

Применение ускорителей серии ЭЛВ в радиационно-технологических процессах

**М.Э.ВЕЙС, Ю.И.ГОЛУБЕНКО, Н.К.КУКСАНОВ,
П.И.НЕМЫТОВ, В.В.ПРУДНИКОВ, Р.А.САЛИМОВ,
С.Н.ФАДЕЕВ, В.Г.ЧЕРЕПКОВ**
Институт ядерной физики им Г.И.Будкера СО РАН

Начиная с 1971 г. в Институте ядерной физики СО РАН разрабатываются и производятся ускорители электронов серии ЭЛВ, предназначенные для применения в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках. Конструктивные и схемные решения этих ускорителей предусматривают длительную непрерывную и круглосуточную работу ускорителей в условиях промышленного производства. Отличительными качествами ускорителей ЭЛВ являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность в работе.

Институт предлагает к реализации серию ускорителей электронов типа ЭЛВ, которые перекрывают диапазон энергий от 0,2 до 2,5 МэВ, с током пучка ускоренных электронов до 400 мА и максимальной мощностью до 400 кВт. Основные параметры ускорителей приведены в табл. 1.

Ускорители серии ЭЛВ – наиболее массовый тип отечественных ускорителей, нашедших практическое применение во многих областях радиационной химии, давших толчок развитию радиационно-термических технологий благодаря со-

зданию системы выпуска в атмосферу мощного сфокусированного электронного пучка. Большая мощность электронного пучка обеспечивает высокую производительность электронно-лучевой обработки, а высокая эффективность преобразования электрической энергии в энергию ускоренных электронов снижает затраты на обработку.

По своим параметрам ускорители ЭЛВ не только не уступают лучшим мировым образцам, но во многом превосходят их. Поэтому ИЯФ СО РАН традиционно занимает ведущие позиции среди мировых фирм – производителей ускорителей электронов. Многие компании, использовавшие ранее другие ускорители, в настоящее время приобретают ускорители серии ЭЛВ. Так, в Южной Корее на крупном кабельном заводе рядом с ранее установленными японскими ускорителями работают ускорители серии ЭЛВ. Такие же совместные установки имеются и в Китае. Как специалисты Кореи и Китая, так и наши специалисты имеют возможность сравнить работоспособность ускорителей, созданных разными производителями. В Китае даже создана ассоциация пользователей ускорителей ЭЛВ.

К настоящему времени как внутри страны, так и за рубежом поставлено более 80 ускорителей этой серии, а их суммарная наработка превышает 600 ускорителе-лет.

В табл. 2 представлены основные направления применения ускорителей серии ЭЛВ.

Таблица 1
Основные параметры ускорителей серии ЭЛВ

Ускоритель	Диапазон энергий, МэВ	Мощность в пучке, кВт	Максимальный ток пучка, мА
ЭЛВ-мини	0,2–0,4	20	50
ЭЛВ-0,5	0,4–0,7	25	40
ЭЛВ-1	0,4–0,8	25	40
ЭЛВ-2	0,8–1,5	20	25
ЭЛВ-3	0,5–0,7	50	100
ЭЛВ-4	1,0–1,5	50	40
ЭЛВ-6	0,8–1,2	100	100
ЭЛВ-6М	0,75–1,0	160	200
ЭЛВ-8	1,0–2,5	90	50
ЭЛВ-12	0,6–1,0	400	400

Таблица 2
География поставок и области использования ускорителей серии ЭЛВ

Тип технологии	Страна-покупатель	Количество ускорителей
Модифицирование полимерных изделий		
Модифицирование полиэтиленовой изоляции для производства термостойких проводов и кабелей сечением 0,5–120 мм ² (производительность до 400 м/мин)	Россия	7
	Белоруссия	5
	Украина	5
	Чехия	1
	Китай	12
Производство термоусаживаемых трубок, пленок и лент (производительность до 1000 кг/ч)	Ю. Корея	6
	Россия	3
	Молдавия	2
	Китай	5
Производство искусственных кож и резинотехнических изделий (производительность до 1000 м ² /ч)	Ю. Корея	1
	Россия	4
Производство препрега и геля	Россия	2
Отверждение лакокрасочных покрытий на различных основах для стройиндустрии (производительность до 500 м ² /ч)	Россия	2
	Казахстан	1
	Узбекистан	1
Технологии для экологических целей		
Обработка сточных вод	Россия	4
	Ю. Корея	1
Очистка отходящих газов тепловых станций от оксидов серы и азота (производительность до 20 000 м ³ /ч)	Россия	1
	Польша	2
	Япония	2
	Украина	1
Другие применения		
Поверхностная наплавка и закалка металлов, производство катализатора синтеза аммиака и спецкерамики, развитие высокотемпературных химических технологий	Россия	4
	Украина	1
Дезинсекция зерна (производительность до 200 т/ч)	Россия	1
	Украина	2
Исследовательские цели	Россия	5
	Болгария	1
	Германия	1
	Ю. Корея	3

