

## **ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЛУ ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

*В. В. Безуглов, А. А. Брызгин, А. Ю. Власов, Л. А. Воронин,  
А. Д. Панфилов, В. М. Радченко, В. О. Ткаченко, Е. А. Штарклев*<sup>1</sup>

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ разрабатываются и производятся Институтом ядерной физики СО РАН более 30 лет. Их отличительными особенностями являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность при длительной работе в условиях промышленного производства. Ускорители ИЛУ перекрывают диапазон энергии 0,7–10 МэВ при мощности ускоренного пучка до 100 кВт и оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных комплексов. Научная новизна этих ускорителей состоит в том, что они способны работать как в режиме электронной обработки продукции, так и в режиме генерации тормозного гамма-излучения, имеющего высокую проникающую способность.

Pulse linear electron accelerators of ILU-type have been developed and produced by the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for more than 30 years. Their distinctive features are simplicity of a design, convenience in operation and reliability during the long work in the conditions of industrial production. ILU accelerators have the range of energy 0.7–10 MeV at the power of accelerated beam up to 100 kW and they are optimally suitable for use as universal sterilizing complexes. Scientific novelty of these accelerators consists in their capability to work both in the electron treatment mode of production, and in the bremsstrahlung generation mode which has high penetrating power.

PACS: 29.20.Ej

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее десятилетие приобрело большое значение внедрение эффективных, экологически чистых и экономичных методов стерилизации медицинских изделий однократного использования. Традиционно применяемые для этих целей методы, такие как пар, этилен-оксид, а также изотопные источники (Co-60) не позволяют в полной мере решить поставленные задачи. В связи с этим осуществляется переход на радиационную стерилизацию медицинских изделий однократного использования. Становится актуальной задача радиационного обеззараживания медицинских отходов.

---

<sup>1</sup>E-mail: shtarklev@gmail.com

## 1. УСКОРИТЕЛИ ИЛУ

Линейка промышленных ускорителей ИЛУ включает в себя несколько моделей ускорителей с разной энергией и мощностью, приведенных в таблице.

Основные параметры импульсных линейных ускорителей серии ИЛУ

Параметры	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-10	ИЛУ-10М	ИЛУ-14
Энергия электронов, МэВ	0,6–1,0	1,5–2,5	2,5–5,0	3,5–5,0	7,0–10,0
Средняя мощность пучка (макс.), кВт	25	20	50	20	100
Средний ток (макс.), мА	30	20	15	8	10
Потребительская мощность, кВт	80	100	150	120	450
Масса ускорителя, т	0,6	2,2	2,9	2,5	4

Основные области применения ускорителей ИЛУ в настоящее время: стерилизация одноразовых медицинских изделий в потребительской таре (шприцев, медицинской одежды, систем очистки и переливания крови, катетеров и т. д.); стерилизация биодобавок и растительного лекарственного сырья; стерилизация медпрепаратов и их компонентов; улучшение изоляции проводов; производство термоусаживаемых трубок и пленок; де-структуризация политетрафторэтилена (тефлона); полимеризация. Перспективные обла-

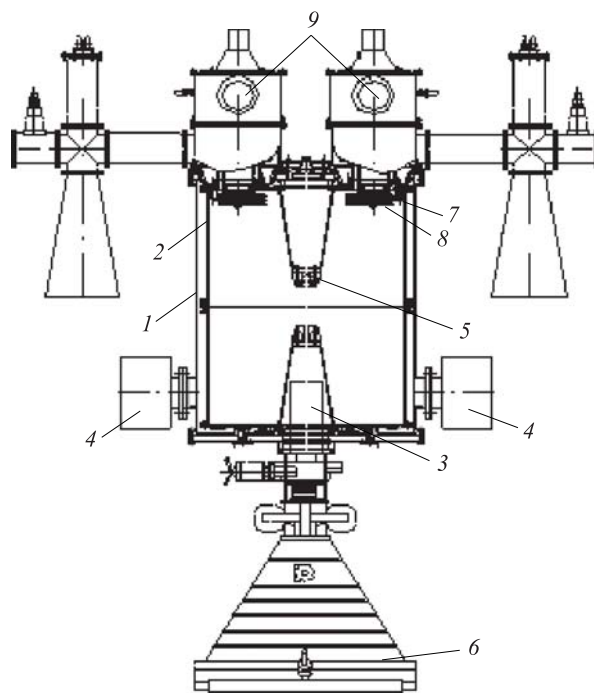


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-10: 1 — вакуумный бак; 2 — медный тороидальный резонатор; 3 — магнитная линза; 4 — магниторазрядные насосы; 5 — катодно-сеточный узел; 6 — устройство выпуска пучка с линейной разверткой; 7 — опора петли связи; 8 — вакуумный конденсатор; 9 — ВЧ-генераторы

сти применения: обеззараживание медицинских отходов; дезинсекция и дезинфекция семян; пастеризация животноводческих кормов; пастеризация пищевых продуктов.

