О возможности внедрения в агропромышленный комплекс низкоэнергетических (до 300 кэВ) электронных ускорителей (обзор)

Харламов В.А., Тхорик О.В., Помясова М.Г.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, Обнинск

Важное место в системе мер по обеспечению фитосанитарной безопасности сельхозпродукции традиционно отводится химическим средствам. Негативные экологические последствия применения химических препаратов заставляют искать новые подходы решения этой проблемы. Радиационные технологии для обеспечения продовольственной безопасности сельхозпродукции, имея более чем 75-летнюю историю исследований, в последнее время приобретают всё большее значение в таких областях, как радиационная обработка сельхозпродукции, обеспечивая её сохранность за счёт повышения устойчивости к порче при хранении. Наряду с естественными радиоактивными изотопами сегодня всё большее значение в сельском хозяйстве приобретает радиационная обработка электронами с энергией частиц до 300 кэВ с применением электронных ускорителей. Ключевой особенностью данного вида излучения является возможность оказания дезинфицирующего эффекта на облучаемый объект, который достигается при низкой проникающей способности. Тем самым исключаются характерные радиационно-химические процессы и нарушения биологических структур во внутреннем объёме облучаемого объекта. Такими объектами выступают семена сельскохозяйственных растений, подверженные инфекционным заболеваниям (фитопатогенам). Цель работы – оценить возможность внедрения в АПК низкоэнергетических (до 300 кэВ) электронных ускорителей. В работе описаны устройство и принцип работы современных низкоэнергетических электронных ускорителей, а также их применение в аграрном секторе. Рассмотрены эффекты низкоэнергетического электронного облучения на фитопатогены семян, на насекомых-вредителей, при радиационной обработке сельхозпродукции для предотвращения микробиологической порчи. Сделаны выводы об эффективности методов радиационной дезинфекции и дезинсекции низкоэнергетическим электронным излучением; об отсутствии нарушений ростовых показателей семян; отсутствии существенных изменений пищевых качеств продуктов питания.

Ключевые слова: радиационная обработка продуктов питания, радиочувствительность, микробиологическая безопасность, низкоэнергетический электронный ускоритель, сельскохозяйственные культуры, фитосанитарная безопасность, посевные качества семян, качество продуктов питания, срок годности.

Введение

Основными причинами потерь сельхозпродукции растительного происхождения при хранении являются: патогенная микрофлора и насекомые-вредители. На семенах обнаруживается около 50 видов микроорганизмов, но одновременное число видов – не столь значительно. Основу микрофлоры зерновых составляет неспороносная палочка рода *Pseudomonas*, а также микробактерии, бактерии молочнокислого брожения, небольшое количество грибов. В процессе хранения типичная микрофлора, свойственная доброкачественному зерну, существенно изменяется. Доминирующими компонентами грибной микрофлоры становятся *Penicillium* и *Aspergillus* («плесени хранения») и другие патогены, вызывающие порчу семян [1, 2].

Традиционно, в системе защитных мероприятий против фитопатогенов зерна важное место отведено обработке семян и вегетирующих растений химическими средствами. Этот метод защиты растений приводит, главным образом, к загрязнению сельхозпродукции и среды [3-5]. Одним из способов совершенствования приёмов борьбы с патогенами растений являются радиационные технологии.

Харламов В.А.* – ст. науч. сотр., к.б.н.; Тхорик О.В. – науч. сотр.; Помясова М.Г. – науч. сотр. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

*Контакты: 249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км. Тел.: (484) 399-69-53; e-mail: kharlamov@gmail.com.

Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности применяются более 75 лет [6-8], преимущественно для уничтожения насекомых, подавления болезнетворных микроорганизмов, увеличения срока хранения продуктов, предупреждения прорастания семян и корнеплодов [9]. Согласно рекомендациям МАГАТЭ, для радиационной обработки пищевых продуктов безопасным считается использование: гамма-установок с такими радионуклидами как ^{60}Co либо ^{137}Cs ; электронного излучения с энергией не более 10 МэВ; тормозного излучения с энергией не более 5 МэВ [10-12]. Каждый из этих видов излучения имеет как преимущества, так и недостатки [13].

Параметры излучения гамма-установок ограничиваются характеристиками используемых в них радионуклидов. Электронные ускорители позволяют изменять интенсивность и энергию излучения. Поэтому время электронного облучения занимает несколько секунд, по сравнению с минутами и даже часами, в случае использования источников гамма-излучения. Помимо этого, электронные ускорители в нерабочем (выключенном) состоянии безопасны из-за отсутствия в них радиоактивного источника, а значит, не требуют дополнительной физической защиты для обслуживающего персонала [14, 15].

Ускорители электронов условно делят на три группы: низко-, средне- и высокоэнергетические [15]. Ключевой особенностью электронных ускорителей является относительно малая глубина проникновения в облучаемый объект. Доза облучения, формируемая в поверхностном слое объекта, зависит от энергии электронов, расстояния до объекта облучения и продолжительности облучения. В случае облучения семян растений низкоэнергетическими электронами (с энергией от 70 до 300 кэВ), излучение не достигает зародыша, а значит, не нарушает их ростовые качества.

Цель работы – оценить возможность внедрения в АПК низкоэнергетических (до 300 кэВ) электронных ускорителей.