Ускорители серии ЭЛВ являются ускорителями прямого действия. Общий вид ускорителя с фольговым выпуском пучка в атмосферу показан на рис. 1. В качестве источника ускоряющего напряжения в этих устройствах используется каскадный генератор с параллельной индуктивной связью. Первичная обмотка генератора, высоковольтный выпрямитель, а также ускорительная трубка помещены в герметичный сосуд, заполняемый электроизолирующим газом под давлением в несколько атмосфер. Вследствие такой компоновки, а также благодаря удачным конструктивным решениям ЭЛВ являются наиболее компактными в своем классе ускорителей.

Эмиссия электронов производится катодом, расположенным в верхней части ускорительной трубки. Пройдя полную разность потенциалов, приложенную к ускорительной трубке, электроны приобретают энергию, равную напряжению высоковольтного выпрямителя. Далее они попадают в выпускное устройство, где с помощью электромагнитов развертки равномерно распределяются по фольге, отделяющей вакуумную систему ускорителя от атмосферы. Традиционное устройство для вывода пучка в атмосферу через фольгу показано на рис. 2. С помощью электромагнитов электронный пучок сканирует по фольге в двух взаимно перпенди-

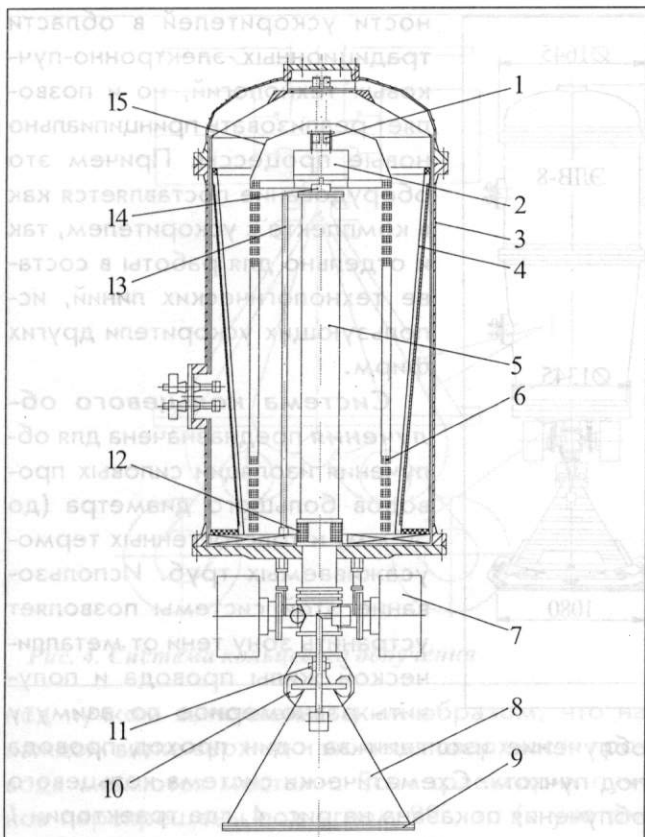


Рис. 1. Общий вид ускорителя серии ЭЛВ: 1 и 2 – оптические каналы и блок управления инжектором; 3 – сосуд; 4 – первичная обмотка; 5 – ускорительная трубка; 6 – выпрямительные секции; 7 – ионные вакуумные насосы; 8 – выпускное устройство; 9 – рамка выпускного окна с титановой фольгой; 10 и 11 – электромагниты сканирования пучка; 12 – магнитная линза; 13 – делитель энергии; 14 – инжектор электронов; 15 – высоковольтный электрод

кулярных направлениях, благодаря чему фольга полностью заполняется. Охлаждается она высокоскоростной воздушной струей. Средняя плотность тока на фольге не превышает $0,1 \text{ mA/cm}^2$, а максимальная величина выводимого тока – 70 mA/m длины фольги, что примерно вдвое меньше, чем максимально допустимое значение плотности тока на фольге для используемой скорости струи. Двукратный запас по плотности тока через фольгу обеспечивает практически неограниченный срок ее службы.

