

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОХЛАЖДЕННОЙ ФОРЕЛИ

*А. П. Черняев^{а,б}, У. А. Близнюк^{а,1}, П. Ю. Борщegovская^а,
В. С. Ипатова^а*

^а Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

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

Проведены исследования по радиационной обработке фарша охлажденной форели с помощью ускорителя электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ. Представлены результаты воздействия электронов в дозах 0,24, 0,48, 0,96, 2,8 и 5,6 кГр на жизнеспособность микроорганизмов в рыбном фарше. Экспериментально показано, что электронное излучение, генерируемое ускорителем, в дозах 0,24–5,6 кГр снижает обсемененность фарша форели по сравнению с необлученными образцами по достижении 15 сут после проведения облучения, а также позволяет контролировать обсемененность охлажденной рыбной продукции в течение двух недель после проведения радиационной обработки.

Minced chilled trout was treated by 1-MeV electron beam using the industrial electron accelerator UELR-1-25-T-001. The samples were irradiated with the doses of 0.24, 0.48, 0.96, 2.8 and 5.6 kGy. It was found that the electron irradiation with the doses ranged from 0.24 to 5.6 kGy reduced the bacteria content in trout to compare with the control samples on the 15th day after irradiation. Electron irradiation method allows one to control the microbiological parameters of chilled trout during the two weeks after irradiation treatment.

PACS: 87.53.-j

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение сроков хранения продуктов питания при сохранении их качества является актуальной задачей, решение которой обеспечит увеличение объемов производства отечественной продукции и снизит потребность в импорте. Традиционные методы обработки продукции с целью продления сроков хранения включают в себя использование пищевых добавок, консервантов, фумигантов и других химических препаратов. Однако применение химических веществ потенциально опасно для здоровья человека, в мире наблюдается тенденция к отказу от их применения. Одной

¹ E-mail: uabliznyuk@gmail.com

из наиболее эффективных и экологически безопасных технологий обеспечения безопасности и продления сроков хранения продуктов питания в настоящее время является их обработка ионизирующим излучением. По данным МАГАТЭ в 69 странах действует разрешение на облучение более чем 80 видов продукции. Создано более 200 специализированных центров, ведущих обработку отдельных категорий пищевой продукции и сельскохозяйственного сырья в промышленном масштабе [1]. Общий годовой объем облученной пищевой продукции в среднем составляет 400 тыс. т, причем каждый год спрос на эту услугу в мире возрастает [2–4]. По сравнению с другими методами обработки данная технология позволяет заменить или резко снизить использование консервантов, а также не приводит к повышению температуры обрабатываемого продукта, является менее энергозатратной по сравнению с другими методами [5]. Практика ее внедрения в общий технологический процесс производства продуктов питания широко используется во всем мире [3, 6–9].

В качестве физического воздействия в радиационной обработке пищевых продуктов разрешено применять электронное излучение с энергией не более 10 МэВ, гамма-излучение радиоизотопов ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,27$ лет, $E = 1,25$ МэВ) и ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ лет, $E = 0,66$ МэВ), а также тормозное излучение, генерируемое ускорителями с энергией не более 5 МэВ [2, 10]. По данным МАГАТЭ общее количество гамма-источников и ускорителей электронов, используемых для радиационной обработки продуктов питания, составляет около 2 тыс. шт. [3]. Выбор верхних энергетических пределов для электронного и гамма-излучений связан с необходимостью исключить образование в продуктах радионуклидов наведенной активности, являющихся результатом фотоядерных реакций [11]. В свою очередь, в многочисленных исследованиях установлено, что при дозах облучения до 10 кГр, рекомендованных международными и отечественными нормативными документами, опасные концентрации продуктов радиолиза в пищевых продуктах не образуются [6].

Анализ научных исследований показал, что для любого из вышеперечисленных источников ионизирующего излучения эффект от воздействия в случае специй, сухих овощей и фруктов в основном стабильный и пролонгированный, а в отношении рыбы и мяса, в том числе и мяса птицы, результат радиационной обработки зависит от многих факторов, таких как температура хранения, начальный состав микрофлоры, общая обсемененность продукции, уровень рН, химический состав, тип упаковки, наличие предварительной термической обработки, консервантов и пищевых добавок, костей и т. п. [8, 12–14].

Большое внимание уделяется изменению химического состава продукции в течение длительного периода хранения после воздействия ионизирующего излучения и, как следствие, ее органолептических показателей [12, 15–17]. Показано, что воздействие электронного излучения в дозах 1–3 кГр сразу после обработки не приводит к значительным изменениям химических показателей продукции, в частности уровня рН. Однако в ходе хранения эти показатели значительно меняются по сравнению с контрольными, что сильно влияет на органолептические свойства продуктов.

