

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ УСКОРИТЕЛЯМИ ЭЛВ

*Н. К. Куксанов¹, С. Н. Фадеев, Р. А. Салимов,
Ю. И. Голубенко, Д. А. Когут, А. И. Корчагин,
А. В. Лаврухин, П. И. Немытов, Е. В. Домаров, А. В. Семенов*

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

В работе рассмотрены различные устройства, улучшающие качество облучения на ускорителях ЭЛВ, как то: системы двустороннего, четырехстороннего и кольцевого облучения, а также транспортное устройство и системы визуализации и контроля основных параметров технологического процесса. Описана методика обеспечения высокой степени равномерности распределения линейной мощности дозы облучения.

ELV accelerators are widely used in the world for radiation modification of materials. Questions of the uniform distribution of the absorbed dose are sufficiently relevant and affect the quality and efficiency of electron beam treatment. The paper discusses the various devices that improve the quality of radiation, such as the two-side and the four-side irradiation systems and the ring systems, as well as the synchronization system of the beam current and the speed of the underbeam transport equipment, visualization and control of the key parameters of technological processes. A technique for ensuring the high uniformity of distribution of the linear dose rate irradiation is described.

PACS: 29.27.-a

ВВЕДЕНИЕ

В спектре оборудования, производимого ИЯФ СО РАН, отдельное место занимает производство ускорителей ЭЛВ, компактные размеры и высокие эксплуатационные качества которых позволили ИЯФ СО РАН занять ведущие позиции на рынке промышленных ускорителей как в России, так и за рубежом. Выпускаемые в настоящее время ускорители электронов серии ЭЛВ непрерывного действия на основе высоковольтного выпрямителя перекрывают диапазон по максимальной мощности отдельной машины от 20 до 100 кВт и по энергии ускоренных электронов от 0,3 до 2,5 МэВ, а для экологических и исследовательских целей — до 400 кВт при максимальном токе пучка до 0,5 А [1]. Наиболее широко ускорители ЭЛВ применяются при технологических процессах в промышленности, использующих радиационное сшивание полимерных материалов. Качество такой обработки определяется многими факторами. Так, ускорители должны

¹E-mail: kuskanov47@mail.ru

обеспечивать стабильность параметров электронного пучка: энергию, ток пучка, ширину и однородность зоны облучения и т. д., которые зависят не только от ускорителя, но и от используемого подпучкового оборудования. Поэтому для облучения изоляции проводов в институте разработана и предлагается для потребителей универсальная подпучковая транспортная система (ПТС), транспортирующая кабель под выпускным устройством ускорителя. Современные технологические процессы предъявляют высокие требования к однородности дозы облучения для материалов различных форм и размеров. Например, для улучшения азимутальной однородности поглощенной дозы при облучении кабельной продукции ускорители ЭЛВ оснащаются системой четырехстороннего облучения. Технологические возможности ускорителя также могут быть расширены применением систем двустороннего (используемого при обработке лент) и кольцевого (для модификации труб) облучения.

В настоящее время большое внимание уделяется модернизации и реконструкции существующего, но устаревшего ускорительного оборудования. Примером может служить разработанная для широкого листа методика повышения равномерности распределения поглощенной дозы, а для независимого контроля за производственными процессами облучения — информационная система контроля.

СИСТЕМЫ КОЛЬЦЕВОГО И ДВУСТОРОННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

Система кольцевого облучения предназначена для облучения изоляции силовых проводов большого диаметра (до 50 мм) и толстостенных термоусаживаемых труб. Использование этой системы позволяет устранить зону тени от металлической жилы провода и получить равномерное по азимуту облучение изоляции за один проход провода под пучком. Схематически система кольцевого облучения показана на рис. 1. На рис. *a* цифрой 1

