

# УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

*А.В. Бублей, М.Э. Вейс, Н.К. Куксанов, В.Е. Долгополов, А.В. Лаврухин, П.И. Немытов, Р.А. Салимов,  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Н.И. Громов, В.Г. Ванькин, А.И. Ройх, С.П. Лыщиков, М.Н. Степанов, ЗАОр «НП «Подольсккабель»*

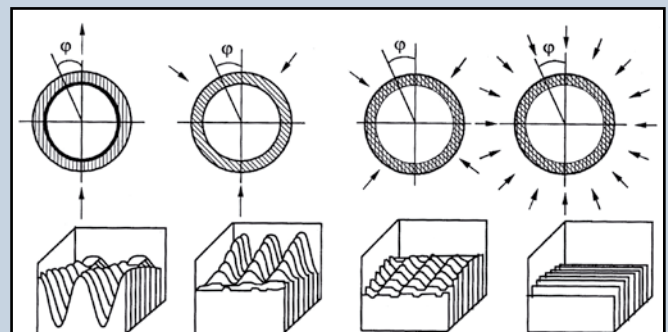
В настоящее время электронно-лучевые технологии широко используются в кабельной промышленности для радиационного сшивания изоляции, выполненной на основе композиций полиэтилена. Использование этих технологий позволило освоить производство широкого ассортимента нагревостойких и радиационно-стойких проводов, кабелей и термоусаживаемых изделий (нагревательных проводов, силовых и судовых кабелей, бортовых авиационных проводов, кабелей и проводов для атомных электростанций и др.). Все они обладают повышенной надежностью при монтаже и эксплуатации, как в обычных, так и в экстремальных условиях.

Наиболее совершенным инструментом для радиационной обработки изоляции кабельной продукции являются мощные промышленные ускорители электронов. Процесс радиационной обработки изоляции кабельных изделий требует применения дорогостоящего оборудования, поэтому задача повышения эффективности его использования является достаточно актуальной. Оптимизируя способ облучения изделий электронным пучком, можно существенно поднять качество облучения и эффективность использования пучка, уменьшить стоимость обработки. Для качественного и эффективного облучения необходимо обеспечить:

- однородность поглощенной дозы по глубине материала и по азимуту изделия,
- эффективность использования энергии электронов,
- эффективность использования тока электронного пучка.

Разработанный Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера усовершенствованный ускоритель электронов для облучения кабельной изоляции (на базе ускорителя типа ЭЛВ), оборудованный системой четырехстороннего облучения, введен в эксплуатацию в ЗАОр «НП «Подольсккабель». Новая система облучения заменила традиционные, ранее применя-

емые системы двухстороннего облучения, что повысило качество выпускаемой продукции и повысило производительность труда. Системы управления ускорителем и линией транспортировки проводов через зону облучения объединены, что позволяет проводить электронно-лучевую обработку проводов и кабельных заготовок в полностью автоматизированном режиме, исключая тем самым человеческий фактор. Ускорители серии ЭЛВ успешно эксплуатируются как на территории бывшего Советского Союза, так и за рубежом. Общее число ускорителей типа ЭЛВ, находящихся в эксплуатации, превышает 80, в том числе 15 ускорителей используются в кабельной и электроизоляционной промышленности. Институтом ядерной физики в свое время была предложена схема четырехстороннего облучения [1], позволяющая резко повысить эффективность подпучкового оборудования и расширить возможность ускорителя электронов в целом. Однако предложенная схема не была реализована на практике до последнего времени, пока к реализации идеи не подключилось ЗАОр «НП «Подольсккабель». Следует отметить, что ЗАОр «НП «Подольсккабель» шел



**Рис. 1.** Расчетное распределение поглощенной дозы в изоляции кабеля по азимуту и глубине при двухстороннем, трехстороннем, четырехстороннем и круговом облучении

даже на определенный риск, связанный, во-первых, с тем, что ни на одном из ускорителей в мире подобное устройство не работало, а во-вторых, с высокой загрузкой ускорителей и необходимостью проведения работ в сжатые сроки для выполнения производственных заказов электронно-лучевой обработки кабельных заготовок. Оправданием этого риска являлись те преимущества, которые реализуются в схеме четырехстороннего облучения не только для существующей номенклатуры кабельных изделий, но и для новых типов кабелей для атомных станций, добычи нефти и т.д.

Основным способом облучения кабельной продукции во всем мире в настоящее время является двухстороннее облучение. При этом способе не существует эффекта тени от токопроводящей жилы, однако существуют участки изоляции, толщина которых в направлении распространения пучка существенно меньше необходимой длины пробега электронов. При этом часть электронов отражается от токопроводящей жилы в обратном направлении, что ведет к локальному переоблучению материала. Помимо этого, при облучении боковой поверхности из-за рассеяния часть электронов покидает облучаемый слой, увеличивая тем самым азимутальную неоднородность.

