

**В. Л. Ауслендер, В. В. Безуглов, А. А. Брызгин, Л. А. Воронин, В. А. Горбунов,
М. В. Коробейников, В. Е. Нехаев, А. Д. Панфилов, В. С. Подобаев, В. О. Ткаченко,
А. А. Тувик, Б. Л. Факторович**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: A. L. Auslender@inp.nsk.su

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ СЕРИИ ИЛУ ПРОИЗВОДСТВА ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. БУДКЕРА

В статье описаны промышленные импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ. Приведено описание принципов действия, основных параметров и конструкции, и а также систем выпуска пучка и другого оборудования, применяемого для реализации различных радиационно-технологических процессов.

Введение

Начиная с 1970 г. Институт ядерной физики СО РАН разрабатывает, производит и поставляет импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ. Эти ускорители десятилетиями работают в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках в нашей стране и за рубежом. Конструктивные и схемные решения ускорителей предусматривают длительную непрерывную и круглосуточную работу ускорителей в условиях промышленного производства.

В линейных ускорителях заряженных частиц электроны (или другие заряженные частицы) ускоряются в вакууме вдоль оси ускорителя продольно направленным электрическим полем.

В линейных ускорителях прямого действия (примером которых являются производимые в ИЯФ ускорители типа ЭЛВ [1]) ускоряющее электрическое поле создается разностью постоянных потенциалов между катодом и анодным электродом. Для вывода пучка из ускорителя анод должен находиться под потенциалом земли, поэтому в ускорителях прямого действия катод находится под напряжением, равным энергии ускоренных электронов. При энергии 2,5 МэВ на катоде будет напряжение 2,5 МВ, и конструкция ускорителя прямого действия должна обеспечивать электрическую изоляцию катода на постоянное напряжение, равное максимальной допустимой энергии. Это определяет большие размеры ускорителей прямого действия (высота более 4 м).

В высокочастотных ускорителях (к которым относятся ускорители типа ИЛУ) для ускорения электронов используется переменное высокочастотное (ВЧ) электрическое поле, поэтому вопрос обеспечения электрической изоляции решается проще. В ускорителях типа ИЛУ электроны ускоряются в зазоре ВЧ резонатора высокой добротности. Резонатор возбуждается ВЧ генератором через петлю связи, и ВЧ цепь работает как повышающий трансформатор.

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 (ИЛУ-6 и ИЛУ-10) и 180 МГц (ИЛУ-8). Длина ускоряющего промежутка ускорителя ИЛУ-8 – 3,6 см, ИЛУ-6 – 16 см, ИЛУ-10 – 26 см. Ускоряющий зазор у этих машин короче длины волны в вакууме, поэтому в процессе ускорения электроны приобретают энергию, практически равную максимальному напряжению на резонаторе. В ускорителях ИЛУ используется триодная электронная пушка (имеющая управляющий электрод), расположенная непосредственно перед ускоряющим зазором. Использование управляющего напряжения на электронной пушке позволяет быстро регулировать ток пучка и уменьшает фазовый угол инжекции, что существенно снижает разброс энергии электронов в пучке.

Мощность пучка определяется мощностью ВЧ генераторов, питающих резонатор. Ускорители ИЛУ имеют рекордно высокую для линейных ускорителей эффективность преобразования ВЧ мощности в мощность пучка – от 50 до 70 % в зависимости от энергии и мощности пучка.

Низкая (для ВЧ ускорителей) рабочая частота позволяет сделать ВЧ генераторы на мощных триодах, которые выпускаются промышленностью и стоят гораздо дешевле магнетронов и клистронов, которые используются для ВЧ питания большинства мощных ВЧ ускорителей.

Основные параметры ускорителей ИЛУ и их преимущества при использовании в промышленности

Ускорители типа ИЛУ предназначены для работы в диапазоне энергий 0,7÷5 МэВ при мощности пучка ускоренных электронов до 50 кВт. Их отличительными особенностями являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность при длительной работе в условиях промышленного производства. Основные параметры производимых Институтом ускорителей серии ИЛУ [2–4]:

Параметры	ИЛУ-6	ИЛУ-8	ИЛУ-10
Энергия электронов, МэВ	1,2–2,5	0,7–1	2,5–5
Средняя мощность пучка, кВт	20	25	50
Средний ток пучка, мА	20	30	15
Потребляемая мощность, кВт	100	80	150
Вес ускорителя, т	2,2	0,6	2,9

Все поставляемые радиационные комплексы на базе ускорителей серии ИЛУ обладают автоматизированной системой управления на основе IBM PC совместимых компьютеров, что позволяет легко их интегрировать в производственный цикл современного предприятия.

Ускорители серии ИЛУ занимают свой сегмент на мировом рынке установок для радиационных технологий. На сентябрь 2006 г. в Россию и страны СНГ поставлен 21 ускоритель, за пределы СНГ (в Польшу, Венгрию, Индию, Китай, Кубу, Чехию, Румынию, Ита-

лию, Республику Корея, США, Японию) – 18 ускорителей ИЛУ.