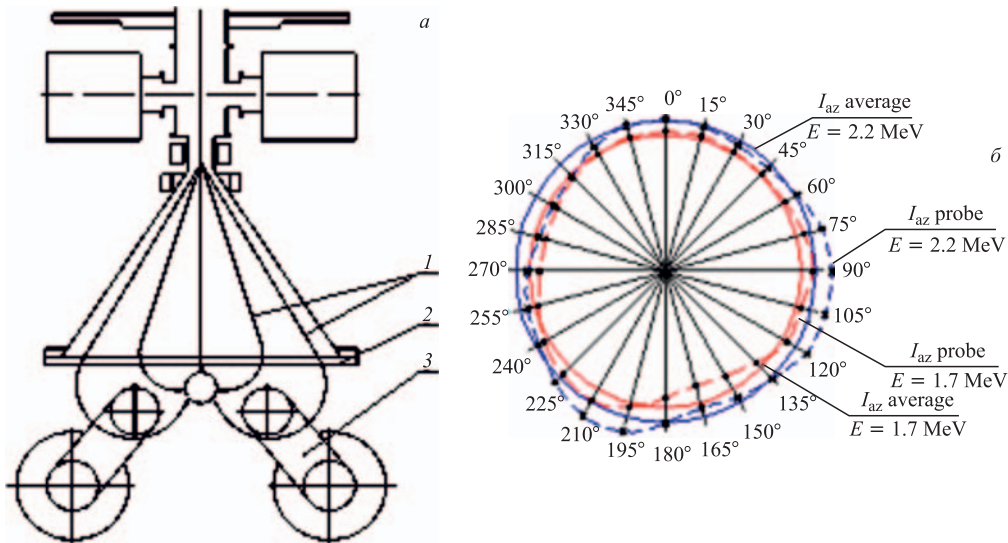


Рис. 1. *a*) Система кольцевого облучения: 1 — траектории электронов; 2 — выпускное окно; 3 — поворотные магниты; *b*) данные реальных измерений равномерности дозы облучения по азимутальной составляющей

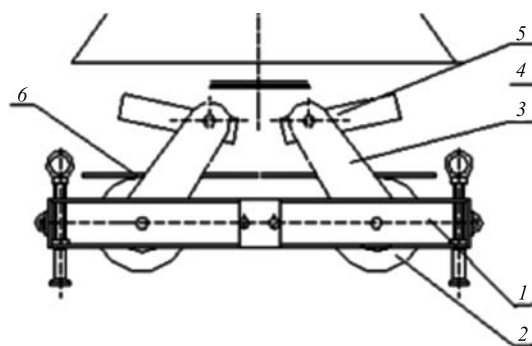


Рис. 2. Двусторонняя система облучения: 1 — основание; 2 — катушки отклоняющих электромагнитов; 3 — сердечник отклоняющих электромагнитов; 4, 5 — полюса; 6 — мишень

обозначены траектории электронов, которые, выйдя из выпускного окна ускорителя 2, попадают в поле электромагнитов 3 с полюсными наконечниками, обеспечивающими поворот траекторий электронов в воздухе, как показано на рисунке. Данная система обеспечивает равномерность дозы по азимуту провода не хуже 15% при эффективности использования пучка 50%.

Изменение формы полюсных наконечников на более протяженные (рис. 2) в направлении вдоль выпускного устройства позволяет получить систему двустороннего облучения. Данная система предназначена для облучения более тонких (до 10 мм наружный диаметр) проводов при многократном прохождении провода под пучком, обеспечивает двустороннее облучение провода (сверху и снизу) при ширине раскладки до 60 см.

Системы эффективно работают при энергии электронов выше 1,2 МэВ [2]. При низких энергиях они также работоспособны, однако снижается коэффициент использования пучка из-за рассеяния электронов в фольге и воздухе. Системы поставляются как дополнительное оборудование к типовой машине и легко устанавливаются и снимаются при смене технологии. Данные системы успешно эксплуатируются совместно с ускорителями ЭЛВ-8 (максимальная энергия 2,5 МэВ) на нескольких кабельных заводах Китая.

СИСТЕМА ЧЕТЫРЕХСТОРОННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

Наибольшую популярность в настоящее время получила система четырехстороннего облучения, позволяющая повысить однородность облучения изоляции проводов. Принцип облучения иллюстрируется рис. 3.

Раскладка кабеля под пучком выполнена так, что на каждом витке верхняя и нижняя поверхности кабеля меняются местами. Если траектории пучков перекрещены под углом 90° , то, учитывая смену поверхностей, получаем после двух проходов кабеля под выпускным окном ускорителя четыре обработанных квадранта кабеля в сечении. Достаточно важно, чтобы кабель проходил через зону облучения несколько раз.