Проводятся исследования выживаемости различных видов бактерий в продуктах мясного и рыбного происхождения в зависимости от доз и типов ионизирующих излучений [17–20]. Дозы, при которых происходит значительное снижение популяций бактерий в физиологическом растворе, оказываются существенно отличными от соответствующих доз для бактерий, находящихся в продуктах [19]. Радиочувствитель-

ностью отличаются различные штаммы бактерий одного вида при попадании в питательную среду [18].

Неугасающий научный интерес к теме воздействия ионизирующих излучений в различных дозах на микробиологические, физико-химические и органолептические свойства продуктов питания, поиск оптимальных параметров проведения радиационной обработки различных видов продукции, а также принятие технологических регламентов и ГОСТов по проведению радиационной обработки пищевых продуктов, открытие инновационных центров радиационной обработки в России свидетельствуют об актуальности исследований в этой области.

Данная работа посвящена исследованию воздействия ускоренных электронов с энергией 1 МэВ в различных дозах на микробиологические показатели охлажденной форели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использовали охлажденную радужную форель. К измельченному мясу форели добавляли физиологический раствор в соотношении 1 : 3 и гомогенизировали до получения однородной суспензии. Гомогенат фарша мяса форели объемом 0,5 мл вносили в стерильные пластиковые пробирки типа эппендорф объемом 2 мл.

Облучение образцов проводилось на ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт. Образцы с гомогенатом размещались на дюралюминиевой пластине на расстоянии 12 см от выхода пучка электронов. При каждом облучении фиксировали заряд, упавший на пластину, и время облучения. Ток пучка во всех экспериментах оставался постоянным. Толщина рыбного фарша составляла (2 ± 1) мм.

Мощность дозы, поглощенная опытными образцами, оценивалась с использованием ферросульфатного метода дозиметрии. Дозиметрический раствор облучался по схеме, идентичной схеме облучения образцов с гомогенатом фарша форели. Плотность гомогената рыбного фарша $(0,994 \pm 0,05)$ г/см³ практически равнялась плотности дозиметрического раствора $(1,024 \pm 0,05)$ г/см³. Таким образом, при условии совпадения объемов раствора и гомогената, а также условий облучения мощность дозы, измеренная с помощью дозиметрического раствора, совпадает с мощностью дозы, поглощенной гомогенатом.

Итак, мощность дозы, поглощенной дозиметрическим раствором, облученным на ускорителе электронов, составила (25 ± 2) Гр/с, а дозы, поглощенные опытными образцами с рыбным фаршем, составили 0,24, 0,48, 0,96, 2,8 и 5,6 кГр.

Равномерность облучения оценивалась с помощью программного кода Geant4, основанного на методе Монте-Карло. В ходе моделирования учитывался начальный спектр электронного излучения на выходе ускорителя, количество электронов в пучке составляло 10^8 . Моделируемая площадь облучения была приравнена к площади дюралюминиевой пластины, на которую помещались образцы. Геометрические размеры пластины, являющейся по форме прямоугольным параллелепипедом, были также измерены и составили $35,0 \times 3,0 \times 0,8$ см. Поскольку плотность суспензии гомогената фарша форели $(0,994 \pm 0,05)$ г/см³ близка к плотности воды, то в качестве моделей

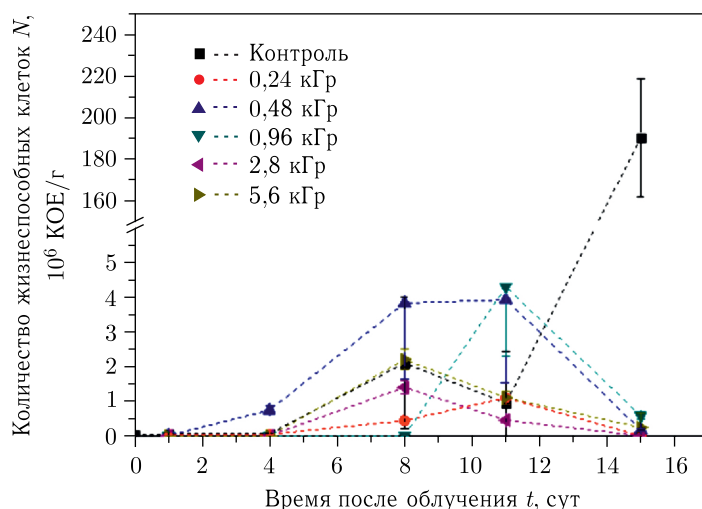
образцов были использованы водные фантомы соответствующих размеров. Учитывались характеристики пробирок (полипропиленовый цилиндр радиусом 4,5 мм, длиной 39 мм, толщиной стенок 1 мм). Объем воды в пробирке составлял $0,5 \text{ см}^3$, максимальная толщина водного слоя — 2 мм.