На рис. 1 показано расчетное распределение поглощенной дозы по азимуту и глубине в зависимости от способа облучения, приведенное в [2].

Отсюда следует, что четырехсторонняя система облучения позволяет совместить высокое качество облучения с высокой эффективностью использования пучка и, с нашей точки зрения, является оптимальной для обработки кабельных изделий и проводов с наружным диаметром до нескольких десятков миллиметров. Для четырехстороннего облучения при заданной толщине изоляции (в зависимости от наружного диаметра провода, а особенно для проводов большого сечения) требуемая глубина проникновения электронов в 2-4 раза меньше, чем для двухстороннего облучения, что приводит к уменьшению необходимой энергии электронов в 1,5-2,5 раза. Это существенно упрощает и удешевляет используемый ускоритель. В случае четырехсторонней схемы облучения, при оптимально подобранной энергии электронов, основная часть их энергии по-

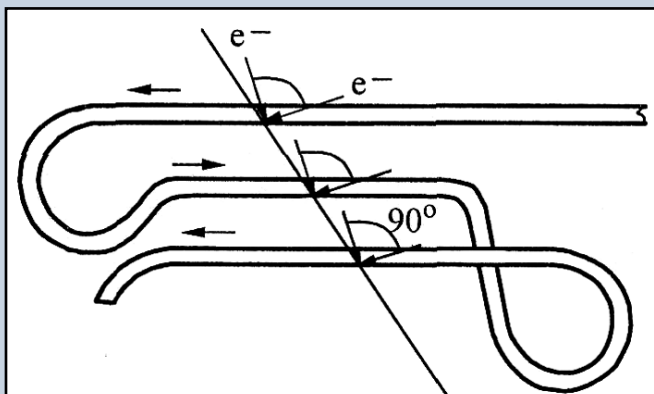


Рис. 2. Организация четырехстороннего облучения

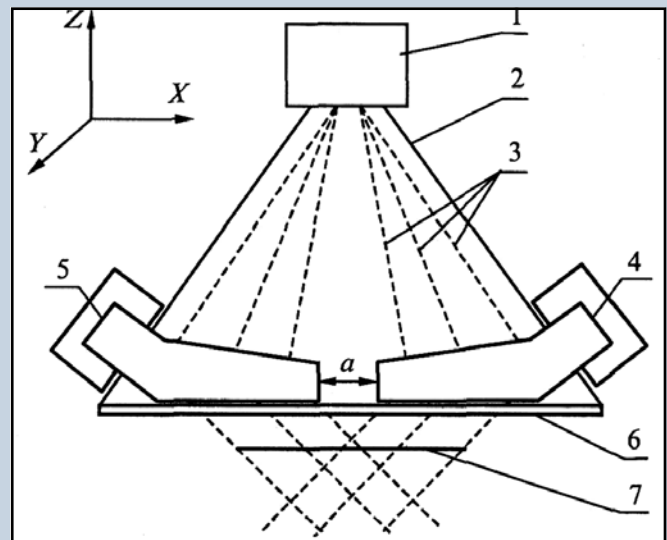


Рис. 3. Схематический вид устройства для четырехстороннего облучения:

- 1 – магниты сканирования с переключающим магнитом,
- 2 – выпускное устройство,
- 3 – траектории электронов,
- 4 – правый поворотный магнит,
- 5 – левый поворотный магнит,
- 6 – выпускное окно,
- 7 – зона облучения.

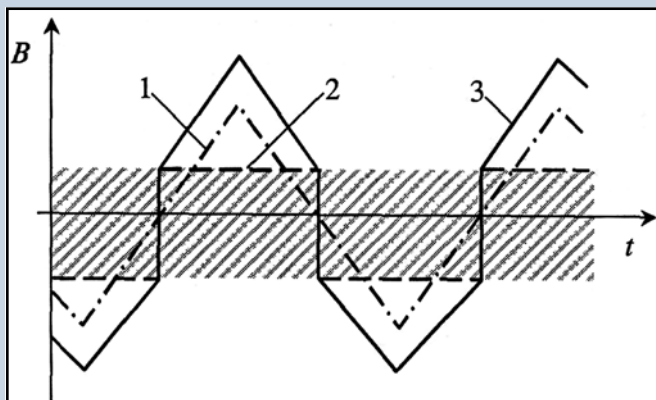
лощается в толще изоляции и отражение практически отсутствует.

Рис. 2 иллюстрирует способ четырехстороннего облучения. Раскладка кабеля под пучком выполнена так, что на каждом витке верхняя и нижняя поверхность кабеля меняются местами. Если траектории пучков перекрещены под углом  $90^\circ$ , то, с учетом смены поверхностей, достигается четырехстороннее облучение. Достаточно важно, чтобы кабель проходил через зону облучения несколько раз. Заправка кабеля не обязательно должна быть плоской, как это изображено на рис. 2, приемлемой является и традиционная «восьмерка».