Рассмотрим устройство и принцип работы ускорителей ИЛУ на примере ускорителя ИЛУ-10 [1]. Его основой является медный тороидальный резонатор с рабочей частотой 116 МГц и конусообразными осевыми выступами, которые образуют ускоряющий зазор длиной 270 мм. Резонатор 2 помещен в вакуумный бак 1 из нержавеющей стали (рис. 1). ВЧ-генераторы 9, собранные по схеме с общей сеткой, работают в режиме самовозбуждения на частоте, близкой к собственной частоте резонатора. Величина связи генератора с резонатором подбирается при предварительной настройке ускорителя изменением емкости вакуумного конденсатора 8 и площади петли связи — путем изменения положения опоры 7. На изоляторе, установленном на верхнем электроде, смонтирован катодный узел, образующий с сеткой инжектор электронов 5. Нижний электрод и инжектор образуют триодную ускоряющую систему.

Под нижним электродом резонатора установлена магнитная линза, фокусирующая ускоренный электронный пучок. Попадая в выпускное устройство 6, пучок сканируется на необходимую ширину при помощи электромагнита развертки [2]. Неравномерность выходного дозного поля в пределах  $\pm 5\%$  достигается при помощи дополнительного электромагнита коррекции сканирующего магнитного поля [3].

## 2. РАДИАЦИОННАЯ СТЕРИЛИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ

При радиационной стерилизации с использованием ускорителей ИЛУ используются разогнанные до световых скоростей электроны с энергией от 2,5 до 10,0 МэВ и мощностью до 100 кВт. Принцип радиационной стерилизации базируется на способности электронного пучка разрушать ДНК живых микроорганизмов. Для невозможности самовосстановления молекула ДНК должна быть разрушена в двух местах. Взаимодействие электронного пучка с микробиологическими объектами можно разделить на два типа:

- 1) прямое: излучение непосредственно ионизирует атомы цепочек ДНК, необратимо повреждая их, и тем самым препятствует размножению микроорганизмов;
- 2) косвенное: излучение образует из воды высокоактивные свободные радикалы  $H^+$  и  $OH^-$ , которые взаимодействуют с молекулой ДНК и разрушают ее.

При этом вклад в итоговый результат у первого типа взаимодействия составляет 10 %, а у второго — 90 %. Характерные особенности взаимодействия электронов с веществом приводят к тому, что поглощенная доза в глубине вещества  $D_{max}$  всегда больше дозы на поверхности  $D_{min}$ . Минимально необходимая стерилизационная доза для медицинских изделий, как правило, находится в диапазоне 25–35 кГр и соответствует  $D_{min}$ . За эффективную глубину  $R_{eff}$  проникновения электронов принимается глубина, на которой поглощенная доза в глубине вещества равна дозе на поверхности. Поэтому при одностороннем облучении и толщине упаковки не более  $R_{eff}$  теряется значительная часть мощности пучка, что, конечно, снижает производительность установки. Для исключения этих потерь обычно используется облучение с двух сторон.

Одной из основных характеристик электронного пучка является его мощность, определяющая производительность работы ускорителя в режиме радиационной стерилизации. Мощность пучка  $P$  есть произведение энергии электронов на средний ток пучка. Производительность установки  $T$  при радиационной стерилизации с применением ускорителей

электронов вычисляется по следующей формуле:  $T[\text{кг/ч}] = \frac{P[\text{Вт}] \cdot k}{D_{\text{min}}[\text{Гр}]} \cdot 3600$ , где  $k = 0,5$  — коэффициент, учитывающий двустороннее облучение. Производительность ускорителей серии ИЛУ при дозе облучения 25 кГр колеблется в пределах от 1,5 до 7 т обработанной продукции в час в зависимости от модели ускорителя. По сравнению со стерилизацией при помощи этилен-оксида, обработка электронами имеет следующие преимущества: высокая скорость технологического процесса; нет необходимости в выдержке продукции после обработки; единственный критический параметр, подлежащий контролю, — набранная доза; безопасность процесса; нет необходимости в использовании специальной «дышащей» упаковки изделий.

В то же время электронная обработка выгодно отличается от стерилизации при помощи изотопных источников на основе Co-60 и Cs-137 следующими особенностями: высокая скорость обработки; время облучения сравнительно мало, т. е. гораздо менее выражены эффекты деградации материала продукции; необходимая доза определяется всего лишь несколькими параметрами ускорителя: энергией, током, шириной развертки пучка; нет необходимости в «перезарядке» источника: ускоритель работает десятки тысяч часов без ухудшения параметров; безопасность: при выключении ускорителя какое-либо излучение полностью отсутствует.

