

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

АО «РУСАТОМ ХЭЛСКЕА»

**АО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ»**

**ВОПРОСЫ
АТОМНОЙ НАУКИ
И ТЕХНИКИ**

Серия:

**Техническая физика
и автоматизация**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 83

Издаётся с 1967 г.

**Москва
2018**

Радиационные технологии и оборудование

УДК 621.384.6

МОЩНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ СЕРИИ ИЛУ

**Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А.,
Коробейников М.В., Максимов С.А., Радченко В.М., Сидоров А.В.,
Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.**

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск

POWERFUL INDUSTRIAL ELECTRON ACCELERATORS SERIES ILU

**Bezuglov V.V., Bryazgin A.A., Vlasov A.Yu., Voronin L.A.,
Korobeinikov M.V., Maksimov S.A., Radchenko V.M., Sidorov A.V.,
Tkachenko V.O., Shtarklev E.A.**

Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk

Начиная с 70-х годов XX века, Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН разрабатывает и производит мощные высокочастотные промышленные ускорители электронов типа ИЛУ. Максимальная мощность пучка этих ускорителей – от 20 до 100 кВт, диапазон энергии электронов в пучке – от 0,8 до 10 МэВ. Для генерации тормозного излучения были разработаны и изготовлены конвертеры работающие с электронными пучками мощностью до 50 и до 100 кВт. Произведённые в ИЯФ ускорители работают в промышленных и исследовательских организациях многих стран мира.

Ключевые слова: мощные промышленные ускорители электронов, линейный высокочастотный ускоритель, конвертер для генерации тормозного излучения, стерилизация медицинских изделий, обработка пищевых продуктов.

Budker Institute of Nuclear Physics is designing and producing powerful radio frequency industrial electron accelerators since 1972. Their maximum beam power varies from 20 to 100 kW, energy range is from 0.8 to 10 MeV. Powerful convertors were designed and produced to generate X-rays using electron beam with power up to 50 and 100 kW. The electron accelerators produced by BINP are working in many industrial and research organizations in various countries.

Keywords: powerful radio frequency industrial electron accelerators, linear radio frequency accelerator, X-ray converter, sterilization of medical devices, food processing.

Введение

Линейный ускоритель заряженных частиц был создан и запатентован в 1928 году [1, 2, стр. 25]. Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) был создан в 1958 году на базе одного из подразделений Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН), которая впоследствии была преобразована в ИАЭ им. И.В. Курчатова. С конца 50-х годов XX века ИЯФ является одним из мировых лидеров в области разработки и создания больших ускорительных комплексов и ускорительной физики. С 60-х годов XX века ИЯФ является одним из немногих ведущих разработчиков и поставщиков мощных ускорителей электронов в мире. Произведённые в ИЯФ ускорители были поставлены в промышленные и в исследовательские организации многих стран мира, включая индустриально развитые.

В 60-е годы XX века хорошими параметрами мощных ускорителей электронов были энергия 1-1,5 МэВ и мощность электронного пучка 10 кВт.

В 70-е годы XX века в ИЯФ были разработаны передовые для своего времени импульсные линейные высокочастотные ускорители электронов типа ИЛУ-6, их максимальная энергия была 1,5 МэВ, максимальная мощность пучка была не меньше 20 кВт. Во второй половине 70-х годов начались поставки ускорителей ИЛУ-6 в промышленность.

Ускорители типа ИЛУ являются достаточно специфическими линейными высокочастотными ускорителями – это однорезонаторные машины, работающие в режиме стоячей полуволны (в отличие от большинства линейных ускорителей). Рабочие частоты ускорителей ИЛУ находятся в метровом диапазоне радиоволн – 118 МГц и 178 МГц.

Ускоряющий зазор у этих машин короче длины волны в вакууме, поэтому в процессе ускорения электроны приобретают энергию практически равную максимальному напряжению на резонаторе.

ВЧ генераторы ускорителей ИЛУ реализованы на импульсных генераторных триодах ГИ-50А, которые дешевле и обладают большим ресурсом (и временем работы) чем используемые в большинстве высокочастотных линейных ускорителей клистроны и магнетроны.

Работы по развитию ускорителей продолжались, и в 80-е годы параметры ИЛУ-6 были существенно улучшены – максимальная энергия была повышена до 2,5 МэВ, максимальная мощность пучка была доведена до 20 кВт при энергии 2,5 МэВ и до 40 кВт при энергии 2 МэВ.

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН выпускаются промышленные ускорители электронов с мощностью пучка до 50 кВт при энергии 5 МэВ (ИЛУ-10) и до 100 кВт при энергии 10 МэВ (ИЛУ-14). Для удовлетворения потребностей кабельной промышленности был разработан компактный ускоритель ИЛУ-8 с диапазоном энергии 0,8-1 МэВ и мощностью пучка до 20 кВт. Этот ускоритель обычно размещается внутри местной радиационной защиты устанавливаемой в производственных цехах.