Схема устройства для вывода в атмосферу двух взаимно перпендикулярных скрещенных пучков показана на рис. 3 [1].

Принцип работы устройства основан на отклонении электронного пучка магнитным полем. Выходящий из ускорителя электронный пучок сканируется в плоскости рисунка электромагнитами развертки 1. Далее он попадает в постоянное поле поворотных электромагнитов 4, 5. Это поле изменяет траектории электронов так, что, независимо от угла отклонения в развертке, все электроны, проходящие через левый магнит, имеют угол с вертикальной осью  $-45^\circ \pm 5^\circ$ , а через правый, соответственно,  $45^\circ \pm 5^\circ$ . Конфигурация магнитного поля определяется формой полюсов электромагнита. Задача определения формы полюсов для заданных траекторий пучка была решена методами компьютерного моделирования с использованием программы «MER MAID».

Поскольку невозможно сформировать магнитное поле, мгновенно меняющее направление, между поворотными магнитами 4 и 5, существует об-



**Рис. 4.** Форма токов в обмотках сканирующего и переключающего электромагнитов:  
 1 – ток сканирующего электромагнита,  
 2 – ток переключающего электромагнита,  
 3 – суммарный угол отклонения.

ласть, где конфигурация магнитного поля отлична от необходимой. В этой области, обозначенной  $a$ , на рис. 3, угол выхода электронов будет отличаться от  $45^\circ$ . Наличие таких электронов приводит к снижению равномерности облучения и эффективности использования пучка. Поле поворотных магнитов в этом месте имеет структуру квадруполья и, если поворот частиц в плоскости  $X, Z$  соответствует фокусировке, то движение в плоскости  $Y, Z$  является дефокусирующим. Поэтому электроны, отклонившиеся в сканирующем электромагните на угол менее  $8^\circ$ , попадают на стенки камеры выпускного устройства. Если не предпринимать никаких мер, то потери пучка составили бы 15%, что является недопустимым, даже не принимая во внимание чрезмерного нагрева выпускного устройства. Поэтому пучок должен проходить указанную область максимально быстро.

Для этой цели, наряду с магнитами сканирования, установлен дополнительный переключающий электромагнит 1, позволяющий электронному пучку пересекать зону  $a$  с большей скоростью и тем самым как улучшить однородность облучения и эффективность использования пучка, так и устранить перегрев выпускного устройства. Ток в обмотке переключающего магнита имеет прямоугольную форму, причем момент переключения (изменение полярности тока в обмотке) синхронизован с током сканирования в продольном направлении (низкочастотная развертка), как показано на рис. 4.

Оптимизацией формы и размеров полюсов электромагнита, сканирующего в продольном направлении, сведена к минимуму и неравномерность ширины раstra вдоль выпускного окна. Поэтому предельная величина выводимого тока осталась такой же, как и в обычном выпускном устройстве и составляет 70–100 мА на метр длины титановой фольги шириной 75 мм и толщиной 50 микрон.

По габаритным размерам устройство для четырехстороннего облучения незначительно отличается от стандартного выпускного устройства с ли-

нейной разверткой и может легко устанавливаться вместо него. При выключении поворотных и переключающего магнитов система начинает работать в режиме обычной линейной развертки. Этим обеспечивается универсальность устройства, а конкретно – возможность обработки более широкого ассортимента изделий. Кроме того, возможен режим компенсации выходных углов электронного пучка. При этом электроны во всех точках выходят из выпускного окна под углом  $\pm 7^\circ$  к вертикали, что актуально для облучения пленочных изделий.

Поворотные магниты расположены в непосредственной близости от зоны облучения, где генерируется большое количество озона, тормозного излучения и появляются рассеянные или отраженные электроны. В конструкции поворотных магнитов предусмотрены меры, уменьшающие воздействие указанных агрессивных факторов, как-то: замоноличенные обмотки, использование элементов из нержавеющей стали, покраска полюсов, выполненных из магнитомягкого материала, экранирование всего устройства от отраженных и рассеянных электронов. Дополнительно в клеммные коробки, коробку со сканирующими электромагнитами, кабельные подводы подается сжатый воздух.

Настройка устройства заключается в юстировке раstra в выпускном окне, определении зоны переброса пучка (величины тока переключающего магнита), определении выходного угла электронов, установке размера зоны облучения. Указанные измерения достаточно сделать на одной определенной энергии электронов в рабочем диапазоне ускорителя. Управляющая программа автоматически (без участия оператора) будет устанавливать требуемые значения токов в обмотках при изменении режима работы ускорителя. Она же в процессе работы следит, чтобы эти параметры лежали в допустимых пределах. Одновременно с установкой системы четырехстороннего облучения была модернизирована и технологическая линия. Ее система управления сопряжена с системой управления ускорителем, так что облучение ведется в полностью автоматическом режиме.

