

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384.6

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ
ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРОДУКЦИИ¹

© 2025 г. В. В. Безуглов^а, А. А. Брызгин^а, Л. А. Воронин^а, М. В. Коробейников^а,
С. А. Максимов^а, А. В. Пак^а, В. М. Радченко^а, А. В. Сидоров^а, В. О. Ткаченко^а,
Е. А. Штарклев^{а, *}

^а *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

** e-mail: E.A.Shtarklev@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 04.12.2023 г.

После доработки 01.03.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

Рассмотрено устройство и принцип работы промышленных ускорителей электронов серии ИЛУ, производимых в ИЯФ СО РАН, на примере ускорителя ИЛУ-10, рассчитанного на энергию ускоренных электронов 5 МэВ и среднюю мощность пучка до 50 кВт, и ускорителя ИЛУ-14 с энергией электронов до 10 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт. Описаны механизмы взаимодействия электронного пучка с микробиологическими объектами, особенности распределения поглощенной дозы по глубине вещества, а также устройство конвертера электронного пучка в тормозное излучение, использование которого позволяет увеличить массовую толщину обрабатываемой продукции в несколько раз по сравнению с электронной модой. Приведены оценки производительности ускорителей ИЛУ при радиационной стерилизации и электронной пастеризации продукции.

DOI: 10.7868/S3034564225070256

1. УСКОРИТЕЛИ ИЛУ

В последние десятилетия приобрело большое значение внедрение эффективных, экологически чистых и экономичных методов стерилизации медицинской и сельскохозяйственной продукции. Традиционно применяемые для этих целей методы, такие как пар, этилен-оксид, а также изотопные источники (Co-60) не позволяют полностью решить указанные задачи. В связи с этим осуществляется переход на радиационную стерилизацию. Становится актуальной задача пастеризации пищевых продуктов и животноводческих кормов, а также дезинсекции и дезинфекции семян. Импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ, выпускающиеся в ИЯФ СО РАН более 30 лет, оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных ком-

плексов. Их отличительными особенностями являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность при длительной работе в условиях промышленного производства. Ускорители ИЛУ перекрывают диапазон энергий ускоренных электронов от 0.6 до 10 МэВ при мощности ускоренного пучка до 100 кВт. В табл. 1 приведены параметры основных моделей промышленных линейных ускорителей электронов ИЛУ.

Рассмотрим устройство и принцип работы ускорителей ИЛУ на примере ускорителя ИЛУ-10 [1]. Его основой является медный тороидальный резонатор с рабочей частотой 116 МГц с 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

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", г. Новосибирск.

Таблица 1. Параметры ускорителей ИЛУ разных серий

Параметры	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-10	ИЛУ-14
Энергия электронов, МэВ	0.6 ÷ 1.0	1.5 ÷ 2.5	2.5 ÷ 5.0	7.0 ÷ 10.0
Средний ток пучка, мА	20	10	10	10
Средняя мощность пучка, кВт	20	25	50	100
Потребляемая мощность, кВт	80	100	150	450
Масса ускорителя, т	0.6	2.2	2.9	4

