87.53.-j

Keywords: radiation treatment, beams of accelerated electrons, changes in trout structure after irradiation.

Received 03 July 2018.

Сведения об авторах

1. Близнюк Ульяна Александровна — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: uabliznyuk@gmail.com.
2. Борщевговская Полина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: alexeevapo@mail.ru.
3. Студеникин Феликс Рикардович — магистрант; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: f.studenikin@gmail.com.
4. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой, зав. лабораторией пучковых технологий и медицинской физики; (495) 939-49-46, e-mail: a.p.chernyev@yandex.ru.
5. Юров Дмитрий Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: 8(495) 939-56-22, e-mail: d_yurov88@mail.ru.