

УДК 614.3

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2018 г. П. А. Быстров^а, А. В. Гордеев^б, А. Ю. Колоколова^с, М. А. Завьялов^с, Н. В. Илюхина^с, А. А. Молин^б, Ю. С. Павлов^а, С. П. Полякова^д, А. В. Прокопенко^е*, В. П. Филиппович^с**

^аИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский пр. 31 к. 4, Москва, 119071 Россия

^бФедеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна ФМБА России,
ул. Живописная 46, Москва, 123182 Россия

^сВсероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования (ВНИИТеК),
ул. Школьная 78, Видное, Московская обл., 142703 Россия

^дВсероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности (ВНИИКП),
ш. Энтузиастов 5, Москва, 111024 Россия

^еНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

*E-mail: avprokopenko@mephi.ru

**E-mail: vit_fil1@rambler.ru

Поступила в редакцию 07.06.2018 г.

После доработки 07.06.2018 г.

Принята к публикации 07.07.2018 г.

Работа посвящена исследованию эффективности применения облучения электронным пучком в пищевой отрасли с целью снижения микробиологической обсемененности сельскохозяйственной и пищевой продукции в процессе использования и долгосрочного хранения. Представлены результаты экспериментов по облучению модельных сред с типичными для пищевой промышленности культурами микроорганизмов.

Ключевые слова: радиационная обработка, электронный пучок, ускоритель, доза, нормы, пищевая продукция, микробиология, безопасность

DOI: 10.1134/S2079562917060057

РАДИАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Проблема рационального использования продуктов питания и их долгосрочного хранения всегда имеет особое значение. В рамках программы координированных исследований изучаются возможности, позволяющие государству увеличить поставки пищевых продуктов на национальном уровне за счет снижения потерь урожая и предотвращения различных видов порчи продуктов. Для этого необходимо уделить особое внимание приемлемости облученных пищевых продуктов для регулирующих органов и потребителей; разработке методов производства с тем, чтобы и поставщики, и потребители получали высококачественные продукты [1].

В настоящее время 40 стран проводят облучение более чем 80 видов продукции. Реализуется программа ФАО/МАГАТЭ “Применение ядерных технологий в продовольственной и сельскохозяйственной

областях”. Российская Федерация, как правопреемник Советского Союза, была одной из первых стран, которая начала проводить облучение пищи. В 1958 г. Министерство здравоохранения СССР дало разрешение на обработку ионизирующим излучением картофеля и зерна. Облучение сельскохозяйственной и пищевой продукции в СССР успешно работало вплоть до 1990-х годов. (Алексахин Р.М., 1980, Батыгин Н.Ф., Савин В.Н., 1966, Гудков И.Н., 1991, Каушанский Д.А., Кузин А.М., 1984, Мейсель М.Н., Черняев Н.Д., 1956, Корнеев Н.А. и др., 1980) [2]. Двадцать пять лет исследовательской работы в области сохранения пищевых продуктов с помощью лучевой обработки показали, что эта технология позволяет снизить потери урожая и производить продукты, безопасные для употребления. По сравнению с обычными методами сохранения пищевых продуктов эта технология требует значительно меньших затрат энергии и может заменить или резко снизить применение пищевых консервантов и

фумигантов, которые представляют опасность как для потребителей, так и для работников предприятий пищевой промышленности [1].

В настоящее время мировой рынок характеризуется ростом технологий обработки пищевых продуктов. В этот период возросли вложения в инфраструктуру, созданы коммерческие центры стерилизации и существенно расширился перечень продуктов, подлежащих радиационной обработке. Отмечается снижение участия государства и возрастает роль коммерческих компаний оказывающих услуги по радиационной обработке пищевой продукции на радиационно-ускорительных установках. В 1993 г. Американская медицинская ассоциация (АМА) вынесла заключение о безопасности и сохранении питательных свойств облученных продуктов и напитков. В 2006 г. Департамента сельского хозяйства США (USDA-APHIS) опубликовал постановление о применении радиационной обработки для тропических фруктов, экспортируемых в США из Индии, Мексики, Пакистана, Южной Африки, Таиланда и Вьетнама с целью недопущения распространения насекомых-вредителей. Рост рынка радиационной обработки сельскохозяйственной и пищевой продукции обусловлен следующими факторами: рост рынков потребления; возросли потери от пищевых отравлений; значительные потери пищевой продукции на всех этапах технологической цепочки “поле–потребитель”; глобализация потребления и производства продуктов питания и потребление экологических продуктов питания [3]. Согласно данным, представленным в работе [4] в 2005 г. объем облученных продуктов в мире составил 300 тыс. тонн, а к 2010 г. он уже вырос до 400 тыс. тонн. Лидерами по приросту обрабатываемой пищевой продукции оказались страны юго-восточной Азии, в которых объем облучаемой продукции увеличился втрое. США является одним из мировых лидеров по развитию программ коммерческого облучения пищевых продуктов. В 2010 г. в США было облучено 103 тыс. тонн продуктов питания, включая 80 тыс. тонн пряностей, 15 тыс. тонн фруктов и овощей, а также 8 тыс. тонн мяса и птицы. По сравнению с 2005 г. наибольший рост объемов облученной продукции наблюдался в области дезинсекции овощей и фруктов.