Принцип работы устройства основан на отклонении электронного пучка магнитным полем (рис. 4). Выходящий из ускорителя электронный пучок сканируется в плоскости рисунка электромагнитами развертки 2. Далее он попадает в постоянное поле электромагнитов 4. Это поле изменяет траектории электронов так, что, независимо от места

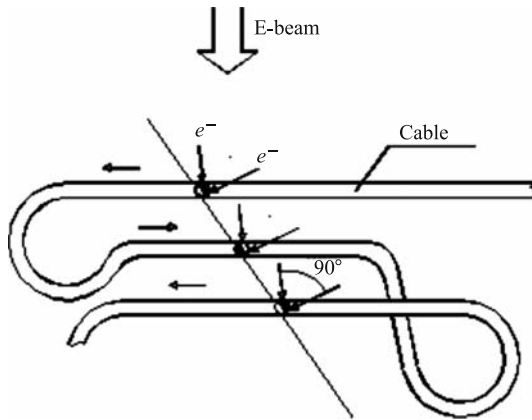


Рис. 3. Принцип работы четырехсторонней системы облучения

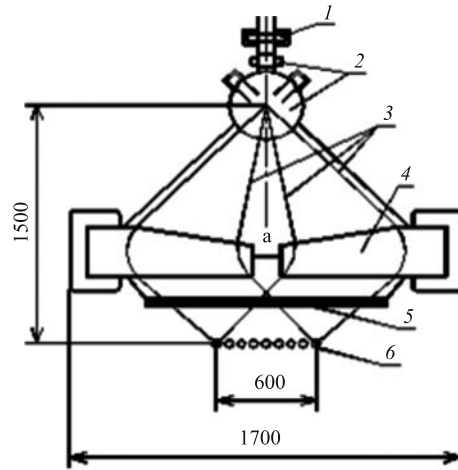


Рис. 4. Схематичный вид устройства четырехстороннего облучения

входа, на выходе все электроны, проходящие левый магнит, имеют угол с вертикальной осью $(-45 \pm 5)^\circ$, а правый, соответственно, $(45 \pm 5)^\circ$. Конфигурация магнитного поля определяется формой полюсов электромагнита. Задача определения формы полюсов для заданных траекторий пучка была решена методами компьютерного моделирования. Поскольку невозможно сформировать магнитное поле, мгновенно меняющее направление, между поворотными магнитами существует область, где конфигурация магнитного поля отлична от необходимой. В этой области, обозначенной «а» на рис. 4, угол выхода электронов будет отличаться от 45° . Наличие таких электронов приводит к снижению равномерности облучения и эффективности использования пучка. Чтобы уменьшить влияние данного эффекта, необходимо уменьшить время прохождения электронным пучком области «а». Для этой цели, наряду с магнитами сканирования, установлен дополнительный переключающий электромагнит 1, позволяющий электронному пучку пересекать зону «а» с большей скоростью и тем самым улучшить и однородность облучения, и эффективность использования пучка. Питание этого магнита синхронизировано с током электромагнитов сканирования. Время переключения составляет около 200 мкс. Тогда, даже при частоте развертки 100 Гц, доля электронов с углами, меньшими, чем 45° , не превышает 4%.

В заключение отметим, что авторы считают, что для успешного внедрения радиационных технологий в промышленность должны создаваться комплексные технологические установки, включающие ускоритель, транспортные устройства, системы контроля качества облучения и т. д. [3].

ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

В ряде промышленных применений возникают и повышенные требования к равномерности распределенной дозы. Примером такого условия является обеспечение неравномерности дозы не более 4% по материалу при модернизации ускорителя, при этом