До начала эксплуатации были проведены специальные тесты для измерения азимутальной неоднородности поглощенной дозы при четырехстороннем облучении в сравнении с двухсторонним. Показано, что эта неоднородность заметно ниже, чем при двухстороннем облучении и степень облучения значительно равномернее. Для определенных изделий азимутальная неоднородность не превышает  $\pm 5\%$ . В таблице приведены данные сравнительной оценки содержания гель-фракции в изоляции кабельных изделий при двухстороннем и четырехстороннем облучении.

Из таблицы следует, что четырехстороннее облучение обеспечивает значительно большую равномерность содержания гель-фракции (степени сшивки) по секторам сечения изоляции кабельного изделия.

Отмечено также увеличение производительности обработки. В зависимости от типа облучаемых

**Сравнительные данные по содержанию гель-фракции в изоляции кабельных изделий после двухстороннего и четырехстороннего облучения**

Сечение токопроводящей жилы кабельного изделия, мм <sup>2</sup>	Материал изоляции	Содержание гель-фракции по секторам, %					Среднее значение содержания гель-фракции, %
		Норма	1 сектор	2 сектор	3 сектор	4 сектор	
<b>двухстороннее облучение</b>							
16	Полиэтилен ПЭ 271-70К	30-70	54,8	7,1	56,6	75,0	48,3
16	То же		55,5	22,4	59,1	68,6	51,4
16	То же		66,5	73,3	57,5	54,0	62,8
16	То же	30-65	49,9	70,6	69,8	54,3	61,1
<b>четырёхстороннее облучение</b>							
16	Полиэтилен ПЭ 271-70К	30-70	70,0	68,2	73,1	73,4	71,1
16	То же		73,4	65,9	68,4	73,1	70,2
16	То же		67,1	70,2	67,6	67,3	68,0
16	То же		71,7	70,5	76,2	76,4	73,7

изделий эта величина варьируется в пределах от 20% до 2 раз, то есть при фиксированном токе пучка может быть увеличена скорость обработки, либо уменьшен ток пучка (мощность ускорителя), если скорость обработки достигла максимального значения. Необходимо отметить, что основные преимущества четырехстороннего облучения особенно наглядно проявляются при облучении изделий большого диаметра, например, заготовки нефтепогружного кабеля, оболочек кабеля для атомных станций, но даже при малых диаметрах оно дает выигрыш в производительности.

В настоящее время ведется штатная эксплуатация устройства, показанного на рис. 5.

В заключение еще раз отметим основные преимущества описанной системы.

Разработанная система четырехстороннего облучения кабельной продукции, позволяет без заметного изменения стоимости установки радиационной обработки и без ее конструктивного усложнения существенно улучшить качество облучения: снижает неоднородность распределения поглощенной дозы в изоляции обрабатываемого изделия и возрастает эффективность обработки.



Рис. 5. Кабельное изделие в зоне облучения

Ширина зоны облучения (до 1 м) существенно больше, чем в любом из известных вариантов установок четырехстороннего облучения. При равных скоростях протяжки, при увеличении ширины раскладки, полная доза облучения набирается за более короткий промежуток времени. Это уменьшает тепловую и радиационную нагрузки на облучаемое изделие и, следовательно, повышает качество облучаемых изделий.

Устройство может работать в режиме как четырехстороннего облучения, так и в режиме линейной развертки. Дополнительно имеется возможность формировать вертикально выходящий пучок для облучения пленочных изделий.

Обслуживание системы является достаточно простым, существует набор процедур, позволяющих проверять ее работоспособность в процессе текущей эксплуатации.

Разработанная система четырехстороннего облучения может использоваться с любыми промышленными ускорителями электронов как непрерывного, так и импульсного действия. Опыт эксплуатации системы четырехстороннего облучения на ЗАО «НП «Подольсккабель» показывает, что ее можно использовать не только на вновь создаваемых установках, но и для модернизации ранее изготовленных с целью повышения качества и производительности выпускаемой кабельной продукции.

ЛИТЕРАТУРА



1. Аксамирский П.В., Куксанов Н.К., Малинин А.Б., Немытов П.И., Салимов Р.А. Система четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий. Электротехника. 1997, № 7, с. 46-51

2. R.A. Salimov, V.G. Cherepkov, J.I. Golubenko, G.S. Krainov, B.M. Korabelnikov, S.A. Kuznetsov, N.K. Kuksanov, A.B. Malinin, P.I. Nemytov, S.E. Petrov, V.V. Prudnikov, S.N. Fadeev and M.E. Veis. D.C. high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications. Radiation Physics and Chemistry 57 (2000) 661-665.