Ускоритель ИЛУ-8 в местной защите

Ускоритель ИЛУ-8 подробно описанный в [3] был разработан в начале 80-х годов XX века, его диапазон рабочей энергии 0,8-1 МэВ, мощность пучка до 20 кВт.

Благодаря небольшим габаритам и низкой максимальной энергии ускоритель может работать внутри местной биологической защиты. ВЧ генератор выполнен в виде отдельной конструкции и размещён рядом с радиационной защитой. Ускоритель ИЛУ-8 с устройством выпуска пучка для четырехстороннего облучения проводов и трубок внутри местной защиты показан на рисунке 1.

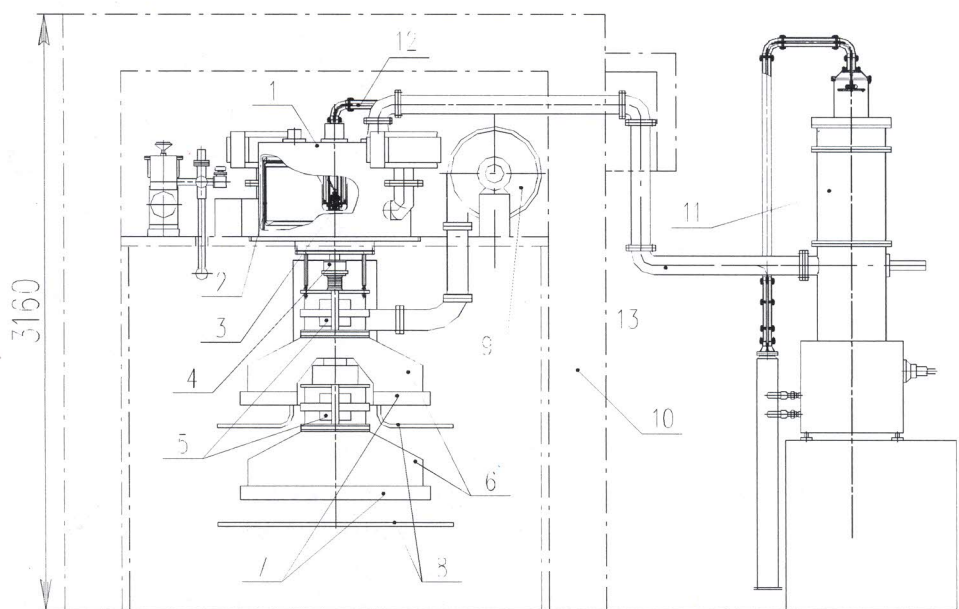
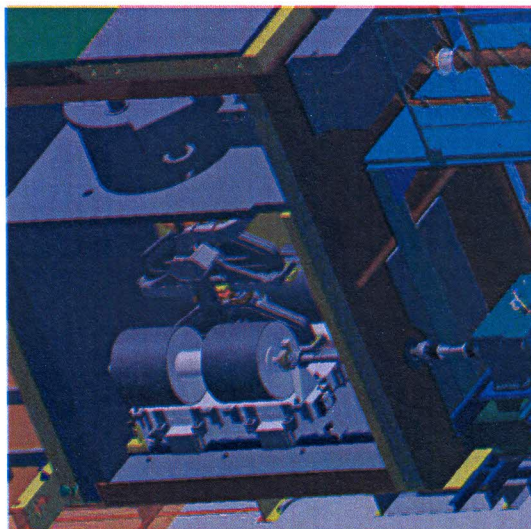
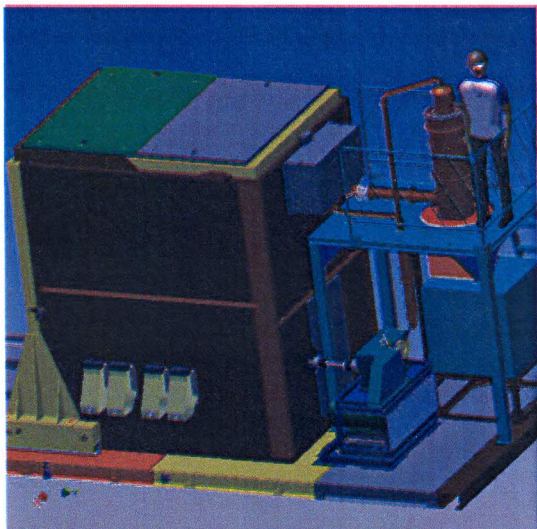