Несмотря на имеющийся со времен СССР существенный научно-технический задел по радиационной обработке пищевых продуктов [5] в России созданием нормативно правовой базы для облучения продуктов питания стали заниматься только во второй половине двухтысячных годов [6]. В соответствии с “Решениями по итогам засе-

дания президиума Совета при Президенте России по модернизации экономики и инновационному развитию” от 11 декабря 2014 г. поставлена задача по внедрению радиационных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. На сегодняшний день наметилось заметное отставание РФ в данном направлении, отсутствует целевая программа развития радиационных технологий, необходима разработка специальной радиационной техники и нормативных документов, а также проведение исследований в целях создания научно-методической базы радиационной обработки сельскохозяйственного сырья и готовой продукции.

С 2015 г. в России последовательно вводятся нормативные документы ГОСТ 33340-2015 “Пищевые продукты, обработанные ионизирующим излучением. Общие положения” и ГОСТ ISO 14470-2014 “Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением”. Он одобрен Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации и принят к действию на территории стран, входящих в Содружество независимых государств. С 2017 г. в России и странах БРИКС введены руководства по облучению ряда продуктов питания ГОСТ 33271-2015 “Пряности сухие, травы и приправы овощные. Руководство по облучению в целях борьбы с патогенными и другими микроорганизмами”, ГОСТ 33302-2015 “Продукция сельскохозяйственная свежая. Руководство по облучению в целях фитосанитарной обработки”, ГОСТ 33820-2016 “Мясо свежее и мороженое. Руководство по облучению для уничтожения паразитов, патогенных и иных микроорганизмов” и ГОСТ 33825-2016 “Полуфабрикаты из мяса упакованные. Руководство по облучению для уничтожения паразитов, патогенных и иных микроорганизмов”. В данных руководствах представлены характерные режимы обработки сухого плодовоовощного сырья и фитосанитарной обработки свежей сельскохозяйственной и мясной продукции.

В последние десятилетия в России активно ведутся работы по созданию новых и модернизации существующих радиационно-ускорительных комплексов для облучения медицинской, текстильной и пищевой продукции [7]. В 2016–2017 годах в России введены в эксплуатацию два новых радиационных комплекса на основе электронных ускорителей: ООО “Теклеор” Калужская область и ООО “Акцентр”, индустриальный парк “Родники”, Ивановская область. В радиационном центре ООО “Теклеор” используется ускоритель электронов на

энергию 10 МэВ со средней мощностью пучка 15 кВт, который разрабатывался в НИИЯФ МГУ и изготовлялся в АО “НПП “Торий”. В проекте комплекса для повышения производительности предполагается установка второго ускорителя. В стерилизационном центре ООО “Акцентр” используется ускоритель электронов с перестраиваемой энергией от 2 МэВ до 10 МэВ со средней мощностью пучка 12 кВт разработки ООО “НПП “Корад” совместно с НИЯУ МИФИ. Данный ускоритель показал рекордное значение КПД “от розетки” до 21%.

Для внедрения в производство принятой нормативно-правовой базы на сегодняшний день требуется разработка технических регламентов облучения отдельных продуктов питания на конкретных радиационно-ускорительных установках. В основу разработки технических регламентов ключевой задачей является ингибирование микроорганизмов находящиеся как на поверхности, так и непосредственно в продукте питания. Один из этапов исследований имеющий фундаментальный характер должен проводиться на разных модельных средах. Только на основе моделирования можно спрогнозировать эффекты микробной деkontаминации, а также сохранить целостность и качество продукта. Необходимо решение вопросов, на основе изучения радиобиологических показателей эффективности радиационной обработки в зависимости от исходных микробиологических показателей, дозиметрических характеристик ионизирующих излучений (доза, мощность дозы, распределение поглощенной дозы в облучаемой продукции) и свойств биологической среды продукции. Для качественного облучения продуктов питания так же важно учитывать равномерность распределения по массе продукта. Такой подход обеспечивают надежные методы прогнозирования доставки дозы излучения для гарантии полной инактивации патогенных микроорганизмов.