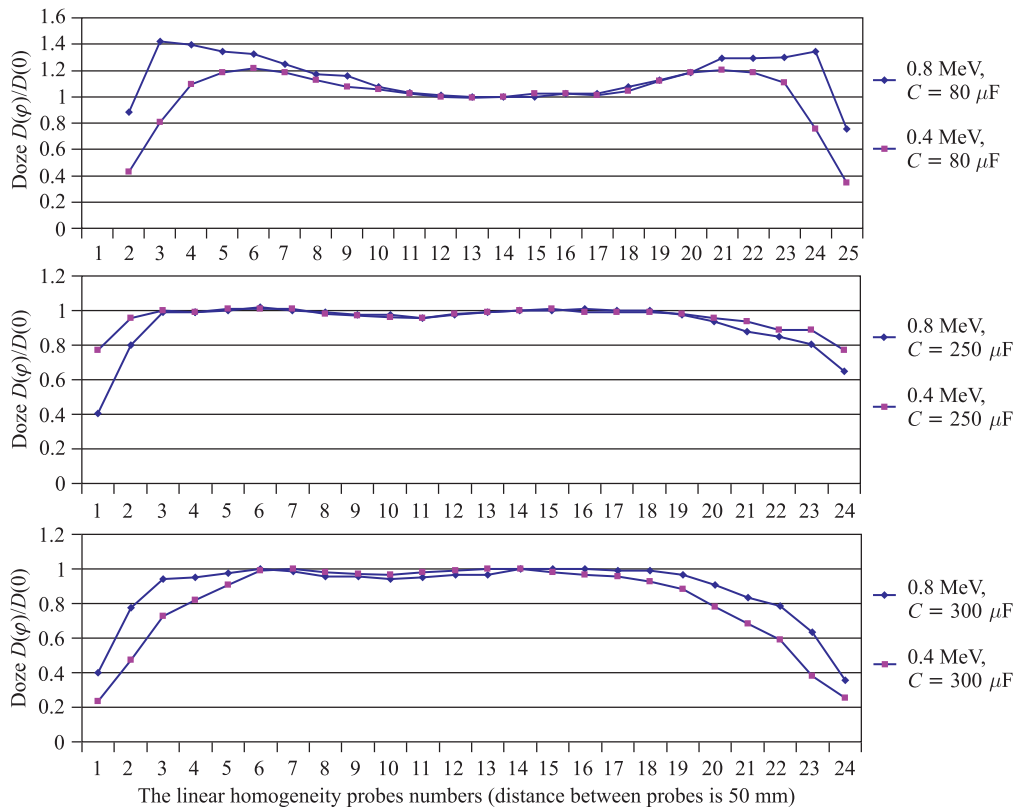


Рис. 5. Зависимость приведенной дозы облучения от энергии и емкости по длине выпускного окна

выпускное устройство ускорителя увеличенной длины оставалось неизменным, смене на современные подлежали только системы сканирования электронного пучка вдоль и поперек выпускного окна раструба [5].

Величина дозы облучения определяется плотностью тока и линейной скоростью сканирования пучка по оси выпускного устройства. Реальные измерения, сделанные для различных энергий, показали, что неравномерность дозы облучения по длине выпускного окна 1800 мм составила $\sim 10\text{--}12\%$.

Так как питающее напряжение электромагнитов сканирования имеет прямоугольную форму и в связи с тем, что соотношение индуктивности и сопротивления обмоток $\omega L/R \approx 35 \gg 1$, ток сканирующей системы имеет симметричную пилообразную форму. Чтобы увеличить значение дозы на краях выпускного устройства, необходимо уменьшить скорость изменения тока на краях выпускного окна. Для этого было предложено включить последовательно со сканирующими катушками конденсаторы, что позволило уменьшить скорость нарастания тока на краях выпускного окна. Данная методика использована при модернизации ускорителя для облучения широкого полиэтиленового листа в марте 2012 г. (рис. 6). Результаты измерения неоднородности облучения при различных параметрах емкости и энергии показаны на рис. 5. В результате удалось достичь неравномерности дозы менее 4%. Предлагаемая простая методика повышения величины дозы



Рис. 6. Модернизация ускорителя «Аврора-5»

на краях выпускного устройства ускорителя (т. е. уменьшения неравномерности дозы) позволила удовлетворить технологическому процессу при использовании существующего оборудования без существенного изменения систем управления сканированием пучка, что в условиях существующего мелкосерийного производства (а в настоящее время установлено и работает более 150 ускорителей ЭЛВ) унифицирует и упрощает поддержку оборудования со стороны поставщика.

ПОДПУЧКОВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА

Основное требование к системе транспортирования кабеля через зону облучения заключается в том, что величина скорости транспортировки должна быть пропорциональна току пучка. Коэффициент пропорциональности, называемый удельной скоростью, зависит от типа облучаемого материала и параметров ускорителя. В институте согласно пожеланиям заказчиков была разработана универсальная подпучковая транспортная система (ПТС) [4]. Институт поставляет ПТС (рис. 7), позволяющую производить облучение пленки, кабеля или трубок. Система может как работать в автономном режиме, так и быть управляемой от ускорителя или, наоборот, управлять ускорителем. Основные ее параметры:

Скорость перемотки, м/мин	20–250
Мощность электродвигателя, кВт	18
Диаметр облучаемых кабельных изделий:	
для жестких кабельных изделий, мм	до 15
для гибких кабельных изделий, мм	до 40
Ширина зоны облучения, мм	800

Система управления ПТС согласует асинхронный двигатель с частотным приводом, вращающий ведущий барабан, с системой управления ускорителем (режим работы от ЭВМ) и обеспечивает работу привода в ручном режиме с пульта дистанционного управления при заправке облучаемого материала. Питание привода осуществляется от преобразователя частоты VECTORFLUX VFX производства «Emotron». Используемый при-

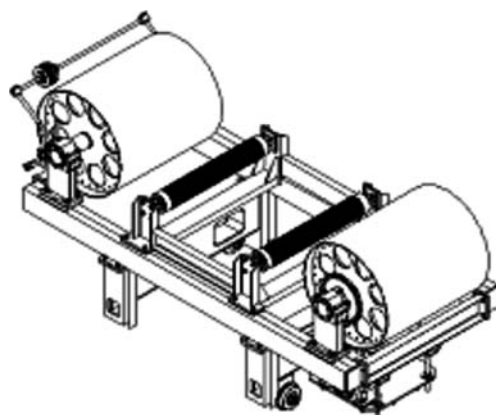


Рис. 7. Общий вид транспортного устройства

вод имеет большой динамический диапазон, т. е. пропорциональность между скоростью протяжки и током пучка сохраняется в большом диапазоне скоростей. Это позволяет осуществлять плавный пуск технологии и отказаться от подвижной мишени. Неравномерность поглощенной дозы при разгоне ПТС от 0 вплоть до 250 м/мин не превышает 5 %.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Высокий уровень автоматизации управления ускорителем и сопутствующим технологическим оборудованием позволяет сократить количество персонала, обслуживающего облучательный комплекс. Для решения этой задачи была разработана и внедрена информационная система по визуализации текущих параметров ускорителя и технологического процесса облучения [6], обеспечивающая:



Рис. 8. Информационное табло

— автоматизацию рабочего места и организацию эффективного использования времени, затрачиваемого на обслуживание технологических линий (приемно-подающих устройств). Практически исчезает необходимость в постоянном присутствии оператора за пультом управления ускорителем;

— эффективную визуализацию процесса облучения на отдельных мониторах, отображающих тип используемого ускорителя, задействованное приемно-подающее устройство, энергию пучка электронов, величину тока пучка скорость подающей линии, а также то, что оставшееся до конца обработки время и количество необработанного материала позволяет операторам транспортной линии контролировать и задавать режим обработки непосредственно на рабочем месте вблизи приемно-отдающих устройств.

— эффективную визуализацию процесса облучения на отдельных мониторах, отображающих тип используемого ускорителя, задействованное приемно-подающее устройство, энергию пучка электронов, величину тока пучка скорость подающей линии, а также то, что оставшееся до конца обработки время и количество необработанного материала позволяет операторам транспортной линии контролировать и задавать режим обработки непосредственно на рабочем месте вблизи приемно-отдающих устройств.

Выпускаемое в настоящее время дополнительное оборудование для семейства ускорителей ЭЛВ позволяет использовать эти ускорители в широком спектре промышленных применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuksanov N. K. et al.* High Power ELV Accelerators for Industries Application // Proc. of RuPAC-2010, Protvino, Russia, 2010.
2. *Фадеев С. Н. и др.* Подпучковое оборудование для расширения технологических возможностей ускорителей ЭЛВ // Сб. докл. X Междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. СПб., 2001. С. 68; Вестн. «Радтех–Евразия». Новосибирск, 2002. С. 8–13.
3. *Бублей А. В. и др.* Усовершенствованный промышленный ускоритель электронов для облучения кабельной изоляции // Кабели и провода. 2004. №4(287). С. 16–19.
4. *Аксамирский П. В. и др.* Система четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий // Электротехника. 1997. №7. С. 46–51.
5. *Kuksanov N. K., Fadeev S. N., Kogut D. A.* The Improving of Uniformity of the Electron-Beam Treatment of Materials by ELV Accelerators // Докл. АН высшей шк. РФ. 2013. №1(20).
6. *Голубенко Ю. И. и др.* Информационное измерительное сопровождение ускорителей электронов ELV и сопутствующего технологического оборудования // ВАНТ. 2012. №3–4.