### 3. ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

В последние годы многие страны помимо стерилизации развивают применение лучевых технологий в промышленности для пастеризации пищевых продуктов. Однако при этом возникают две проблемы.

1. Проникающая способность электронного пучка сравнительно мала, что ставит ограничения на объем облучаемого материала.

В ряде случаев может оказаться необходимой обработка продуктов питания со сложной геометрией и большой массовой толщиной (20 г/см<sup>2</sup> и более). Для такой обработки использование ускоренных электронов неэффективно (их проникающая способность составляет величину порядка 4 г/см<sup>2</sup> при двустороннем облучении и энергии 5 МэВ).

2. Согласно рекомендации МАГАТЭ, энергия ускорителей электронов не должна превышать 10 МэВ при использовании электронов и 5 МэВ при использовании тормозного излучения (7,5 МэВ в США).

Разумным выходом из данной ситуации является использование для пастеризации пищевых продуктов промышленных ускорителей серии ИЛУ, способных работать как в режиме электронной обработки продукции, так и в режиме генерации тормозного гамма-излучения с проникающей способностью до 40 г/см<sup>2</sup> при двустороннем облучении. Это позволяет перекрывать весь спектр обрабатываемой пищевой продукции — использовать для пастеризации наряду с электронами тормозное гамма-излучение, генерируемое при конверсии пучка ускоренных электронов. Производительность ускорителя при работе в гамма-режиме может составить до 300 кг/ч (при дозе 10 кГр). Перевод ускорителя из режима генерации электронного пучка в режим генерации тормозного излучения занимает не более 10 мин. Этот прием значительно расширяет ассортимент стерилизуемых изделий.

Обработка пищевых продуктов при помощи ускорителей ИЛУ имеет ряд положительных эффектов: уменьшение болезнетворных микроорганизмов (сальмонелла, *E. coli* и др.);

увеличение времени хранения продукта; уничтожение насекомых; увеличение количества потребляемых пищевых продуктов за счет увеличенных сроков хранения (импортозамещение); удешевление пастеризации продуктов по сравнению с традиционными методами (например, возможность производства тушенки и консервов в пластиковой упаковке); улучшение здоровья населения и уменьшение нетрудоспособности за счет потребления более качественных продуктов питания.

Международные исследования показывают, что в настоящее время около 40 % пищевых продуктов выбрасывается покупателями либо торговыми сетями из-за истечения их срока годности. Пастеризация пищевых продуктов гамма-излучением, генерируемым конвертором ускорителей электронов ИЛУ [4], поможет значительно сократить эти потери. При этом важно учесть влияние данного излучения на свойства продуктов питания. В 1980 г. объединенный комитет экспертов (ФАО, МАГАТЭ и ВОЗ) рассмотрел данные международного проекта по исследованию токсичности облученных пищевых продуктов и заключил, что они не более вредны, чем обычные пищевые продукты, содержащие в неумовимо малых количествах мутагены, при дозе облучения не более 10 кГр. При этом дозы, необходимые для пастеризации продуктов питания, как правило, составляют единицы килограмм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускорители ИЛУ оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных комплексов. ИЯФ имеет лицензию на разработку и производство ускорителей. Разработаны технологии стерилизации различных видов продукции. Одними из последних введенных в эксплуатацию установок для радиационной стерилизации являются ускоритель ИЛУ-10 для АО «Парк ядерных технологий» (Курчатов, Казахстан) и ускоритель ИЛУ-14 для ФМБЦ им. А. И. Бурназяна (Москва).

Исследование распределения поглощенной дозы по глубине вещества (разд. 2) было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Auslender V. L. и др.* Импульсный высокочастотный линейный ускоритель электронов ИЛУ-10 // Вестн. «Радтех-Евразия». 2002. № 1(11). С. 94–97.
2. *Безуглов В. В. и др.* Методика расчета и конструирования выпускных устройств для импульсных ускорителей электронов серии ИЛУ. Препринт ИЯФ 2008-023. Новосибирск, 2008. 36 с.
3. *Bezuglov V. V. et al.* Beam Extraction System for Industrial Electron Accelerator ILU-14 // Proc. of RUPAC 2012, Saint-Petersburg, Russia, 2012. P. 161–163.
4. *Auslender V. L. et al.* Bremsstrahlung Converters for Powerful Industrial Electron Accelerators // Rad. Phys. Chem. 2004. V. 71. P. 297–299.