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-8 в местной биологической защите:
 1 – вакуумный бак, 2 – резонатор, 3 – инжектор электронов, 4 – шиббер,
 5 – электромагниты развёртки, 6 – раструбы выпускного устройства,
 7 – окна для выпуска пучка, 8 – коллекторы пучка,
 9 – вентилятор обдува выпускных окон, 10 – местная радиационная
 защита, 11 – высокочастотный генератор, 12 – волновод обратной связи,
 13 – волновод ввода высокочастотной мощности

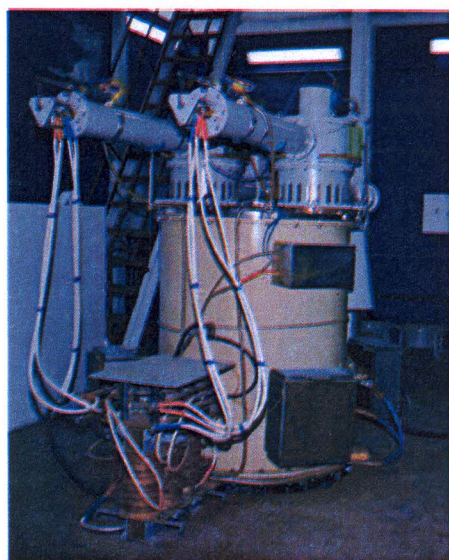
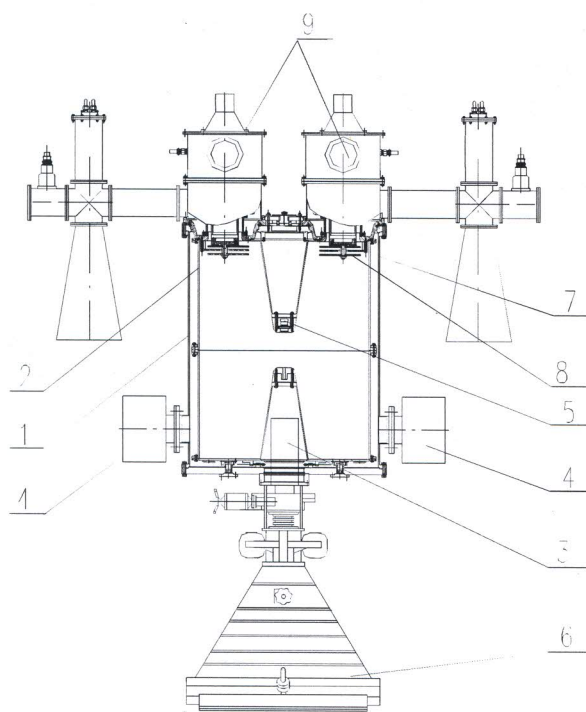


Рис. 2. Ускоритель ИЛУ-10:

- 1 – вакуумный бак, 2 – резонатор, 3 – фокусирующая линза,
 4 – магнитоэлектрические насосы, 5 – инжектор электронов,
 6 – выпускное устройство – линейная развёртка, 7 – петля связи,
 8 – вакуумный конденсатор петли связи, 9 – ВЧ генератор

Стандартная местная защита представляет собой стальной короб, разделенный на две части. В верхнем отделении размещаются вакуумный бак ускорителя и его вспомогательное оборудование. В нижнем отделении размещаются устройство выпуска пучка и перематывающее устройство обеспечивающее транспортировку длинномерных изделий под пучком. В боковой стене защиты предусмотрены лабиринты для ввода и вывода

облучаемой продукции. Передняя откатная стена обеспечивает доступ внутрь защиты.

Вес защиты 76 тонн, она может быть установлена в любом цеху, имеющем достаточную высоту (не менее 4 м). При желании ускоритель ИЛУ-8 можно разместить в компактном бетонном бункере.

Область применения ИЛУ-8 – обработка проводов – от очень тонких проводов для авиации до высоковольтных проводов системы зажигания двигателей внутреннего сгорания, а также термоусаживаемых трубок и плёнок.

Ускоритель ИЛУ-10

Ускоритель ИЛУ-10 был разработан на основе ускорителя ИЛУ-6 в связи с потребностью промышленности в повышении энергии для обработки толстостеночных полимерных изделий (термоусаживаемые трубки, провода, кабели и др.) и с выходом на рынок стерилизации.

На рисунке 2 показана конструкция ускорителя ИЛУ-10. Благодаря более высокой добротности резонатора (шунтовое сопротивление резонатора ИЛУ-6 – 4,5 МОм, а резонатора ИЛУ-10 – 9 МОм) и использованию двух ВЧ генераторов (вместо одного ВЧ генератора у ускорителя ИЛУ-6) диапазон рабочей энергии ускорителя ИЛУ-10 лежит в интервале 4-5 МэВ при мощности пучка до 50 кВт.