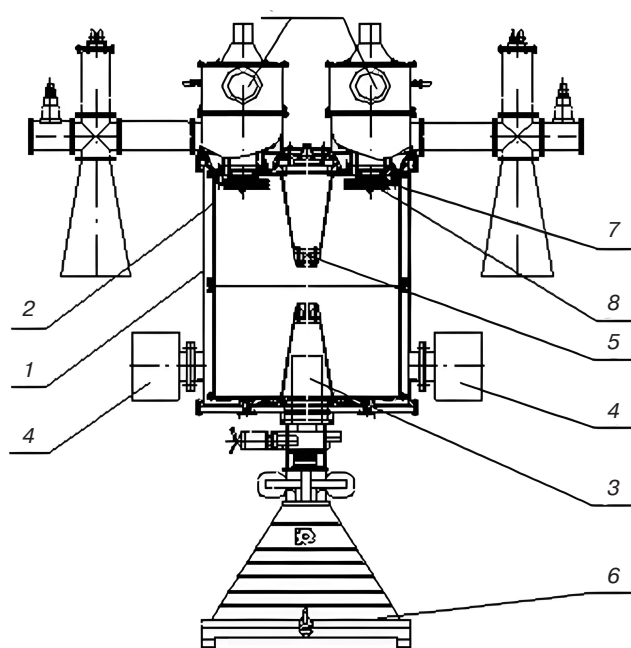


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-10: 1 – вакуумный бак, 2 – медный тороидальный резонатор, 3 – магнитная линза, 4 – магниторазрядные насосы, 5 – катодно-сеточный узел, 6 – устройство выпуска пучка с линейной разверткой, 7 – опора петли связи, 8 – вакуумный конденсатор, 9 – ВЧ-генераторы.

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 ускорен-

ный электронный пучок. Попадая в выпускное устройство 6, пучок сканируется на необходимую ширину при помощи электромагнита развертки [2]. Неравномерность выходного дозового поля в пределах $\pm 5\%$ достигается при помощи дополнительного электромагнита для коррекции сканирующего магнитного поля [3].

Последняя разработка ИЯФ СО РАН – ускоритель ИЛУ-14. В отличие от предыдущих моделей этот ускоритель расположен горизонтально и представляет собой модульную структуру, состоящую из пяти полных и двух половинных ускоряющих резонаторов, в которых электронный пучок ускоряется до энергии 10 МэВ. Отдельные модули ускоряющей структуры собираются из узлов, выпускаемых экспериментальным производством института.

Мощный промышленный ускоритель ИЛУ-14, блок-схема которого представлена на рис. 2, содержит ускоряющую структуру, триодную электронную высокочастотную пушку, двухкаскадный автогенератор, фидерную систему, ВЧ-вводы мощности, модуляторы, систему развертки и конвертер тормозного излучения [4].

После ускоряющей структуры электронный пучок попадает в систему выпуска, состоящую из двухкоординатного корректора оси пучка, дублета квадрупольных линз для фокусировки пучка и сканирующего электромагнита. Для коррекции формы сканирующего поля перед сканирующим электромагнитом так же, как и в ускорителе ИЛУ-10, расположен электромагнит коррекции. После сканирования развернутый пучок проходит дополнительную рассеивающую линзу, расположенную на первой половине выпускного устройства, и через выпускное окно раструба выводится в атмосферу. Линза Панофского, расположенная перед выпускным окном, позволяет менять угол вывода электронного пучка в атмосферу.