Существуют значительные различия в восприимчивости к ионизирующему излучению между видами и даже между штаммами бактерий. На радиочувствительность также существенно влияют такие факторы окружающей среды, как используемые среды, активность воды и температура во время обработки, а также форма бактерий (например, споры и вегетативная форма) [8]. Облучение пищевых продуктов может контролировать заражение насекомыми, уменьшать количество патогенных или условно-патогенных микроорганизмов и замедлять биологические процессы [9]. Дозы облучения до 5 кГр способны поражать неспорообразующие патогенные микроорганизмы (например, *Salmonella*, *Vibrio parahemolyticus*, *Staphylococcus aureus*

и пр.), которые являются основными источниками наиболее серьезных заболеваний, переносимых пищевыми продуктами.

Таким образом, к изучению влияния ионизирующего облучения на пищевую продукцию и сельскохозяйственное сырье необходимо подойти комплексным решением задач, основанных на характеристиках изучаемой продукции таких как: физико-химические свойства продукта; обсемененность продукта до и после облучения. Зная величину исходной обсемененности продукта, можно рассчитать дозу, после облучения которой количество живых клеток достигнет нормируемого уровня; устойчивость к воздействию ионизирующих излучений у различных микроорганизмов [8].

Задачами представленных научных исследований являлось изучение ряда наиболее важных характеристик, влияющих на технологические факторы условий обработки различных продуктов питания таких как: определить степень устойчивости культур микроорганизмов *S. aureus*, *E. coli*, *Salmonella*, облучаемых электронным пучком; определить различия эффективности облучения при горизонтальном и вертикальном расположении образцов, содержащих определенное количество микроорганизмов, обеспечивающее различное по площади пятно контакта образца с воздухом.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА МОДЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

В рамках подготовки к разработке технических регламентов по облучению пищевой продукции электронным пучком проведены исследования выживаемости микроорганизмов на модельных средах. В исследованиях эффективности угнетения микроорганизмов использовали следующие штаммы: *Escherichia coli* ATCC, полученный из штамма ВКМ В 114191, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 (f-49)2, полученный из штамма ВКМ 201189 и *Salmonella enterica subsp. Enterica serovar Typhimurium* ATCC 140283. Облучение полученных модельных систем проводили на ускорителе УЭЛВ-10-10-С-70 в ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН, средняя энергия электронов пучка – 7–8 МэВ. Модельные системы облучали дозами в интервале от 0 до 10 кГр.

В качестве носителя культуры была выбрана твердая питательная среда приготовленная по ГОСТ 11133-1-2014 п. 3.2.7 на основе мясного бульона с добавлением бактериологического агара. Инокуляцию модельных систем проводили сле-

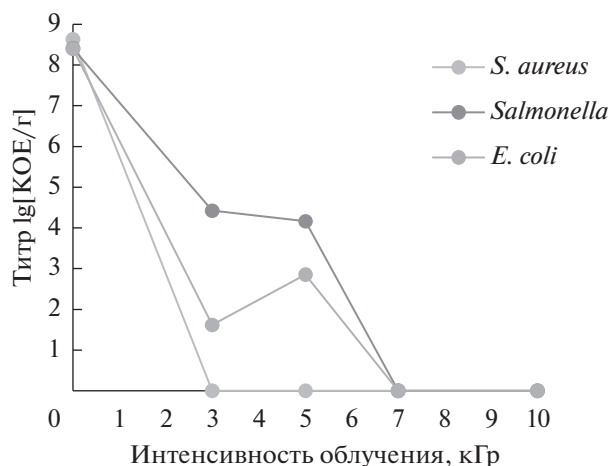


Рис. 1. Эффективность облучения культур *Salmonella*, *E. coli*, *S. aureus* при вертикальном расположении пробирок.

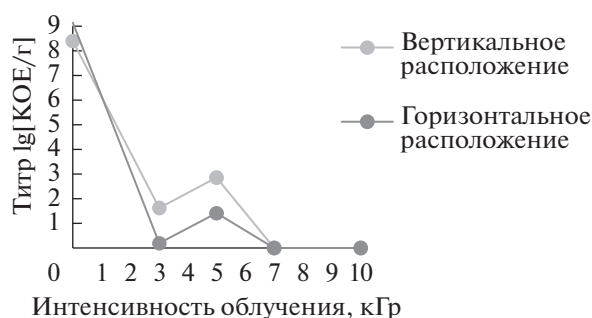


Рис. 2. Ингибирование культуры *E. coli* при горизонтальном и вертикальном расположении пробирок.