Высота ИЛУ-10 вместе с генераторами составляет 2,4 м (высота ИЛУ-6 – 2 м). ВЧ генераторы размещены непосредственно на вакуумном баке ускорителя и работают в параллель на общую нагрузку – резонатор с рабочей частотой около 118 МГц.

Линейное выпускное устройство, показанное на рисунке 2, обеспечивает развёртку пучка вдоль одного окна, закрытого тонкой титановой фольгой толщиной 50 мкм. Длина выпускного окна – 980 мм, ширина – 80 мм. ИЯФ может изготовить выпускные устройства с большей длиной выпускного окна в соответствии с требованиями заказчика. Подробное описание ускорителя ИЛУ-10 приведено в [4].

Многорезонаторные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14

Рост рынка одноразовых медицинских изделий и расширение использования ускорителей электронов для обработки пищевых продуктов вызвали спрос на мощные ускорители с энергией 5 МэВ и выше (до 10 МэВ) и мощностью десятки и сотни кВт. Однорезонаторные ускорители оказались неэффективными при энергии выше 5 МэВ – потери в резонаторе нарастают пропорционально квадрату энергии. Для снижения потерь было решено сделать многорезонаторную ускоряющую структуру. В результате были разработаны многорезонаторные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14 с диапазонами энергии 5-7,5 МэВ и 7,5-10 МэВ соответственно и мощностью пучка до 60 кВт и до 100 кВт. Описание ускорителя ИЛУ-14 приведено в [5].

На рисунке 3 показана конструкция ускоряющей структуры ускорителя ИЛУ-14 и ускоритель, установленный у заказчика. Для питания этих ускорителей используются двухкаскадные ВЧ генераторы на триодах ГИ-50А, рабочая частота – 178 МГц.

Основные области применения ускорителей ИЛУ

Основные области применения ускорителей электронов ИЛУ:

- кабельная промышленность
- стерилизация медицинских изделий
- обработка термоусаживаемых трубок, манжет, пленок
- производство пенополиэтилена
- обработка продуктов питания.

Энергия электронов определяет глубину проникновения и соответственно максимальную толщину обрабатываемых продуктов, а мощность пучка определяет производительность обработки. Для увеличения глубины обработки и повышения эффективности использования пучка применяется двухстороннее облучение, а для

длинномерных изделий с круглым сечением (термоусаживаемые трубки, провода, кабели и др.) применяется четырёхстороннее облучение.

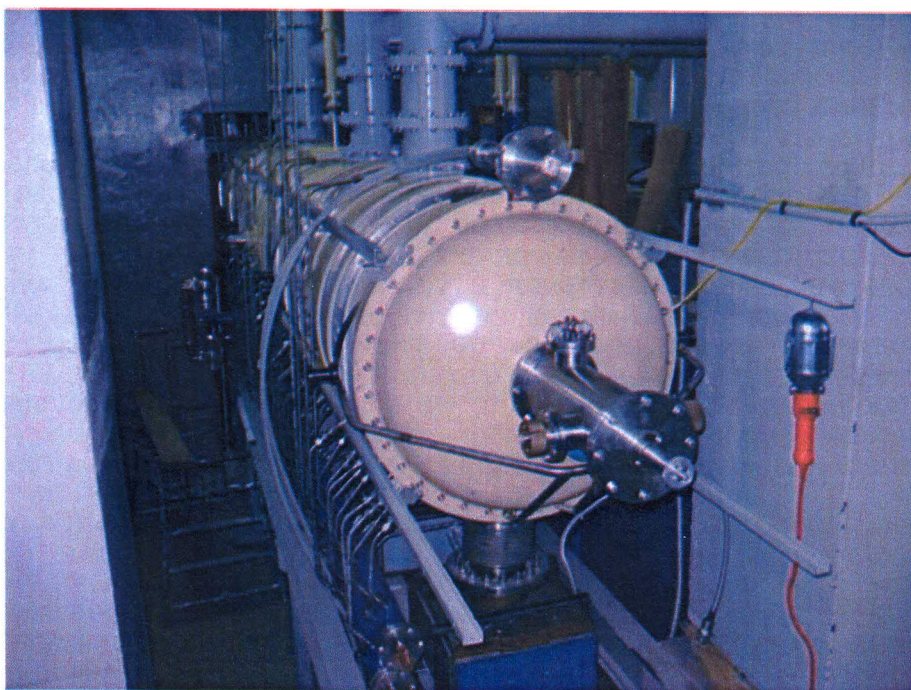
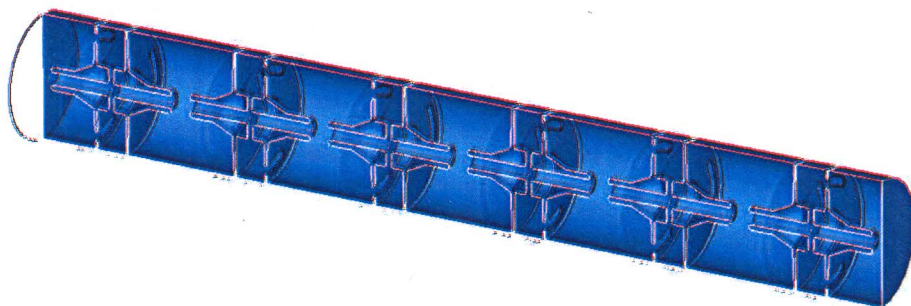