Программный код включает в себя моделирование всех возможных процессов взаимодействия электронов с веществом, погрешность в определении которых составляет не более 2%. Исходя из результатов компьютерного моделирования пробег электронов с энергией 1 МэВ в воде составил менее 5 мм. Равномерность распределения дозы, поглощенной водным фантомом толщиной 2 мм, составила 96%.

После проведения радиационной обработки каждые три дня осуществлялся мониторинг микробиологических показателей облученных и контрольных образцов, которые хранились в течение 15 сут при температуре 4°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изначально общее количество жизнеспособных бактерий в охлажденной форели составляло $(6,6 \pm 1,8) \cdot 10^3$ КОЕ/г. На рисунке представлена зависимость общего количества жизнеспособных клеток в образцах, облученных электронами в различных дозах, от времени хранения после проведения облучения. Также для сравнения представлена динамика изменения обсемененности контрольных необлученных образцов в течение 15 сут с момента начала исследования. Как видно из рисунка, кинетика изменения количества клеток с течением времени во всех образцах носит немонотонный характер.



Зависимость общего количества жизнеспособных клеток в образцах, облученных ускоренными электронами в дозах 0,24, 0,48, 0,96, 2,8, 5,6 кГр, от времени хранения после проведения облучения

По достижении 15 сут с момента исследования обсемененность контрольных образцов возросла до $(2 \pm 0,2) \cdot 10^8$ КОЕ/г. Для сравнения обсемененность рыбного фарша, обработанного электронным излучением, во всех исследуемых дозах не превышала $(4 \pm 0,7) \cdot 10^6$ КОЕ/г в течение всего периода наблюдения.

Для образцов, облученных в дозах 0,24, 0,48 и 0,96 кГр, зависимости количества жизнеспособных клеток в них от времени носили схожий характер. По достижении 15 сут их микробиологические показатели снизились до 10^5 КОЕ/г и ниже, что соответствовало предельно допустимому уровню обсемененности рыбной продукции.

По достижении 15 сут с момента облучения количество микроорганизмов в образцах, облученных в дозах 2,8 и 5,6 кГр, колебалось около значений 10^5 – 10^6 КОЕ/г.

Необходимо отметить, что морфологический анализ колоний, высеянных из контрольных образцов, показал разнообразие их видов на протяжении всего периода хранения продукта при температуре 4 °С. Колонии, высеянные из образцов, облученных в дозах 0,24 и 0,48 кГр, не отличались в диаметре и консистенции от контрольных образцов. Изменения при дозе 0,96 кГр были незначительными и стали заметны на 11 сут после проведения облучения. Колонии, высеянные из фарша, облученного в дозах 2,8 и 5,6 кГр, имели значительные изменения диаметра и внешнего вида. При этом с увеличением времени хранения эти изменения становились более выраженными.

Воздействие ионизирующим излучением меняет биохимические и морфологические свойства микробных клеток [21]. При этом степень изменений зависит от многих факторов, в том числе и от радиочувствительности данной популяции. Развитие нескольких сообществ, обладающих различной степенью радиорезистентности по отношению к ионизирующему излучению в условиях ограниченного питательного ресурса рыбного фарша, происходит асинхронно, этим и объясняются колебания количества жизнеспособных клеток в облученных образцах во время хранения (см. рисунок).

По результатам исследования установлено, что электронное излучение в дозах 0,24–5,6 кГр снижает обсемененность фарша форели по сравнению с необлученными образцами по достижении 15 сут после проведения облучения. К концу исследования для всех облученных образцов общая обсемененность в среднем не превышала 10^6 КОЕ/г. Для сравнения в контрольных образцах этот показатель превысил 10^8 КОЕ/г. Таким образом, низкоэнергетическое электронное излучение позволяет контролировать обсемененность охлажденной рыбной продукции, хранящейся в течение 15 сут при температуре 4 °С.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-016-00198а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санжарова Н. И., Гераськин С. А., Исамов Н. Н. и др. Научные основы применения радиационных технологий в сельском хозяйстве. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2013. 133 с.
2. Kume T., Furuta M., Todoriki S. et al. Status of Food Irradiation in the World // Rad. Phys. Chem. 2009. V. 78, Iss. 3. P. 222–226.
3. Черняев А. П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. М.: Книж. дом «Университет», 2018. 310 с.