Для снижения габаритов питание ускорителя ЭЛВ осуществляется от электромашинного преобразователя частоты либо от статического инвертора повышенной частоты. В первом случае КПД ускорителя составляет 65–70%. Использование транзисторного преобразователя позволяет поднять эффективность преобразования электрической энергии в энергию электронного пучка до 85–90%.

Ускорители ЭЛВ стабильны в работе. Неустойчивость энергии и тока пучка не превышают $\pm 2\%$.

Система управления промышленным ускорителем в значительной степени определяет его эксплуатационные характеристики. Она включает в себя комплекс аппаратных и программных средств, охватывающий все узлы ускорителя, требующие оперативного управления, контроля и диагностики. Многофункциональность системы управления позволяет:

- автоматизировать процесс управления ускорителем. Алгоритмы, заложенные в программу управления ускорителем, выполняют задачи подготовки ускорителя и технологического оборудования к работе, следят за состоянием блокировок, после включения ускорителя выводят на заданный режим энергию и ток электронного пучка;

- надежно стабилизировать основные параметры электронного пучка (энергию электронов, ток пучка, размер и положение раstra на фольге выпускного окна), что обеспечивает высокое качество радиационной обработки;

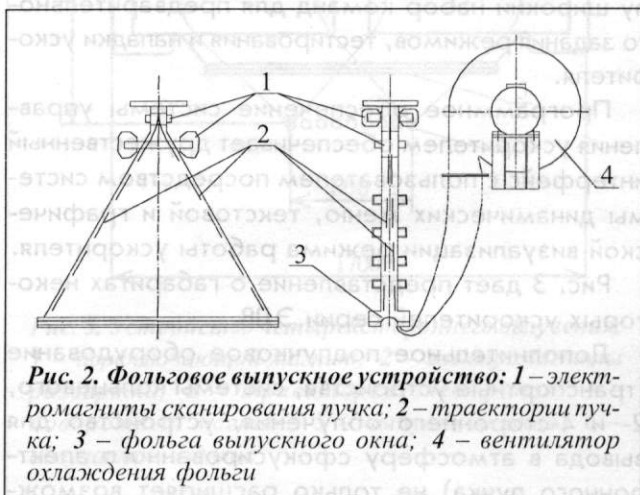


Рис. 2. Фольговое выпускное устройство: 1 – электромагниты сканирования пучка; 2 – траектории пучка; 3 – фольга выпускного окна; 4 – вентилятор охлаждения фольги

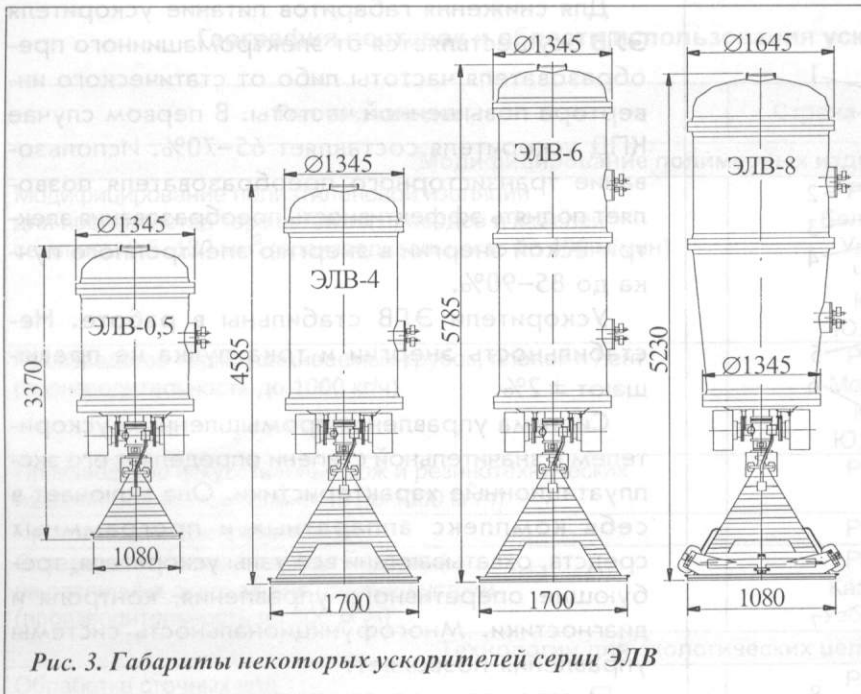


Рис. 3. Габариты некоторых ускорителей серии ЭЛВ

□ обеспечить в процессе работы ускорителя непрерывную диагностику высоковольтного выпрямителя и самотестирование других систем ускорителя;