Устройство и принцип работы низкоэнергетического электронного ускорителя

Исходным элементом любого ускорителя служит инжектор, в котором имеется источник (эмиттер) направленного потока частиц (электронов) с низкой энергией, а также высоковольтные электроды и магниты, выводящие пучок из источника и формирующие его. Основная схема процесса ускорения электронов предусматривает три стадии:

- 1) формирование пучка и его инжекция;
- 2) ускорение пучка;
- 3) вывод пучка на мишень [14].

Устройству современных ускорителей электронов посвящено множество работ. Ускорители используют для сшивания полимеров, очистки жидкостей и газов, поверхностной стерилизации, разогрева плазмы при термоядерном синтезе, радиационной обработки (обеззараживания) пищевых продуктов, предотвращения прорастания сельхозпродуктов [15, 16].

В зависимости от их конструкции, ускорители можно классифицировать на линейные (они же плоские катодные) и сканирующие. Принцип работы линейного ускорителя основан на применении типичного линейного катодного генератора. Принцип работы электронного генератора заключается в том, что при нагреве плоского линейного вольфрамового катода (длиной от 0,15 до 2 м), за счёт термоэлектронной эмиссии из этого катода вылетают электроны. Энергия вылетающих электронов зависит от ускоряющего напряжения, поданного на катод. Обычно это

напряжение варьирует от 120 до 300 кВ. Для 70% глубинной дозы полезный диапазон обрабатываемой массы варьирует от 1 до 380 г/м² (300 кВ). Верхние пределы вышеуказанного диапазона составляют 120, 180 и 270 г/м² для напряжений 175, 200 и 250 кВ соответственно. В современных генераторах с широкой зоной пучка устанавливается от двух до четырёх параллельно расположенных катодов. Эти катоды работают при высоком напряжении, в то время, как анод, который образует внешнюю оболочку ускорительной камеры, заземлён (рис. 1).

Рис. 1. Схема головки линейного ускорителя с плоским широким катодом, предназначенного для поверхностной радиационной обработки [17].

Образовавшиеся в ускоряющей камере электроны направляют на вольфрамовую мишень, толщиной около 12 мм. Мишень представляет собой фольгу, предназначенную для выравнивания пучка и формирования прямоугольного электронного поля. При этом в установке имеется охлаждающая система на основе циркулирующего в ней азота. Охлаждающая система предназначена для обеспечения теплоотвода от постоянно нагревающейся мишени.

Головка ускорителя размещена в защитном кожухе, который полностью защищает от любого излучения. Среднегодовая доза для персонала составляет около 16,3 мбэр, то есть около 10% дозы от естественного радиационного фона Земли. Головка ускорителя располагается непосредственно над конвейером, предназначенным для более быстрой и равномерной обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции (рис. 2). Пропускная способность ускорителя для дозы 10 кГр зависит от типа машины и составляет от 450 до 1600 см/мин.

В ряде работ [18-21] применяется специальное вращательное устройство зерна, которое позволяет облучаемым образцам вращаться, одновременно встряхиваясь и вибрируя. Такая методика разработана специально для радиационной обработки семян и круп. Она позволяет достигнуть более высокой равномерности облучения при обработке продукта низкоэнергетическими электронами.

В работе [22] это экспериментально подтверждено. В ней применялись индикаторные шарики, изготовленные из парафина и радиационно-чувствительного красителя (метил-жёлтый), чтобы визуализировать поглощение энергии электронов при помощи изменения цвета (от жёлтого до красного). Когда шарики обрабатывали электронами при различном ускоряющем напряжении на лотке вращающего устройства, цвет поверхности шариков равномерно изменялся при

любых напряжениях, что указывает на то, что поверхность шариков была равномерно подвержена воздействию электронного излучения. Когда шарики были разрезаны, внутренняя часть оставалась жёлтой, указывая на то, что электроны низкой энергии могут достигать только ограниченной (внешней) части шариков. Проникающая способность зависела от энергии электронов. Электроны с ускоряющим напряжением 200 кВ проникали всего на несколько сотен микрометров поверхности, тогда как электроны с энергией 1500 кВ могли проникнуть до центра шарика. Аналогичным образом, распределение и проникающая способность электронов была продемонстрирована на примере рисовых зёрен, окрашенных метиловым жёлтым.

Рис. 2. Схема облучающей установки: линейного ускорителя с плоским широким катодом, предназначенного для поверхностной радиационной обработки [17].

В ускорителях сканирующего типа используется линейная вольфрамовая нить в качестве эмиттера электронов. Устройство сканирующего ускорителя описано в работе [23]. Суть данного метода заключается в том, что образовавшийся тонкий пучок при помощи системы поворотных магнитов сканирует облучаемый продукт, тем самым, за счёт времени нахождения пучка в той или иной точке пространства в продукте накапливается желаемая доза. С применением данной методики облучения проводились следующие работы: [20-27].

Радиационная поверхностная дезинфекция семян сельскохозяйственных растений. E-ventus-технология

E-ventus-технология – это экологически чистый метод дезинфекции семян без применения химических веществ, при котором семена обрабатываются электронами низкой энергии (менее 300 кВ). Эта технология разработана в институте им. Фраунгофера по органической электронике, электронно-лучевым и плазменным технологиям в Германии. Целью e-ventus-технологии является устранение семенных патогенов на ранних стадиях [28, 29].