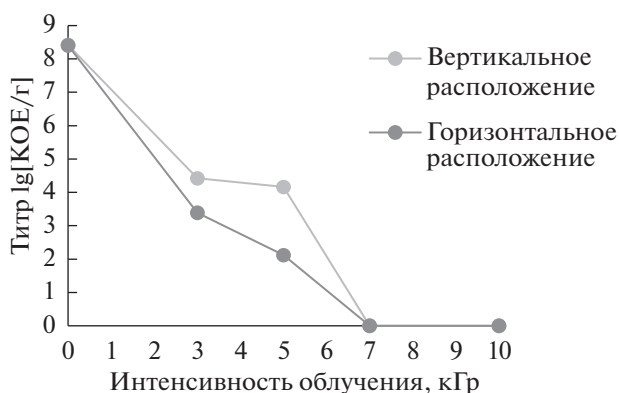


Рис. 3. Ингибирование культуры *Salmonella* при горизонтальном и вертикальном расположении пробирок.

дующим образом: суспензию, содержащую определенное количество микроорганизмов одной из изучаемых культур, вносили в пробирки, содержащие 5 мл твердой незастывшей среды из расчета 2% инокулята от массы среды.

Процесс облучения контролировался пленочными дозиметрами СО ПД(Э)-1/10, расположенными вблизи пробирок и внутри пробирок с аналогом субстрата. Данные дозиметрические пленки отнесены Ростестом к средствам измерения и предназначены для определения поглощенной дозы фотонного и электронного излучений с погрешностью $\pm 7\%$ при доверительной вероятности 0.95. Поглощенную пленкой дозу измеряют на спектрофотометре при длине волны $\lambda = 550$ нм методом сравнения значений оптической плотности относительно контрольного образца.

Эффективность облучения определяли путем исследования остаточной микрофлоры образцов подвергшиеся различной интенсивностью облучения согласно действующей нормативной документации по определению количества мезофильно-аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов ГОСТ 10444.15-95.

Результаты проведенных исследований показали различную устойчивость изучаемых штаммов микроорганизмов к ионизирующему облучению (см. рис. 1). Исследования по эффективности угнетения различных видов микроорганизмов на твердой среде при вертикальном расположении образцов при облучении показали, что наиболее устойчивыми микроорганизмами оказались *Salmonella*, *E. coli*, (грамотрицательные), менее устойчивым — *S. aureus* (грамположительные).

Результаты эффективности ингибирования исследуемых микроорганизмов под воздействием ионизирующего облучения в различных положениях с различной интенсивностью представлены в виде графиков на рис. 2, 3, 4.

Анализ графиков рис. 2 показывает, что снижение начального микробного количества при облучении интенсивностью 3 кГр при горизонтальном расположении снизилось lg (с 9.0 до 0.2), при вертикальном расположении lg (с 8.4 до 1.6). При интенсивности облучения 5 кГр при горизонтальном расположении снизилось lg (с 9.0 до 1.4), при вертикальном расположении lg (с 8.4 до 2.8). При интенсивности облучения в 7–10 кГр наблюдается полное угнетение начальной степени обсеменения. Исследования образцов, содержащих культуру *E. coli*, показали, что наиболее эффективный вариант угнетения условно-патогенной

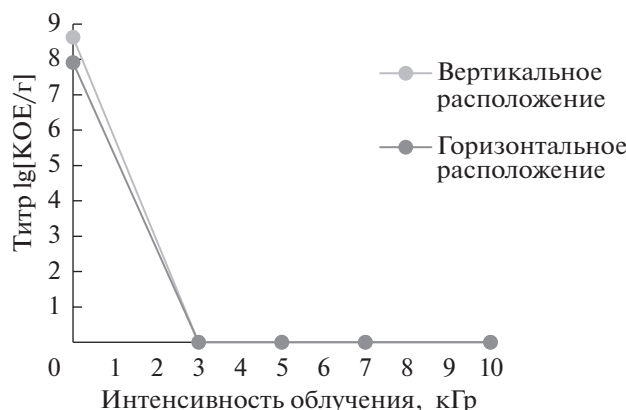


Рис. 4. Ингибирование культуры *S. aureus* при горизонтальном и вертикальном расположении пробирок.

микрофлоры при облучении – в горизонтальном расположении пробирок.