□ синхронизировать работу ускорителя и технологического оборудования, при этом возможна эксплуатация ускорителя в составе технологической линии в полностью автоматизированном режиме, т.е. без участия оператора. Именно такие режимы и используются на поставленных в последнее время ускорителях;

□ предоставить обслуживающему персоналу широкий набор команд для предварительного задания режимов, тестирования и наладки ускорителя.

Программное обеспечение системы управления ускорителем обеспечивает дружественный интерфейс с пользователем посредством системы динамических меню, текстовой и графической визуализации режима работы ускорителя.

Рис. 3 дает представление о габаритах некоторых ускорителей серии ЭЛВ.

Дополнительное подпучковое оборудование (транспортные устройства, системы кольцевого, 2- и 4-стороннего облучения, устройство для вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка) не только расширяет возмож-

ности ускорителей в области традиционных электронно-пучковых технологий, но и позволяет реализовать принципиально новые процессы. Причем это оборудование поставляется как в комплекте с ускорителем, так и отдельно для работы в составе технологических линий, использующих ускорители других фирм.

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. 4, где траектории 1 электронов, выйдя из выпускного окна ускорителя 2, попадают в поле электромагнитов 3 с полюсными наконечниками, обеспечивающими поворот траекторий электронов в воздухе (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 в направлении вдоль выпускного устройства позволяет получить систему, предназначенную для облучения более тонких (наружный диаметр до 19 мм) проводов при многократном их прохождении под пучком, что обеспечивает двухстороннее облучение проводов (сверху и снизу) при ширине раскладки до 60 см.

Описанные устройства успешно эксплуатируются вместе с ускорителями ЭЛВ-8 (максимальная энергия 2,5 МэВ) на нескольких кабельных заводах Китая.

Система четырехстороннего облучения применяется для повышения однородности облучения изоляции проводов. Раскладка провода

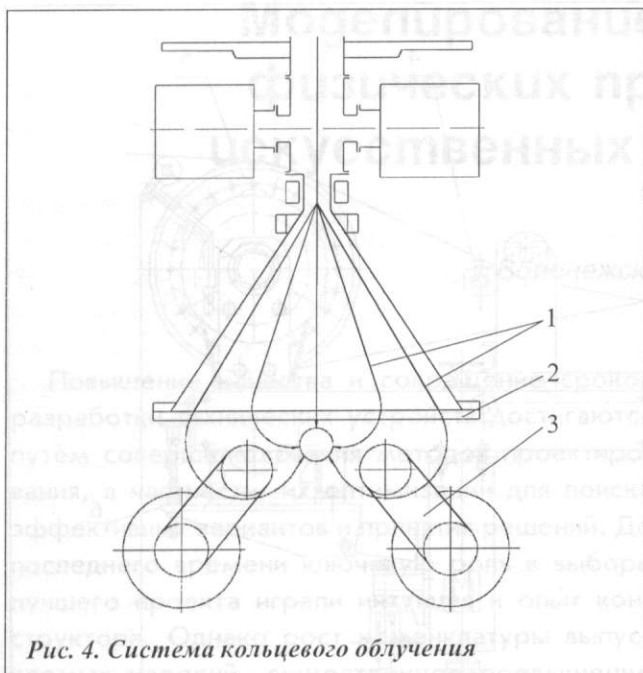


Рис. 4. Система кольцевого облучения

под пучком выполнена таким образом, что на каждом витке верхняя и нижняя поверхности провода меняются местами. Если траектории пучков перекрещены под углом 90° , то (с учетом смены поверхностей) в итоге получается четырехстороннее облучение изделия.

В подтверждение достоинств такого способа облучения отметим, что ведущие западные фирмы, применяющие электронно-пучковые технологии, используют в одной установке два ускорителя электронов, пучки которых пересекаются под углом 90° .