Принцип работы e-ventus-установки компании EVONTA – Service GmbH [30] заключается в следующем. В установке имеется два генератора электронов, которые расположены друг напротив друга. Проходя через область облучения, семена подвергаются воздействию ионизи-

рующего излучения в процессе свободного падения зерна (рис. 3). При этом, электроны обладают достаточно низкой энергией для того, чтобы пройти вглубь и достигнуть зародыша семян [9, 30]. За счёт этого материалы проходят исключительно поверхностную обработку. Проникающая способность электронного излучения зависит от энергии частиц и плотности обрабатываемого продукта. Так, для пшеницы и ячменя при обработке энергией 145 кэВ глубина проникновения составляет 0,066 мм и 0,12 мм соответственно, а для кукурузы при энергии электронов 125 кэВ – 0,06 мм [28, 29].

Рис. 3. Принцип воздействия e-ventus-технологии на семена [30].

Метод e-ventus компании EVONTA – Service GmbH технологии показал действенный результат в борьбе против каменной головни (*Tilletia caries*) у озимой пшеницы. Семенной материал, заражённый *Fusarium spp.* и *Septoria*, после обработки прорастает быстрее. В период с 2000 по 2001 гг. определяли всхожесть некоторых культур: озимая пшеница, ячмень, рожь и тритикале (гибрид пшеницы и ржи). Они были обработаны химическими веществами и с помощью e-ventus-метода. Было установлено, что урожайность зерна, обработанного по e-ventus-технологии, такая же, что и при химической обработке [30].

В 2000 г. была введена в работу мобильная установка для e-ventus. В стационарной установке используют электроны с энергией 105-145 кэВ, с производительностью 30 т/ч. При среднем доходе 50 евро за тонну обработанных семян, покрытие издержек достигается при производстве около 5000-7500 т/год, при больших объёмах образуется прибыль. Установки e-ventus протравливания семян находятся в центрах торговли семенным сырьем в Хаинихене и Магдебурге (Германия) [9].

Преимуществами e-ventus-метода, как описано на сайте EVONTA – Service GmbH [30], являются:

- экологически чистый метод;
- более быстрое прорастание семян и лучшая жизнеспособность растений;
- отсутствие резистентности патогенов;
- можно использовать не только для семян злаковых культур, но и для всех видов семенного сырья;
- сельскохозяйственные животные не употребляют вместе с семенным сырьем химические фунгициды.

Радиационная дезинсекция

Ускоритель электронов промышленного применения производства Nissin High-Voltage Co. Ltd. (Япония) применяется для борьбы с насекомыми-вредителями. Облучение в дозе 3 кГр электронами с энергией 80 кэВ (ускоряющее напряжение 150 кВ, ток 4,4 и 6,4 мА, на расстоянии 5 см) эффективно обеззараживает зерна бурого риса, предварительно заражённые кукурузным долгоносиком (*Stiophilus zeamais* Motchulsky) и молью индийской мучной (*Plodia interpunctella*), а также фасоль адзуки, заражённую долгоносиком [25].

Показано, что электронное облучение по-разному действует на насекомых-вредителей на разных фазах развития [20]. Взрослые особи хрущака малого булавоусого (*T. castaneum*) и моли индийской мучной (*P. interpunctella*), повреждающие рис, оказались более устойчивы, чем их личинки и куколки, и были инактивированы облучением в дозе 4,8 кГр и 7,2 кГр соответственно (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd, Япония; ускоряющее напряжение 150 кВ, ток 4 мкА, расстояние 15 см, мощность дозы 0,48 кГр/мин, время 1-15 мин, энергия электронов 60 кэВ). Личинки китайской зерновки (*Callosobruchus chinensis* L.) внутри фасоли адзуки, частично выживают после электронного облучения [20].

Доза, необходимая для дезинсекции (7,2 кГр; 170 кВ, 4 мкА, 15 мин), составляет 1/3 дозы для радиационной поверхностной дезинфекции риса (21,6 кГр; 170 кВ, 4 мкА, 45 мин) [31].

Радиационная чувствительность китайской зерновки (*Callosobruchus chinensis* L.) – основного вредителя фасоли адзуки (*Vigna angularis*) – снижалась с увеличением возраста. Яйца китайской зерновки были очень восприимчивы к электронному излучению, тогда как 18-дневная стадия (взрослое насекомое) была наиболее резистентной. Гибель 80% взрослых насекомых происходит при дозе 10 кГр (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd, Япония; ускоряющее напряжение 170 кВ, ток 2 мкА, время 20 мин). Электронное облучение в этой дозе не влияет на всхожесть адзуки [27].

Исследование зёрен бурого риса магнитно-резонансным методом показало, что большинство личинок кукурузного долгоносика (*Stiophilus zeamais* Motchulsky) сосредоточены на периферии зерна, и лишь немногие в центре [26]. Поэтому большая часть, как личинок насекомых-вредителей, так и взрослых особей, гибнет после электронного облучения в дозе 30 кГр (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd., Япония, ускоряющее напряжение 170 кВ, ток 4 мкА, расстояние 15 см, время 30 мин, мощность дозы 1 кГр/мин). В работе [26] показана возможность эффективного сочетания электронного облучения и щадящей фумигации фосфином для борьбы с насекомыми-вредителями.