Рис. 3. Ускоряющая структура многорезонаторного ускорителя ИЛУ-14 – строение и внешний вид

Стерилизация медицинских изделий

Пионером в радиационной стерилизации медицинских изделий была американская компания Ethicon (подразделение компании Johnson&Johnson) которая начала контрактную стерилизацию шовных материалов на ускорителе электронов в 1956 году [2, стр. 65, 6].

Развитие ускорительной техники привело к увеличению мощности ускорителей и удешевлению процесса облучения. Переход на использование одноразовых медицинских изделий (шприцев, белья и т.п.) в 80-е годы XX века привёл к росту объёмов радиационной стерилизации в мире. С этого же времени ускорители ИЛУ стали применяться для стерилизации медицинских изделий и продуктов.

Двухстороннее облучение позволяет повысить эффективность использования энергии пучка, поскольку существенно снижаются его потери. Поэтому даже если продукцию можно облучать с одной стороны, экономически эффективнее изменить её упаковку чтобы обрабатывать пучком с двух сторон.

Если же размеры упаковки с продукцией не позволяют обеспечить обработку при двухстороннем облучении, ставится конвертор для генерации тормозного излучения и ускоритель осуществляет обработку тормозным излучением, которое по многим параметрам соответствует излучению изотопных источников, но отличается от них существенно выраженной направленностью в направлении пучка. Обработка тормозным излучением применяется в основном для медицинских изделий и пищевых продуктов.

Электронно-лучевая обработка обычно проводится за секунды или десятки секунд, и скорость набора дозы многократно превышает скорость набора дозы в изотопных источниках. Исследования показали, что высокая скорость набора дозы повышает летальность воздействия ионизирующего излучения на микроорганизмы [2, стр. 66, 7-11], поэтому медицинские изделия предпочтительнее стерилизовать электронным пучком, чем изотопным источником.

По состоянию на 2017 год работающие в Новосибирске ускорители ИЛУ-10 полностью обеспечивают потребности Новосибирской области и соседних областей Сибирского федерального округа в стерилизации одноразовых медицинских изделий.

В 2013 году начал работать облучательный центр с ускорителем ИЛУ-10 в Парке ядерных технологий, г. Курчатов, Казахстан. Основная загрузка этого центра – медицинские изделия, планируется обработка пищевых продуктов.

Обработка пищевых продуктов

Советский Союз был одним из мировых лидеров в разработке промышленных радиационных технологий, начиная с 40-х годов XX века, в том числе была разработана нормативная база и внедрена в практику промышленная радиационная обработка различных пищевых продуктов. В последние десятилетия промышленная радиационная обработка пищевых продуктов в России не производилась по причине того что современной нормативной базы не охватывала процессы радиационной обработки пищевых продуктов. В настоящее время вводятся новые ГОСТы, согласованные с международными стандартами по облучению пищевых продуктов. Подробнее об этом написано в [13]. Это открыло возможности разработки и внедрения новых технологий облучения в сельское хозяйство и пищевую промышленность.

По данным ФАО ООН потеря продуктов вследствие порчи составляет порядка трети от всего произведенного объема и составляет 1,3 млрд. тонн [14].

Внедрение процесса холодной пастеризации (электронно-лучевой обработки) позволит сократить потери пищевых продуктов, снизить заболеваемость населения и расширить рынки сбыта благодаря увеличению срока хранения готовой продукции. Изменения в российском законодательстве позволяют начать внедрение этого процесса в практику, и открывается новая ниша рынка.

Ускорители типа ИЛУ-10 являются на данном этапе наиболее перспективными российскими машинами для этого применения, так как они генерируют электронный пучок с энергией 5 МэВ и мощностью до 50

кВт, что позволяет им работать в режиме генерации тормозного излучения. В дальнейшем с развитием и расширением объёмов обработки будут востребованы ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14, генерирующие более мощный электронный пучок.