Из графиков рис. 3 следует, что снижение начального микробного количества при облучении интенсивностью 3 кГр при горизонтальном расположении снизилась lg (с 8.3 до 3.3), при вертикальном расположении lg (с 8.3 до 4.4). При интенсивности облучения 5 кГр при горизонтальном расположении снизилась lg (с 8.3 до 2.1), при вертикальном расположении lg (с 8.3 до 4.1). При интенсивности облучения в 7–10 кГр наблюдается полное угнетение начальной степени обсеменения. Исследования образцов, содержащих культуру *Salmonella*, показали, что наиболее эффективный вариант угнетения патогенной микрофлоры при облучении пробирок – в горизонтальном положении.

При обработке тест культур ионизационным облучением от 4 до 5 кГр наблюдается увеличение роста микроорганизмов для всех условий обработки, и только затем их ингибирование. Это объясняется эффектом радиационного гормезиса – благоприятным воздействием на живую клетку малых доз облучения.

Согласно графикам на рис. 4 при облучении дозой 3 кГр образцов с культурой *S. aureus* как при горизонтальном, так и при вертикальном расположении образцов наблюдается полное угнетение начальной степени обсеменения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы использования радиационной обработки ускоренными электронами пищевой продукции для повышения сроков хранения и дезинсекции и дан краткий обзор ра-

бот и нормативно-правовая база по радиационной обработке.

Представлены результаты научно-исследовательских работ по радиационной обработке электронным пучком модельных сред, содержащих микроорганизмы. Из изученных культур, наиболее устойчивыми к ионизационному облучению оказались штамм *Salmonella* и *E. coli* (грамотрицательные), менее устойчив штамм микроорганизмов *S. aureus* (грамположительные). Отмечено различие результатов для вертикального и горизонтального расположения пробирок. Наиболее эффективным является горизонтальное расположение образцов при облучении. При обработке культур *Salmonella* и *E. coli* с интенсивностью облучения от 4 до 5 кГр наблюдается увеличение роста микроорганизмов для всех условий обработки по сравнению с меньшей интенсивностью в 3 кГр, что можно объяснить существованием явления радиационного гормезиса [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Под общ. ред. Козьмина Г.В., Гераскина С.А., Санжаровой Н.И. Обнинск: ВНИИРАЭ. 2015. 400 с.
2. Павлов А.Н. // Автореф. дис. канд. биол. наук. Обнинск: ВНИИРАЭ. 2016.
3. Radiation Technologies: View from Russia. 2015. Moscow: RADTECH. 65 p.
4. Kume T., Todoriki S. // Radioisotopes J. 2013. V. 62. No. 5. P. 291.
5. Гельфанд С.Ю., Завьялов М.А., Петров А.Н., Прокопенко А.В., Филиппович В.П. // Хранение и переработка сельхоз сырья. 2013. № 2. С. 25.
6. Кодекс Алиментариус. Облученные продукты питания. М.: Весь Мир. 2007. 24 с.

7. Gracheva A.Yu. et al. // *Yad. Fiz. Inzhinir.* 2015. V. 6. No. 11–12. P. 673–679. (in Russian) [*Phys. Atom. Nucl.* 2016. V. 79. No. 14. P. 1682. doi 10.1134/S1063778816140118] doi 10.1134/S2079562915060111
8. Sumner S.S. et al. // *J. Food Prot.* 1996. V. 59(3). P. 319.
9. Kumar A. // *Food Irradiation and Development of an Alternative Method for the Detection of 2-Alkylcyclobutane.* 2004. India: B.V.Sc & A.H., Acharya N.G. Ranga Agricult. Univ.
10. Кузин А.М. // *Идеи радиационного гормезиса в атомном веке.* М.: Наука. 1995. 158 с.

Prospects of Application of Electron Beam Irradiation to Ensure Microbiological Safety of Food Products

P. A. Bystrov¹, A. V. Gordeev², A. Yu. Kolokolova³, M. A. Zavyalov³, N. V. Ilyukhina³, A. A. Molin², Yu. S. Pavlov¹, S. P. Polyakova⁴, A. V. Prokopenko^{5,*}, and V. P. Filippovich^{3,}**

¹*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

²*Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Federal Medical Biological Agency, Moscow, 123182 Russia*

³*All-Russia Research Institute of Preservation Technology, Vidnoe, Moscow oblast, 142703 Russia*

⁴*All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry, Moscow, 111024 Russia*

⁵*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

*e-mail: avprokopenko@mephi.ru

**e-mail: vit_fil1@rambler.ru

Received June 7, 2018; revised June 7, 2018; accepted July 7, 2018

Abstract—The efficiency of the application of electron beam irradiation in the food industry to reduce microbiological contamination of agricultural products and foodstuffs in the process of use and long-term storage has been studied. The experimental results on irradiation of model environments with typical food industry cultures of microorganisms are presented.

Keywords: radiation treatment, electron beam, accelerator, dose, norms, food products, microbiology, safety