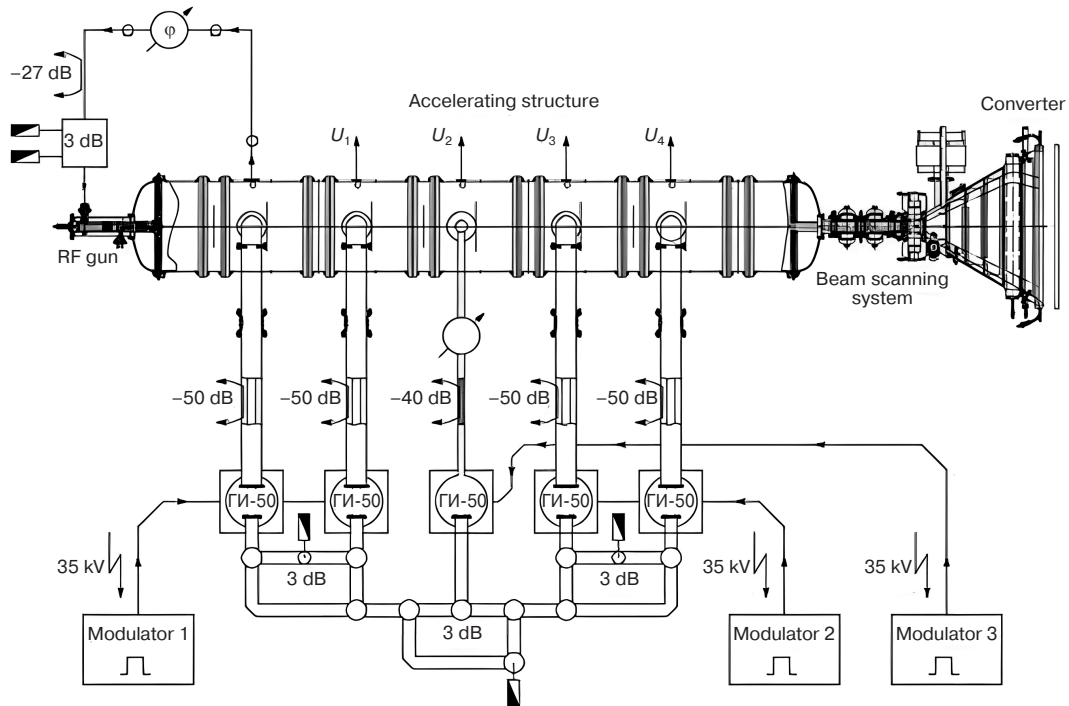


Рис. 2. Блок-схема ускорителя ИЛУ-14.

2. РАДИАЦИОННАЯ СТЕРИЛИЗАЦИЯ ПРОДУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Основные области применения ускорителей ИЛУ на данный момент:

- стерилизация одноразовых медицинских изделий;
- стерилизация биодобавок и растительного лекарственного сырья;
- стерилизация медпрепаратов и их компонентов;
- улучшение изоляции проводов;
- производство термоусаживаемых трубок и пленок.

Принцип радиационной стерилизации базируется на способности электронного пучка разрушать ДНК живых организмов. Для невозможности самовосстановления, молекула ДНК должна быть разрушена в двух местах. При радиационной стерилизации продукции взаимодействие электронного пучка с микробиологическими объектами можно описать двумя процессами:

1) электроны непосредственно ионизируют атомы цепочек ДНК бактерий, необратимо повреждая их и препятствуя их дальнейшему размножению;

2) электроны образуют из молекул воды высокоактивные свободные радикалы H^+ и OH^- , которые также разрушают ДНК бактерий.

При этом вклад первого процесса в итоговый результат составляет 10%, а второго – 90%. Характерные особенности взаимодействия электронов с веществом приводят к тому, что поглощенная доза D на поверхности облучаемого материала не является максимальной, она достигает максимума внутри материала, а затем начинает убывать, и на некотором расстоянии от поверхности материала сравнивается с поверхностной дозой. Данное расстояние принимается за эффективную глубину проникновения электронов в вещество $R_{эф}$. Из этого следует, что при одностороннем облучении продукции и толщине упаковки менее $R_{эф}$ теряется значительная часть мощности пучка, что в свою очередь снижает производительность установки. Для исключения этих потерь на ускорителях обычно используется облучение образцов 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 [кг/ч] = $= 3600 P$ [Вт] · k/D [Гр], где $k = 0.5$ – коэффициент, учитывающий двустороннее облучение. Производительность ускорителей серии ИЛУ при стандартной для радиационной стерилизации дозе облучения 25 кГр достигает нескольких тонн в час.

3. ПАСТЕРИЗАЦИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ С ПОМОЩЬЮ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Одной из перспективных областей применения радиационных технологий в сельском хозяйстве является дезинсекция и дезинфекция семян, а также пастеризация пищевых продуктов и животноводческих кормов. Однако при этом возникает проблема: в ряде случаев может оказаться необходимой обработка продуктов питания со сложной геометрией и большой массовой толщиной (20 г/см² и более), а проникающая способность электронного пучка при максимальной допустимой по нормам МАГАТЭ энергии 10 МэВ сравнительно мала (до 8 г/см² при двустороннем облучении), что ставит ограничения на объем облучаемого материала.