Сравнение ускорителей ИЛУ и изотопных источников

Ускорители электронов используют электроэнергию для генерации ионизирующего излучения, что позволяет обойтись без закупок, транспортировки, хранения, утилизации и защиты активных элементов изотопных источников. В отличие от изотопных источников ускорители в любой момент можно выключить, и они после выключения сразу же перестают быть источниками ионизирующего излучения.

Изотопные источники всегда генерируют гамма-излучение и поэтому представляют опасность в случае нештатных ситуаций – это обычно заклинивания в процессе перезарядки источника или при перемещении источника между облучательным залом и местом хранения (обычно это бассейн с водой расположенный под бункером).

Изотопным источникам требуется регулярная перезарядка для поддержания стабильной мощности излучения даже в случае простоя, так как процесс распада радиоактивных изотопов идёт вне зависимости от внешних условий.

Установка конвертера позволяет ускорителям ИЛУ генерировать тормозное излучение, проникающая способность которого такая же, как у излучения изотопных источников, но оно обладает выраженной направленностью в направлении пучка, что повышает эффективность его использования.

Конвертер устанавливается непосредственно под выпускным окном ускорителя. В разработанном для ИЛУ-10 конвертере при энергии 5 МэВ и мощности пучка 50 кВт мощность тормозного излучения составляет около 4 кВт, что соответствует 294 кКи мощности изотопного источника, в то

время как обработка электронным пучком мощностью 50 кВт соответствует мощности источника 3650 кКи.

Для работы с ускорителями ИЛУ-12 и ИЛУ-14 были разработаны конвертеры, рассчитанные на мощность электронного пучка до 100 кВт. При энергии 5 МэВ и мощности пучка 60 кВт мощность тормозного излучения ускорителя ИЛУ-12 составляет 4,8 кВт, что соответствует 340 кКи мощности изотопного источника.

При энергии 7,5 МэВ мощность тормозного излучения ускорителя ИЛУ-14 составляет около 13,2 кВт, что соответствует 968 кКи мощности изотопного источника. Обработка электронным пучком мощностью 100 кВт (ИЛУ-14) соответствует работе изотопного источника с мощностью 7300 кКи.

Важно отметить, что у ускорителей ИЛУ переход от электронно-лучевой обработки к генерации тормозного излучения и обратно производится за несколько минут.

В таблице 1 обобщены параметры ускорителей ИЛУ и кобальтовых источников эквивалентной мощности, также приведены ориентировочные стоимости загрузки изотопных источников и ускорителей наряду с ежегодными эксплуатационными расходами. Используя эти данные можно оценочно сравнить экономическую эффективность ускорителей и изотопных источников. Видно, что хотя бы при минимальной загрузке ускорителя облучением продукции в электронной моде экономическая эффективность ускорителей превышает эффективность гамма источников. Для радиационной сшивки изоляции кабелей и проводов фактор мощности дозы является очень важным. В изотопных источниках доза набирается на протяжении часов или десятков часов, и процесс сшивки частично ингибируется находящимся в полимере и диффундирующим из воздуха кислородом, что приводит к увеличению требуемой дозы и окислению полимера (иногда и к охрупчиванию). В процессе электронно-лучевой

обработки доза набирается за секунды или десятки секунд, и фактор диффузии кислорода перестаёт быть существенным.

Таблица 1. Сравнение ускорителей ИЛУ и кобальтовых источников

| Ускоритель, режим работы | Энергия, МэВ | Мощность излучения, кВт | Эквивалентная мощность источника ^{60}Co , кКи | Начальная стоимость. Полная загрузка источника/ ускоритель, долл. США | Ежегодные эксплуатационные расходы. Источник/ ускоритель, долл. США |
|----------------------------|--------------|-------------------------|---|---|---|
| ИЛУ-10 тормозное излучение | 5 | 4 | 294 | 0,88/1,4 млн. | 0,135/0,175 млн. |
| ИЛУ-10 электронный пучок | 5 | 50 | 3650 | 11/1,4 млн. | 1,64/0,175 млн. |
| ИЛУ-12 тормозное излучение | 5 | 4,8 | 340 | 1/2,8 млн. | 0,153/0,175 млн. |
| ИЛУ-12 электронный пучок | 7,5 | 40 | 2680 | 8,58/2,8 млн. | 1,3/0,175 млн. |
| ИЛУ-14 тормозное излучение | 7,5 | 13,2 | 968 | 2,9/4,2 млн. | 0,44/0,35 млн. |
| ИЛУ-14 электронный пучок | 10 | 100 | 7300 | 22/4,2 млн. | 3,3/0,35 млн. |

Пояснения:
 1 МКи (^{60}Co) примерно соответствует мощности электронного пучка 14 кВт.
 Степень ежегодного обновления источника ^{60}Co принята равной 15 %.
 Обновление источника ^{60}Co необходимо для поддержания постоянства его мощности излучения даже в случае отсутствия заказов, так как процесс распада радиоактивных изотопов идёт вне зависимости от внешних условий.
 Стоимость 1 кВт*ч электроэнергии принята равной 0,1 долл. США.