Установка двух ускорителей, да еще и с поворотом пучка, существенно увеличивает стоимость и сложность технологического комплекса. Для реализации 4-стороннего облучения на одном ускорителе серии ЭЛВ в ИЯФ СО РАН разработаны два варианта системы такого облучения (схема одного из вариантов показана на рис. 5).

Принцип работы устройства основан на отклонении электронного пучка магнитным полем. 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 входа) на выходе все электроны, прохо-

дящие левый магнит, имеют угол с вертикальной осью $-45^\circ \pm 5^\circ$, а правый – соответственно $45^\circ \pm 5^\circ$.

Конфигурация магнитного поля определяется формой полюсов электромагнита. Эта задача 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 отличается от необходимой. В этой области (*a* на рис. 5) 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 *a*. Для этой цели, наряду с магнитами сканирования, установлен дополнительный переключающий электромагнит 1, позволяющий электронному пучку пересекать зону *a* с большей скоростью, тем самым улучшить и однородность облучения, и эффективность использования пучка. Питание этого магнита син-

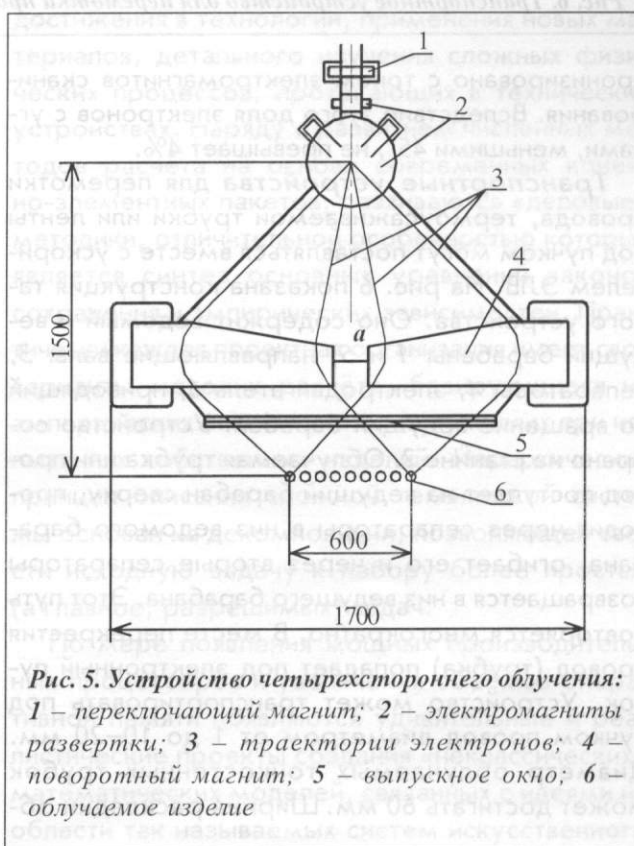


Рис. 5. Устройство четырехстороннего облучения: 1 – переключающий магнит; 2 – электромагниты развертки; 3 – траектории электронов; 4 – поворотный магнит; 5 – выпускное окно; 6 – облучаемое изделие