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 рентгеновского излучения, обладающего высокой проникающей способностью. Это позволяет перекрывать весь спектр обрабатываемой пищевой продукции, используя для пастеризации наряду с электронами тормозное рентгеновское излучение, генерируемое при конверсии пучка ускоренных электронов. Перевод ускорителя из режима генерации электронного пучка в режим генерации тормозного излучения занимает не более 10 минут.

Специально разработанный конвертер представляет собой тормозную мишень, состоящую из пластины алюминия с каналами для охлаждающей воды, на которую методом сварки взрывом закреплена пластина тантала [5]. Поглощающий электроны слой тантала обращен в вакуум. Его толщина составляет от 0.8 до 1.5 мм, при такой

толщине процент выхода гамма-излучения уже достигает максимального значения, а не конвертированные электроны максимально поглощаются в алюминии. Это улучшает тепловой режим поглощающего слоя и мишени в целом, поскольку приводит к более равномерному распределению тепла в устройстве.

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). Доза тормозного излучения с энергией 7.5 МэВ в геометрии плоского продукта падает почти экспоненциально с длиной поглощения около 20 г/см². Для режима тормозного излучения производительность примерно в 15 раз меньше, чем для электронного из-за эффективности преобразования, углового распределения тормозного пучка, большей доли рассеяния. А вот толщина изделия может быть намного больше. При двустороннем тормозном облучении с энергией 7.5 МэВ массовая толщина продукта при максимальной производительности составляет около двух длин поглощения или 40 г/см² при коэффициенте однородности дозы (DUR) около 1.55. Таким образом, при характерных дозах облучения пищевых продуктов, составляющих единицы кГр, производительность ускорителя при работе в рентген-режиме может достигать нескольких тонн в час.

Обработка пищевых продуктов при помощи ускорителей ИЛУ имеет ряд положительных эффектов: уничтожение болезнетворных микроорганизмов (сальмонелла, е-коли и др.); увеличение времени хранения продукта; уничтожение насекомых; удешевление пастеризации продуктов по сравнению с традиционными методами (например, возможность производства тушенки и консервов в пластиковой упаковке).

При этом важно учесть влияние 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. Комитет заключил, что при дозе облучения не более 10 кГр они не более вредны, чем обычные пищевые продукты, содержащие в неуловимо малых количествах мутагены. При этом максимальные дозы, необходимые для пастеризации продуктов питания, как правило, составляют единицы килогрэй.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленные ускорители ИЛУ оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных комплексов, на которых может производиться как радиационная стерилизация медицинских изделий, биодобавок и лекарственного сырья электронным пучком, так и пастеризация пищевых продуктов при помощи тормозного излучения. ИЯФ СО РАН имеет лицензию на разработку и производство ускорителей. Разработаны технологии стерилизации различных видов продукции. На данный момент в институте идет изготовление ускорителя ИЛУ-14 для облучения рыбы и морепродуктов во Вьетнаме и ускорителя ИЛУ-12 для облучения фруктов и ягод в Узбекистане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Воронин Л.А. и др. // Вестник Радтех – Евразия. 2002. № 1(11). С. 94.
2. Безуглов В.В., Брызгин А.А., Воронин Л.А. и др. Препринт № 2008-23. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2008.
3. Bezuglov V.V., Bryazgin A.A., Faktorovich B.L. et al. // RuPAC 2012. Contributions to the Proceedings. 23rd Russian Particle Accelerator Conference. Saint-Petersburg. 2012. P. 161.
4. Брызгин А.А., Безуглов В.В., Кокин Е.Н. и др. // ПТЭ. 2011. № 3. С. 5.
<https://doi.org/10.1134/S0020441211030110>
5. Auslender V.L., Bukin A.D., Voronin L.A. et al. // Rad. Phys. Chem. 2004. V. 71. № 1-2. P. 297.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.007>