Исследования воздействия импульсного электронного пучка на микроорганизмы показали, что высокая импульсная мощность дозы способствует более эффективному воздействию на микроорганизмы [6-11].

В публикации [12] описаны результаты исследований механических параметров нетканых материалов после облучения одинаковыми дозами электронным пучком на ускорителе ИЛУ-10 и гамма излучением изотопного источника.

Измерения физико-механических показателей нетканых материалов изготовленных по технологии спанлейс показали более значительное падение прочностных показателей после обработки гамма излучением по сравнению с электронно-лучевой обработкой.

Более высокий уровень деструкции материалов при обработке гамма-излучением обусловлен длительностью обработки (многочасовое воздействие в отличие от секундного воздействия при электроннолучевой обработке), поскольку помимо длительного воздействия на поверхность образующейся внутри герметичных упаковок изделий окислительной среды (атомарных кислорода и азота, озона и окислов азота) происходит также окисление внутри объёма изделий вследствие диффузии с поверхности. (Среда внутри герметичных упаковок не вентилируется).

При электронно-лучевой обработке фактор диффузии кислорода и озона не работает вследствие быстроты процесса (секунды), и окислительная деструкция идёт только на поверхности материалов (и то недолго), а внутри окислять может только изначально растворённый в материале кислород.

Заключение

Мощные промышленные ускорители электронов серии ИЛУ на протяжении десятилетий исправно работают в промышленности России, Китая, Казахстана, Индии, Польши и других стран. В России в последние годы новые ускорители серии ИЛУ поставлялись для облучения проводов и кабелей (ИЛУ-8) и обработки медицинских изделий (ИЛУ-14 и ИЛУ-10).

Для возникающего в России рынка услуг по радиационной обработке пищевых продуктов ускорители типа ИЛУ являются оптимальным

источником ионизирующего излучения, поскольку могут производить обработку электронным пучком и тормозным излучением на одном и том же оборудовании. Современные ускорители электронов предпочтительнее изотопных источников из-за достаточной надежности, высокой экономической эффективности и отсутствия потенциальной экологической угрозы вследствие наличия радиоактивных изотопов.

В ИЯФ накоплен опыт разработки радиационных технологий. За прошедшие десятилетия в ИЯФ были разработаны многие радиационных технологий, начиная от технологии облучения проводов и кабелей, радиационно-термического синтеза [15-18] и до стерилизации медицинских изделий, синтеза лекарственных средств и подготовки имплантатов [19]. Также в ИЯФ регулярно проводятся исследования радиационной стойкости конструкционных материалов [20].

Литература

1. Widerøe, R. (17 December 1928). "Ueber Ein Neues Prinzip Zur Herstellung Hoher Spannungen". Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik. **21** (4): 387.
2. Industrial Radiation Processing With Electron Beams and X-rays. IAEA techdoc, 1 May 2011 – Revision 6.
<http://www.cirms.org/pdf/Industrial%20Radiation%20Processing%20-%20May%202011%20-%20Revision%206.pdf>
3. Ауслендер В.Л., Безуглов В.В., Брызгин А.А. и др. Импульсный высокочастотный линейный ускоритель электронов ИЛУ-8. Приборы и техника эксперимента, 2009, № 3, с.98-103.
4. Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Коробейников М.В. и др. Радиационно-технологическая установка на основе ускорителя электронов ИЛУ-10 для стерилизации медицинских изделий и синтеза новых лекарственных средств. Сборник докладов Одиннадцатого

- международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005, стр. 82-85.
5. Брызгин А.А., Безуглов В.В., Кокин Е.Н. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ-14. Приборы и техника эксперимента, 2011, № 3, с. 5–21.
 6. ATANDI C. and VAN WINKLE W. Jr. Electron-Beam Sterilization of Surgical Sutures. *Nucleonics*, Vol. 17 (3) (1959) 86-90.
 7. TALLENTIRE A., PURDIE J. W. and EBERT M. Increased response of anoxic *Bacillus megaterium* spores to radiation at high dose-rates. *International Journal of Radiation Biology*, vol. 26, no. 5 (1974) 435-443.
 8. TALLENTIRE A. and BARBER D. J. W. The Interrelationship between Pulse Length and Dose-rate within the Pulse in the Enhancement of Atomic Damage in Wet *Bacillus megaterium* Spores Irradiated with Pulses of Electrons. *Sixth Symposium on Microdosimetry* (Booz and Ebert, ed.) Harwood Academic Publishers Ltd. (1978) 1061-1069.
 9. BARBER D. J. W. and TALLENTIRE A. Modification by Chemical and Physical Means of the Pulse Dose Effect in Irradiated Bacterial Spores. *Seventh Symposium on Microdosimetry* (Booz, Ebert and Hartfield, ed.) Harwood Academic Publishers Ltd. (1980) 1145-1155.
 10. TALLENTIRE A. Oxygen effect, hydrogen peroxide yields, and time scale of interaction of potentially damaging species in electron pulse irradiated bacterial spores. *Advances in Space Research*, vol. 3, no. 8 (1983) 105-112.
 11. DeVEAUX L. C. et al. Effect of Electron Beam Dose Rate on Microbial Survival. *Proceedings AccApp '07*, Pocatello, ID (July 29-August 2, 2007) 388-393.
 12. Хакимуллин Ю.Н., Легаева К.В., Кузнецова Е.С., Травкина Л.С., Лисаневич М.С., Галимзянова Р.Ю. Влияние радиационной стерилизации на свойства нетканого материала полученного по технологии спанлейс. *Вестник Казанского технологического*

университета, Выпуск № 14, том 17, 2014, с. 150-153.
(<http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-radiatsionnoy-sterilizatsii-na-svoystva-netkanogo-materiala-poluchennogo-po-tehnologii-spanleys>).

13. Рождественская Л.Н., Брызгин А.А., Коробейников М.В. Предпосылки и основания использования ионизирующего излучения для обработки пищевой продукции. Пищевая промышленность №11/2016, с.39-45.
<http://www.foodprom.ru/journals/pischevaya-promyshlennost/989-pishchevaya-promyshlennost-11-2016>.
14. Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction. FAO. – 2014. - 8 p.
15. Sadykov V., Mezentseva N., Usoltsev V., Sadovskaya E., Ishchenko A., Pavlova S., Bepalko Yu., Kharlamova T., Zevak E., Salanov A., Krieger T., Bobrenok O., Uvarov N., Okhlupin Yu., Smorygo O., Smirnova A., Singh P., Vlasov A., Korobeynikov M., Bryazgin A., Kalinin P., Arzhannikov A. SOFC Composite Cathodes Based on Perovskite and Fluorite Structures. Труды международной конференции – Proceedings of 9th European Solid Oxide Fuel Cell Forum, 29 June – 2 July 2010, Lucerne, Швейцария, 29 июня – 2 июля 2010г., Chapter 10, pp. 4-16.
16. Sadykov V., Mezentseva N., Usoltsev V., Sadovskaya E., Ishchenko A., Pavlova S., Bepalko Yu., Kharlamova T., Zevak E., Salanov A., Krieger T., Belyaev V., Bobrenok O., Uvarov N., Okhlupin Yu., Smorygo O., Smirnova A., Singh P., Vlasov A., Korobeynikov M., Bryazgin A., Kalinin P., Arzhannikov A. Solid oxide fuel cell composite cathodes based on perovskite and fluorite structures. Journal of Power Sources 196 (2011) 7104– 7109.
17. Садыков В., Усольцев В., Федорова Ю., Собянин В., Калинин П., Аржанников А., Власов А., Коробейников М., Брызгин А., Саланов А., Предтеченский М., Бобренок О., Улихин А., Уваров Н., Сморгыо О., Ильющенко А., Ульяницкий В., Злобин С. Дизайн среднетемпературных твердооксидных топливных элементов на

пористых подложках из деформационно упрочненного Ni-Al сплава. Электрохимия, 2011, Т. 47, № 4, с. 517–523.

18. Панин С.В., Корниенко Л.А., Пувадин Т., Мержиевский Л.А., Шилько С.В., Полтаранин М.А., Иванова Л.Р., Коробейников М.В., Штарклев Е.А. Трение и изнашивание сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного высокоэнергетической обработкой поверхности электронным пучком. Трение и смазка в машинах и механизмах, 2011, № 12, с. 26-31. ISSN: 1819-2092.
19. Степанова А.О., Коробейников М.В., Юношев А.С., Лактионов П.П. Влияние облучения пучком электронов на физико-химические характеристики матриц, изготовленных методом электроспиннинга. Сибирский научный медицинский журнал. 2016. Т. 36. № 1. С. 36-41.
20. Петров В.В., Пупков Ю.А. Радиационная стойкость изоляционных материалов магнитных систем ускорителей. Журнал технической физики № 7, 2016, стр. 65. <http://journals.ioffe.ru/articles/43317>.