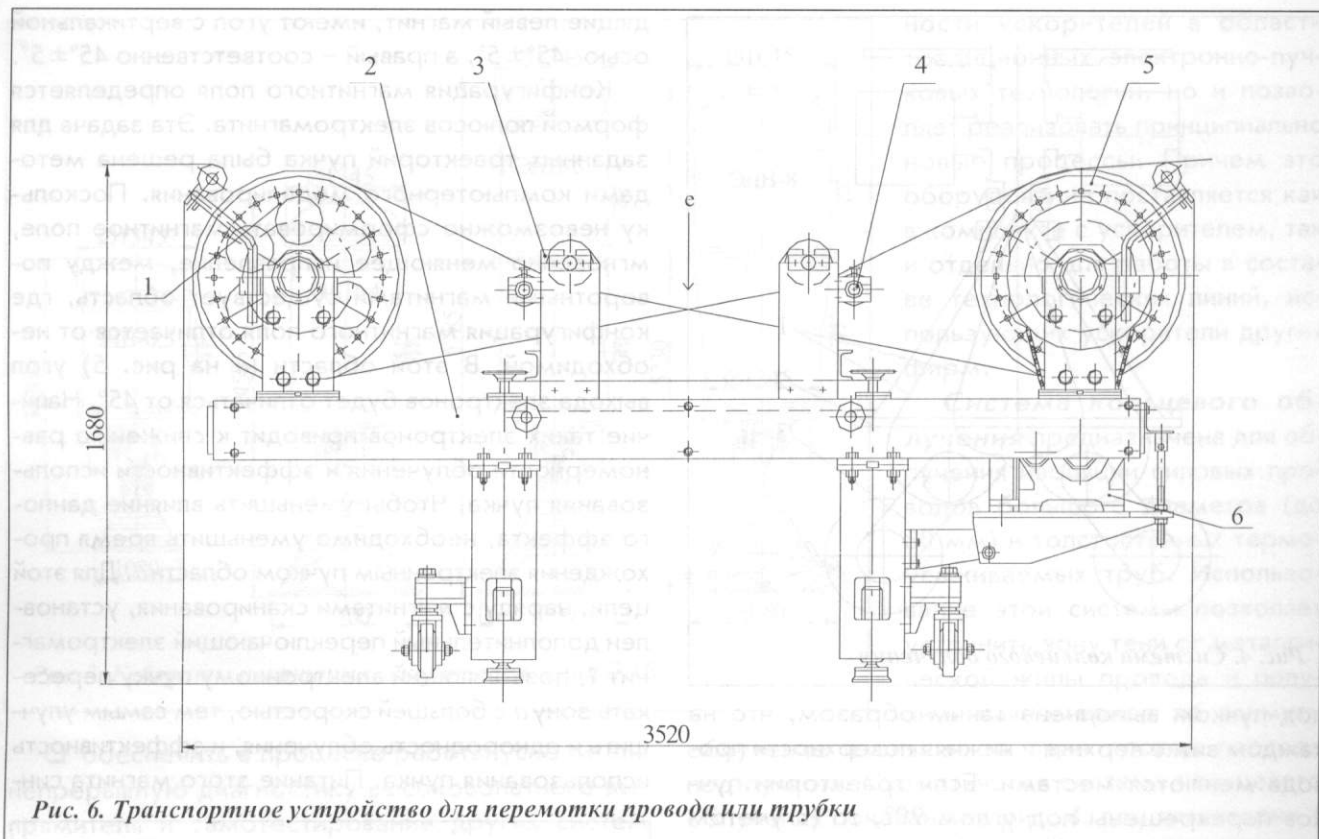


Рис. 6. Транспортное устройство для перемотки провода или трубки

хронизировано с током электромагнитов сканирования. Вследствие этого доля электронов с углами, меньшими 45° , не превышает 4%.

Транспортные устройства для перемотки провода, термоусаживаемой трубки или ленты под пучком могут поставляться вместе с ускорителем ЭЛВ. На рис. 6 показана конструкция такого устройства. Оно содержит ведомый и ведущий барабаны 1 и 5, направляющие валы 3, сепараторы 4, электродвигатель 6, приводящий во вращение ведущий барабан. Устройство собрано на станине 2. Облучаемая трубка или провод поступает на ведущий барабан сверху, проходит через сепараторы в низ ведомого барабана, огибает его и через вторые сепараторы возвращается в низ ведущего барабана. Этот путь повторяется многократно. В месте перекрестия провод (трубка) попадает под электронный пучок. Устройство может транспортировать под пучком провод диаметром от 1 до 10–20 мм. Диаметр облучаемых тонкостенных трубок может достигать 60 мм. Ширина раскладки об-

лучаемого материала под пучком достигает 1200 мм. Шаг раскладки определяется переключаемыми сепараторами. Максимальная скорость транспортного устройства 400 м/мин. При облучении тонких проводов или трубок и мощности ускорителя около 100 кВт такая скорость обеспечивает суточную производительность в несколько сотен километров.

Высокомоментный двигатель постоянного тока вместе с системой управления обеспечивает диапазон регулирования скорости до 10^4 , что позволяет соблюдать постоянство дозы при пуске ускорителя, его останове и при любых случайных флуктуациях тока пучка. Принятая схема транспортировки (повернутая «восьмерка») обеспечивает двухстороннее облучение.

Для успешного внедрения радиационных технологий в промышленность в будущем должны создаваться комплексные технологические установки, включающие в себя как собственно ускоритель, так и транспортные устройства, системы контроля качества облучения и т.д.