Радиационная поверхностная дезинфекция сельхозпродукции. Качество облучённых продуктов питания

Микроорганизмы находятся на поверхности семян, а, значит, электроны с низкой энергией (до 300 кэВ) могут дезактивировать микроорганизмы без ухудшения посевных качеств семян [32].

Бурый рис, пшеницу и гречиху подвергали воздействию электронного облучения (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd., Япония) при различных режимах: 180 кВ, 8 мкА, 30 мин; 200 кВ, 14 мкА, 15 мин; 225 кВ, 22 мкА, 4 мин; 250 кВ, 40 мкА, 2 мин; 300 кВ, 40 мкА, 2 мин; 500 кВ, 40 мкА, 2 мин; на расстоянии 17 см до объекта облучения. Результаты показывают, что при ускоряющем напряжении 180-225 кВ снижается микробная обсеменённость зерна до 100 КОЕ/г. Ухудшение качества (разрушение крахмала) зерна было незначительным [33].

По данным [19], энергия электронов, необходимая для уменьшения микробной обсеменённости до уровня ниже 10 КОЕ/г, составляет 60 кэВ – для бурого риса, 75 кэВ – для пшеницы, 100 кэВ – для белого перца, кориандра и базилика, 130 кэВ – для гречихи, 160 кэВ – для необработанного риса и 210 кэВ – для чёрного перца. Облучение с такими параметрами существенно не влияло на качество продуктов (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd., Япония; ускоряющее напряжение 180-250 кВ, ток 8-90 мкА, расстояние 17 см, время 1-30 мин).

Дозы электронного облучения (ускоритель электронов EBC-150-50-45; ускоряющее напряжение 130 и 150 кВ) пшеницы и коричневого риса для снижения микробной обсеменённости до уровня 100 КОЕ/г составили 14 и 12,5 кГр соответственно и не вызывали деградацию крахмала [24].

Окисление липидов в буром рисе не выявлено при воздействии низкоэнергетическим электронным излучением (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd., Япония; ускоряющее напряжение: 170-200 кВ, ток 4-14 мкА, расстояние 17 см, время 60 мин). Общее микробное число при таком облучении составило 10 КОЕ/г [31].

Электронное облучение до 200 кэВ (доза 10 кГр) не снижало процент прорастания семян фасоли адзуки, горчицы, при этом у фасоли мунго этот показатель был снижен [32]. Энергия электронов на поверхности семян (расстояние 15 см от источника облучения) при ускоряющем напряжении 170-200 кВ составляет от 60 до 100 кэВ (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd, Япония). Обсеменённость исследованных семян снижалась менее 10 КОЕ/г.

Для стерилизации (гибели всех микроорганизмов) соевых бобов потребовалась доза 20 кГр гамма-излучения и 26 кГр электронного облучения (ускоритель электронов Van der Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd., Япония) с энергией 60 кэВ. Электронное облучение в этих дозах не влияло на прорастание облучённых семян, тогда как гамма-облучение нарушало ростовые процессы [21]. В отличие от гамма-облучения, электронное вызывает незначительное окисление липидов у поверхности бобов.

Дезинфекция низкоэнергетическими (60 кэВ) электронами (ускоритель электронов Van de Graaff, Nissin High Voltage Engineering Co. Ltd, Япония; ускоряющее напряжение 170 кВ, расстояние 15 см, время 3,3-10 мин) улучшает качество соевых бобов для переработки их в соевое молоко и тофу (соевый творог). После термической обработки (92 °C) улучшается сохранность (до 5 дней при 35 °C) соевого молока, полученного из облучённых (170 кВ, 10 мин) соевых бобов [34].

Безусловно, важна проблема контаминации продуктов питания растительного происхождения бактериями, патогенными для человека. Наиболее часто такие инфекции вызывают энтерогеморрагическая *E. coli* O157:H7, *Salmonella enterica* различных серотипов, *Salmonella enteridis*, *Shigella sonnei* и другие. Инфекции, вызываемые этими возбудителями, могут быть связаны с употреблением томатов, арбузов, непастеризованных апельсинового и яблочного соков, проростков люцерны, клевера и бобов, орехов [35].

Показано [36], что электронное облучение в дозе 12 кГр с эффективностью 80% дезинфицирует семена пажитника, клевера и бобов мунг, искусственно обсеменённые *E. coli* штамм K12 (ускоритель электронов REAMODE, Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology, Германия; ускоряющее напряжение 140 кВ, ток 5 мкА, расстояние 100 мм; скорость конвейера от 87 мм/с (для дозы 12 кГр) до 250 мм/с (для дозы 4 кГр)). Это не влияло на всхожесть, рост, на конечную массу проростков трёх видов семян. Облучение семян бобов не изменяло морфологию ростка, то есть скручивание, или цвет проростков.

Заключение

Облучение низкоэнергетическим (до 300 кэВ) электронным излучением является одним из наиболее эффективных методов обеззараживания (дезинфекция и дезинсекция) сухих пищевых ингредиентов (за исключением порошкообразных продуктов), таких как зерновые, обезвоженные овощи, специи, бобовые с незначительным ухудшением их качества. Части облучённых электронами зёрен удаляются в виде шелухи и отрубей при шелушении и измельчении, следовательно, не попадают в пищу человека. Органолептические свойства и химический состав облучённых пищевых продуктов при этом практически не изменяются.