4. Козьмин Г. В., Санжарова Н. И., Кибина И. И. и др. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29, № 5. С. 87–92.
5. Sommers C. H., Fan X. Food Irradiation Research and Technology. Oxford: Blackwell Publ. Professional, 2006. 317 p.
6. САС, 2003. CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius, 2003. FAO/WHO, Rome.
7. Diehl J. F. Safety of Irradiated Foods. Second Ed., Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. P. 454.
8. Niemira B. A., Fan X. Low-Dose Irradiation of Fresh and Fresh-Cut Produce: Safety, Sensory and Shelf Life // Food Irradiation Research and Technology / Eds.: C. H. Sommers, X. Fan. Blackwell, Ames, IA, 2006.
9. Санжарова Н. И., Козьмин Г. В., Павлов А. Н., Кобялко В. О., Лой Н. Н., Цыгвинцев П. Н. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: история, современное состояние и перспективы // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Обнинск, 2018. С. 32–35.
10. Санжарова Н. И., Козьмин Г. В., Бондаренко В. С. Радиационные технологии в сельском хозяйстве: стратегия научно-технического развития // Инноватика и экспертиза. 2016. Т. 16, вып. 1. С. 197–206.
11. Алимов А. С. Практическое применение электронных ускорителей. Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-13/877. М., 2011.
12. Yang Z., Wang H., Wang W., Qi W., Yue L., Ye Q. Effect of 10 MeV E-Beam Irradiation Combined with Vacuum-Packaging on the Shelf Life of Atlantic Salmon Fillets during Storage at 4 °C // Food Chem. 2014. V. 145. P. 535–541.
13. Guillén-Casla V., Rosales-Conrado N., León-González M. E., Pérez-Arribas L. V., Polo-Díez L. M. Principal Component Analysis (PCA) and Multiple Linear Regression (MLR) Statistical Tools to Evaluate the Effect of E-Beam Irradiation on Ready-to-Eat Food // J. Food Composition Analysis. 2011. V. 24, Iss. 3. P. 456–464.
14. Black J. L., Jaczynski J. Temperature Effect on Inactivation Kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 by Electron Beam in Ground Beef, Chicken Breast Meat, and Trout Fillet // J. Food Science. 2006. V. 71, No. 6. P. 221–227.
15. Oraei M., Motallebi A., Hoseini E. Effect of Gamma Irradiation and Frozen Storage on Chemical and Sensory Characteristics of Rainbow Trout Fillet // Intern. J. Food Science Technol. 2012. V. 47, No. 5. P. 977–984.
16. Krizek M., Matejkova K., Vacha F., Dadakova F. Effect of Low-Dose Irradiation on Biogenic Amines Formation in Vacuum-Packed Trout Flesh // Food Chem. 2012. V. 132, Iss. 1. P. 367–372.
17. Kim H. J., Chun H. H., Song H. J., Song K. B. Effects of Electron Beam Irradiation on the Microbiological Growth and Quality of Beef Jerky during Storage // Rad. Phys. Chem. 2010. V. 79, Iss. 11. P. 1165–1168.
18. Kundu D., Gill A., Lui C., Goswami N., Holley R. Use of Low Dose E-Beam Irradiation to Reduce *E. coli* O157:H7, non-O157 (VTEC) *E. coli* and *Salmonella* Viability on Meat Surface // Meat Science. 2014. V. 96, Iss. 1. P. 413–418.
19. Черняев А. П., Блиznyuk U. A., Borschegovskaya P. Yu., Ipatova V. S., Nikitina Z. K., Gordonova I. K., Studenikin F. R., Yurov D. S. Treatment of Refrigerated Trout with 1 MeV Electron Beam to Control Its Microbiological Parameters // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81, No. 11. P. 1656–1659.

20. Song H.P., Kim B., Jung S., Choe J.H., Yun H., Kim Y.J., Jo C. Effect of Gamma and Electron Beam Irradiation on the Survival of Pathogens Inoculated into Salted, Seasoned, and Fermented Oyster // *LWT-Food Sci. Technol.* 2009. V. 42. P. 1320–1324.
21. Полякова И.В., Кобялко В.О., Саруханов В.Я., Козьмин Г.В., Фролова Н.А., Лыкова И.Н., Воронин Л.А. Исследование эффективности холодной стерилизации рыбных пресервов электронным излучением в зависимости от дозиметрических параметров облучения // *Радиация и риск.* 2017. Т. 26, № 2. С. 97–106.

Получено 18 октября 2019 г.