Облучение семян сельскохозяйственных растений (на примере зерновых, бобовых) электронным излучением с энергией ниже 300 кэВ в дезинфицирующих дозах не оказывает значительного влияния на всхожесть, рост, массу, морфологию проростков.

Таким образом, низкоэнергетическое (до 300 кэВ) электронное облучение может быть успешно использовано для борьбы с насекомыми и патогенной микрофлорой растений, решая проблемы сохранности сельхозпродукции, пищевой безопасности для человека и животных, решения экологических проблем, связанных с применением химических средств защиты растений.

Выводы

1. Облучение низкоэнергетическими (до 300 кэВ) электронами в дезинфицирующей дозе снижает общее количество микроорганизмов на поверхности семян сельскохозяйственных растений: микрофлору и патогенных для человека бактерий, обсеменяющих эти продукты.
2. Всхожесть семян и начальные ростовые показатели после низкоэнергетического (до 300 кэВ) электронного облучения в дезинфицирующей дозе не нарушаются.
3. Доза низкоэнергетического электронного (до 300 кэВ) облучения, необходимая для борьбы с насекомыми-вредителями семян растений, значительно (на две трети) ниже дезинфицирующей.
4. Низкоэнергетическое (до 300 кэВ) электронное облучение в дезинфицирующей дозе мало влияет на основные питательные вещества, такие как белки, углеводы, жиры (на примере риса, соевых бобов и пр.).

Литература

1. **Мюллер Г., Литц П., Мюнх Г.Д.** Микробиология пищевых продуктов растительного происхождения: пер. с нем. А.М. Калашниковой /под ред. И.М. Грачевой. М.: Пищевая промышленность, 1977. 344 с.
2. **Смирнова Т.А., Кострова Е.И.** Микробиология зерна и продуктов его переработки: учеб. пособие для вузов. М.: Агропромиздат, 1989. 159 с.
3. **Pinstrup-Anderson P., Pandey-Lorch R., Rosegrant M.W.** The world food situation: recent developments, emerging issues and long-term prospects. Vision 2020: Food Policy Report. Washington, DC: International Food Policy Research Institute, 1997. 36 p.
4. **Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A., Howarth R., Schindler D., Schlesinger W.H., Simberloff D., Swackhamer D.** Forecasting agriculturally driven global environmental change //Science. 2001. V. 292, N 5515. P. 281-284.
5. **Макарова М.А., Шевцова А.А.** Перспективы применения новых средств защиты от болезней в семенных посевах кукурузы //Дальневосточный аграрный вестник. 2017. Т. 43, № 3. С. 55-60.
6. **Morrison R.M.** An economic analysis of electron accelerators and cobalt-60 for irradiating food. Commodity Economics Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1762. Washington, DC, 1989. 38 p.
7. **Пикаев А.К.** Современное состояние радиационной технологии //Успехи химии. 1995. Т. 64, № 6. С. 609-640.
8. **Черняев А.П., Варзарь С.М.** Ускорители в современном мире //Ядерная физика. 2014. Т. 77, № 10. С. 1266-1278.
9. **Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И.** Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
10. **Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Панфилов А.Д., Радченко В.М., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.** Промышленные ускорители электронов ИЛУ для стерилизации медицинских изделий и обработки пищевых продуктов //Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7. С. 1581-1585.
11. **Брызгин А.А., Безуглов В.В., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Нехаев В.Е., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Факторович Б.Л.** Промышленные ускорители ИЛУ для облучения пищевых продуктов //Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сб. докл. межд. науч.-практ. конф., Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 127-131.
12. **Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Бондаренко В.С.** Радиационные технологии в сельском хозяйстве: стратегия научно-технического развития //Инноватика и экспертиза. 2016. Т. 16, № 1. С. 197-206.
13. **Пименов Е.П., Павлов А.Н., Васильева Н.А., Морозова А.И.** Действие разных режимов импульсного линейного ускорителя электронов на микроорганизмы, обсеменяющие специи //Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сб. докл. межд. науч.-практ. конф., Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018 г. С. 100-103.
14. **Забаев В.Н.** Применение ускорителей в науке и промышленности. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 195 с.
15. **Черняев А.П.** Ускорители в современном мире. М.: Изд-во МГУ, 2012. 368 с.
16. **Алимов А.С.** Практическое применение электронных ускорителей //Препринт НИИЯФ МГУ. 2011. Т. 13, № 877. С. 1-40.
17. **Scharf W., Wieszczycka W.** Particle accelerators for industrial processing (Part 1) //Eksplotacja i Niezawodnosc. 2001. N 2-3. P. 10-25.
18. **Hayashi T.** Decontamination of dry food ingredients and seeds with "soft-electrons" (low-energy electrons) //Food Sci. Technol. Int. Tokyo. 1998. V. 4, N 2. P. 114-120.
19. **Hayashi T., Takahashi Y., Todoriki S.** Sterilization of foods with low-energy electrons ("soft-electrons") //Radiat. Phys. Chem. 1998. V. 52, N 1-6. P. 73-76.

20. **Imamura T., Todoriki S., Sota N., Nakakita H., Ikenaga H., Hayashi T.** Effect of “soft-electron” (low-energy electron) treatment on three stored-product insect pests //J. Stored Prod. Res. 2004. V. 40, N 2. P. 169-177.
21. **Kikuchi O.K., Todoriki S., Saito M., Hayashi T.** Efficacy of soft-electron (low-energy electron beam) for soybean decontamination in comparison with gamma-rays //J. Food Sci. 2003. V. 68, N 2. P. 649-652.
22. **Hayashi T., Todoriki S.** Low energy electron irradiation of food for microbial control //Irradiation for Food Safety and Quality: Proceedings of FAO/IAEA/WHO International Conference on Ensuring the Safety and Quality of Food through Radiation Processing. Vienna, 2001. P. 118-128.
23. **Mehnert R., Klenert P., Prager L.** Low-energy electron accelerator for industrial radiation processing //Radiat. Phys. Chem. 1993. V. 42, N 1-3. P. 525-529.
24. **Baba T., Kaneko H., Taniguchi S.** Soft electron processor for surface sterilization of food material //Radiat. Phys. Chem. 2004. V. 71, N 1-2. P. 209-211.
25. **Imamura T., Miyanooshita A., Todoriki S., Hayashi T.** Usability of a soft-electron (low-energy electron) machine for disinfestation of grains contaminated with insect pests //Radiat. Phys. Chem. 2004. V. 71, N 1-2. P. 211-213.
26. **Imamura T., Todoriki S., Miyanooshita A., Horigane A.K., Yoshida M., Hayashi T.** Efficacy of soft-electron (low-energy electron) treatment for disinfestation of brown rice containing different ages of the maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motschulsky //Radiat. Phys. Chem. 2009. V. 78, N 7-8. P. 627-630.
27. **Rami Reddy P.V., Todoriki S., Miyanooshita A., Imamura T., Hayashi T.** Effect of soft electron treatment on adzuki bean weevil, *Callosobruchus chinensis* (L.) (Col., Bruchidae) //J. Appl. Entomol. 2006. V. 130, N 6-7. P. 393-399.
28. **Cutrubinis M., Delincee H., Stahl M., Roder O., Schaller H.J.** Erste ergebnisse zum nachweis einer elektronenbehandlung von mais zur beizung bzw. entkeimung und entwesung //Gesunde Pflanzen. 2005. V. 57, N 5. P. 129-136.
29. **Cutrubinis M., Delincee H., Stahl M., Roder O., Schaller H.J.** Detection methods for cereal grains treated with low and high energy electrons //Radiat. Phys. Chem. 2005. V. 72, N 5. P. 639-644.
30. EVONTA – Service GmbH. [Электронный ресурс]. URL: www.evonta.de (дата обращения 07.11.2019).
31. **Hayashi T., Okadome H., Toyoshima H., Todoriki S., Ohtsubo K.** Rheological properties and lipid oxidation of rice decontaminated with low-energy electrons //J. Food Prot. 1998. V. 61, N 1. P. 73-77.
32. **Todoriki S., Hayashi T.** Disinfection of seeds and sprout inhibition of potatoes with low energy electrons //Radiat. Phys. Chem. 2000. V. 57, N 3-6. P. 253-255.
33. **Hayashi T., Takahashi Y., Todoriki S.** Low-energy electron effects on the sterility and viscosity of grains //J. Food Sci. 1997. V. 62, N 4. P. 858-860.
34. **Todoriki S., Kikuchi O.K., Nakaoka M., Miike M., Hayashi T.** Soft electron (low energy electron) processing of foods for microbial control //Radiat. Phys. Chem. 2002. V. 63, N 3-6. P. 349-351.
35. **Маркова Ю.А., Алексеенко А.Л., Крамарский А.В., Савилов Е.Д.** Растения как одно из звеньев цепи циркуляции патогенных для человека бактерий в окружающей среде //Сибирский медицинский журнал (Иркутск). 2012. Т. 114, № 7. С. 11-14.
36. **Fan X., Sokorai K., Weidauer A., Gotzmann G., Rogner F.H., Koch E.** Comparison of gamma and electron beam irradiation in reducing populations of *E. coli* artificially inoculated on mung bean, clover and fenugreek seeds, and affecting germination and growth of seeds //Radiat. Phys. Chem. 2017. V. 130. P. 306-315.

The possibility of using low-energy (below 300 keV) electron accelerators in the agro-industrial complex (a review)

Kharlamov V.A., Tkhorik O.V., Pomyasova M.G.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk

An important place in the system of measures to ensure the phytosanitary safety of agricultural produce is traditionally given to chemicals. However, due to negative effects of the chemicals on the environment, new more effective and safe technologies were needed. Feasibility of the use of radiation technologies to improve food safety and agricultural quality has been studied for more than 75 years. Recently radiation-based technologies have become increasingly important in agricultural produce processing to preserve food spoilage during storage. Currently the use of electron beams with energy below 300 keV generated by electron accelerators is increasingly grown in agriculture. The key feature of electron beams is their ability to produce disinfectant effect on irradiated object due to low electrons permeability. It prevents the characteristic radiation-chemical reactions and damage to the structure in the internal volume of the biological specie. Such objects are seeds of agricultural plants susceptible to infectious diseases caused by phytopathogens. The study aims at the evaluation of the possibility to use low-energy (below 300 keV) electron accelerators in the agro-industrial complex. The paper describes the device and the principle of operation of the state-of-the-art low-energy electron accelerators, as well as their application in the agricultural sector. The paper considers the effects of low-energy electron irradiation of agricultural products on seed phytopathogens and pests. From the analysis of feasibility of use of the low-energy electron accelerators for radiation-induced disinfection and disinsection it becomes evident that irradiation of the crop with low-energy electrons is effective approach to minimize adverse effects of phytopathogens and to prevent destruction of irradiated biological objects. Electron-beam irradiation minimally effects on the nutritional quality of food products.

Key words: food irradiation, radiosensitivity, microbiological safety, low-energy electron accelerator, agricultural crops, phytosanitary safety, sowing quality of seeds, food quality, shelf life.

References

1. **Muller G., Lietz P., Munch H.D.** Microbiology of plant foods. Ed.: I.M. Gracheva. Moscow, Food industry, 1977. 344 p. (In Russian).
2. **Smirnova T.A., Kostrova E.I.** Mikrobiologiya zerna i produktov ego pererabotki: ucheb. posobiye dlya vuzov [Microbiology of grain and products of its processing: textbook for universities]. Moscow, Agropromizdat, 1989. 159 p.
3. **Pinstrup-Anderson P., Pandey-Lorch R., Rosegrant M.W.** The world food situation: recent developments, emerging issues and long-term prospects. Vision 2020: Food Policy Report. Washington, DC, International Food Policy Research Institute, 1997. 36 p.
4. **Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A., Howarth R., Schindler D., Schlesinger W.H., Simberloff D., Swackhamer D.** Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 2001, vol. 292, no. 5515, pp. 281-284.
5. **Makarova M.A., Shevtsova A.A.** Prospects of application of new means of protection against diseases in maize seed crops. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik – Far Eastern Agrarian Herald*, 2017, vol. 43, no. 3, pp. 55-60. (In Russian).
6. **Morrison R.M.** An economic analysis of electron accelerators and cobalt-60 for irradiating food. Commodity Economics Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1762. Washington, DC, 1989. 38 p.

Kharlamov V.A.* – Sen. Researcher, C. Sc., Biol.; Thorik O.V. – Researcher; Pomyasova M.G. – Researcher. RIRAE.

*Contacts: 109 km, Kievskoe Sh., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249032. Tel.: (484) 399-69-53; e-mail: kharlamov@gmail.com.

7. **Pikaev A.K.** Current state of radiation processing. *Uspekhi khimii – Russian Chemical Reviews*, 1995, vol. 64, no. 6, pp. 609-640. (In Russian).
8. **Chernyaev A.P., Varzar S.M.** Particle accelerators in modern world. *Yadernaya fizika – Physics of Atomic Nuclei*, 2014, vol. 77, no. 10, pp. 1266-1278. (In Russian).
9. **Koz'min G.V., Geras'kin S.A., Sanzharova N.I.** Radiatsionnyye tekhnologii v sel'skom khozyaystve i pishchevoy promyshlennosti [Radiation technologies in agriculture and food industry]. Obninsk, RIRAE, 2015. 400 p.
10. **Bezuglov V.V., Bryazgin A.A., Vlasov A.Yu., Voronin L.A., Panfilov A.D., Radchenko V.M., Tkachenko V.O., Shtarklev E.A.** Promyshlennyye uskoriteli elektronov ILU dlya sterilizatsii meditsinskih izdeliy i obrabotki pishchevykh produktov [ILU industrial electron accelerators for sterilization of medical devices and food]. *Pis'ma v ECHAYA – Particles and Nuclei, Letters*, 2016, vol. 13, no. 7, pp. 1581-1585.
11. **Bryazgin A.A., Bezuglov V.V., Voronin L.A., Korobeynikov M.V., Maximov S.A., Nekhaev V.E., Radchenko V.M., Sidorov A.V., Tkachenko V.O., Faktorovich B.L.** Industrial electron accelerators type ILU for food products treatment. *Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects: Proceedings of the International Research and Practice Conference*, Obninsk, September 26-28, 2018. Obninsk, RIRAE, 2018, pp. 127-131. (In Russian).
12. **Sanzharova N.I., Koz'min G.V., Bondarenko V.S.** Nuclear technologies in agriculture: Science and technology development strategy. *Innovatika i ekspertiza – Innovatics and Expert Examination*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 197-206. (In Russian).
13. **Pimemov E.P., Pavlov A.N., Vasil'eva N.A., Morozova A.I.** The effects of different regimes of a pulsed linear electron accelerator on the microorganisms that contaminate spices. *Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Current State and Prospects: Proceedings of the International Research and Practice Conference*, Obninsk, September 26-28, 2018. Obninsk, RIRAE, 2018, pp. 100-103. (In Russian).
14. **Zabayev V.N.** Primeneniye uskoriteley v nauke i promyshlennosti [Application of accelerators in science and industry]. Tomsk, Publishing office TPU, 2008. 195 p.
15. **Chernyaev A.P.** Uskoriteli v sovremennom mire [Accelerators in the world today]. Moscow, Moscow University Press, 2012. 368 p.
16. **Alimov A.S.** Prakticheskoye primeneniye elektronnykh uskoriteley [The practical application of electronic accelerators]. *Preprint NIIYAF MGU – Preprint SINP MSU*, 2011, vol. 13, no. 877, pp. 1-40.
17. **Scharf W., Wieszczycka W.** Particle accelerators for industrial processing (Part 1). *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, 2001, no. 2-3, pp. 10-25. (In Polish).
18. **Hayashi T.** Decontamination of dry food ingredients and seeds with "soft-electrons" (low-energy electrons). *Food Sci. Technol. Int. Tokyo*, 1998, vol. 4, no. 2, pp. 114-120.
19. **Hayashi T., Takahashi Y., Todoriki S.** Sterilization of foods with low-energy electrons ("soft-electrons"). *Radiat. Phys. Chem.*, 1998, vol. 52, no. 1-6, pp. 73-76.
20. **Imamura T., Todoriki S., Sota N., Nakakita H., Ikenaga H., Hayashi T.** Effect of "soft-electron" (low-energy electron) treatment on three stored-product insect pests. *J. Stored Prod. Res.*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 169-177.
21. **Kikuchi O.K., Todoriki S., Saito M., Hayashi T.** Efficacy of soft-electron (low-energy electron beam) for soybean decontamination in comparison with gamma-rays. *J. Food Sci.*, 2003, vol. 68, no. 2, pp. 649-652.
22. **Hayashi T., Todoriki S.** Low energy electron irradiation of food for microbial control. *Irradiation for Food Safety and Quality: Proceedings of FAO/IAEA/WHO International Conference on Ensuring the Safety and Quality of Food through Radiation Processing*. Vienna, 2001, pp. 118-128.

23. **Mehnert R., Klenert P., Prager L.** Low-energy electron accelerator for industrial radiation processing. *Radiat. Phys. Chem.*, 1993, vol. 42, no. 1-3, pp. 525-529.
24. **Baba T., Kaneko H., Taniguchi S.** Soft electron processor for surface sterilization of food material. *Radiat. Phys. Chem.*, 2004, vol. 71, no. 1-2, pp. 209-211.
25. **Imamura T., Miyanoshita A., Todoriki S., Hayashi T.** Usability of a soft-electron (low-energy electron) machine for disinfection of grains contaminated with insect pests. *Radiat. Phys. Chem.*, 2004, vol. 71, no. 1-2, pp. 211-213.
26. **Imamura T., Todoriki S., Miyanoshita A., Horigane A.K., Yoshida M., Hayashi T.** Efficacy of soft-electron (low-energy electron) treatment for disinfection of brown rice containing different ages of the maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motschulsky. *Radiat. Phys. Chem.*, 2009, vol. 78, no. 7-8, pp. 627-630.
27. **Rami Reddy P.V., Todoriki S., Miyanoshita A., Imamura T., Hayashi T.** Effect of soft electron treatment on adzuki bean weevil, *Callosobruchus chinensis* (L.) (Col., Bruchidae). *J. Appl. Entomol.*, 2006, vol. 130, no. 6-7, pp. 393-399.
28. **Cutrubinis M., Delincee H., Stahl M., Roder O., Schaller H.J.** Erste ergebnisse zum nachweis einer elektronenbehandlung von mais zur beizung bzw. entkeimung und entwesung [Preliminary results on detection of maize treated with electrons for seed dressing and according decontamination and infestation]. *Gesunde Pflanzen – Healthy Plants*, 2005, vol. 57, no. 5, pp. 129-136.
29. **Cutrubinis M., Delincee H., Stahl M., Roder O., Schaller H.J.** Detection methods for cereal grains treated with low and high energy electrons. *Radiat. Phys. Chem.*, 2005, vol. 72, no. 5, pp. 639-644.
30. EVONTA – Service GmbH. Available at: www.evonta.de (Accessed 07.11.2019).
31. **Hayashi T., Okadome H., Toyoshima H., Todoriki S., Ohtsubo K.** Rheological properties and lipid oxidation of rice decontaminated with low-energy electrons. *J. Food Prot.*, 1998, vol. 61, no. 1, pp. 73-77.
32. **Todoriki S., Hayashi T.** Disinfection of seeds and sprout inhibition of potatoes with low energy electrons. *Radiat. Phys. Chem.*, 2000, vol. 57, no. 3-6, pp. 253-255.
33. **Hayashi T., Takahashi Y., Todoriki S.** Low-energy electron effects on the sterility and viscosity of grains. *J. Food Sci.*, 1997, vol. 62, no. 4, pp. 858-860.
34. **Todoriki S., Kikuchi O.K., Nakaoka M., Miike M., Hayashi T.** Soft electron (low energy electron) processing of foods for microbial control. *Radiat. Phys. Chem.*, 2002, vol. 63, no. 3-6, pp. 349-351.
35. **Markova Yu.A., Alekseenko A.L., Kramarskiy A.V., Savilov E.D.** Plants as an element of environmental chain circulation of pathogenic for human bacteria. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal (Irkutsk) – Siberian Medical Journal*, 2012, vol. 114, no. 7, pp. 11-14. (In Russian).
36. **Fan X., Sokorai K., Weidauer A., Gotzmann G., Rogner F.H., Koch E.** Comparison of gamma and electron beam irradiation in reducing populations of *E. coli* artificially inoculated on mung bean, clover and fenugreek seeds, and affecting germination and growth of seeds. *Radiat. Phys. Chem.*, 2017, vol. 130, pp. 306-315.