Ускорители типа ИЛУ имеют свои достоинства и недостатки по отношению к самому распространенному типу ускорителей, ускорителям прямого действия, к которым относятся и производимые ИЯФ ускорители типа ЭЛВ.

Достоинства ускорителей ИЛУ:

- небольшие геометрические размеры ускорителей при достигаемых ими рабочих значениях энергии, что позволяет делать биологическую защиту установки более компактной, а следовательно, снижает стоимость всего комплекса;
- простота и надежность ускоряющей структуры, высокая надежность и низкая стоимость как самой установки, так и ее эксплуатационных расходов;
- высокая энергия ускоренных электронов в сочетании с достаточно высокой мощностью пучка (десятки киловатт);
- быстрый выход на рабочие параметры после старта;
- отсутствие бака для газовой изоляции высоковольтных частей ускорителей и отсутствие необходимости в использовании элегаза SF₆;
- работа в импульсном режиме позволяет сравнительно просто конструировать для ускорителей ИЛУ многооконные выпускные системы, что увеличивает коэффициент использования пучка и адаптирует выпускную систему к различным видам продукции;
- использование схемы ВЧ генератора с самовозбуждением и системы подвозбуждения обеспечивает стабильность функционирования ВЧ системы и освобождает от необходимости стабилизировать температуру резонатора;
- расположение управляемой триодной электронной пушки непосредственно перед ускоряющим зазором резонатора позволяет быстро регулировать импульсный ток пучка и тем самым его среднюю мощность в достаточно широком диапазоне;
- в ускорителе ИЛУ-10 на триодную электронную пушку подается ВЧ напряжение с регулируемым фазовым сдвигом относительно ускоряющего напряжения, что изменяет фазовый угол инжекции и уменьшает разброс энергий электронов в пучке;
- возможность преобразования мощности электронного пучка в тормозное излучение на ускорителе ИЛУ-10 при энергии 5 МэВ;

- наличие некоторого разброса энергий электронов в пучке сглаживает неравномерность распределения дозы внутри обрабатываемых изделий.

Недостатки ускорителей ИЛУ:

- относительно низкий коэффициент преобразования потребляемой из сети электрической мощности в мощность пучка;
- максимальная мощность ускорителей (до 50 кВт) ограничена мощностью производимых генераторных ламп.

Ускоритель ИЛУ-6

Базовой моделью семейства ИЛУ является модель ИЛУ-6. Этот ускоритель имеет диапазон рабочей энергии 1,2–2,5 МэВ, мощность пучка до 40 кВт при энергии 2 МэВ и до 20 кВт на верхней и нижней границах энергии. Эти параметры востребованы промышленностью, и начиная с 1975 г. ускорители ИЛУ-6 используются для реализации широкого спектра технологических процессов.

В ускорителе ИЛУ-6 энергия 2,5 МэВ достигается при анодном напряжении ВЧ генератора в диапазоне 30–34 кВ, а напряжение амплитудой 2,5 МВ существует только внутри резонатора. Таким образом, при энергии электронов 2,5 МэВ максимальное внутреннее напряжение составляет 2,5 МВ, но снаружи вакуумного бака ускорителя напряжение не превышает 35 кВ, поэтому нет необходимости использовать газовую или масляную изоляцию высоковольтных цепей. В результате размеры ускорителя ИЛУ-6 на энергию 2,5 МэВ являются более чем скромными – высота вместе с генератором, установленным над баком ускорителя, 2 м.

Ускоритель ИЛУ-10

Разработан на основе ускорителя ИЛУ-6. Во всем мире развивается производство толстостеночных полимерных изделий (трубки, трубы для водоснабжения и кабели), и эти изделия требуют энергии свыше 4 МэВ. Некоторые радиационно-технологические процессы (в частности, процессы радиационной стерилизации) требовали энергии вплоть до 5 МэВ. На протяжении десятилетий вплоть до 2004 г. существовал законодательно установленный верхний порог энергии электронного пучка при работе с конверсией в тормозное излучения – 5 МэВ. Поэтому была поставлена задача создания промышленного ускорителя типа ИЛУ с рабочим диапазоном

энергии до 5 МэВ, так как при повышении энергии повышается проникающая способность излучения.

На рис. 1 показана конструкция ускорителя ИЛУ-10. Высота ускорителя вместе с генераторами составляет 2,4 м (высота ИЛУ-6 – 2 м). Конструктивных отличий между ИЛУ-10 и ИЛУ-6 немного – ускоритель ИЛУ-10 имеет резонатор большей высоты и два ВЧ генератора (вместо одного ВЧ генератора у ускорителя ИЛУ-6). ВЧ генераторы размещены одинаково – непосредственно на вакуумном баке ускорителя. Диаметры резонаторов обоих ускорителей и рабочие частоты одинаковы – 118 МГц, но резонатор ускорителя ИЛУ-10 имеет большую высоту и благодаря этому больший объем и более высокие добротность и шунтовое сопротивление (шунтовое сопротивление резонатора ИЛУ-6 составляет 4,5 Мом, а резонатора ИЛУ-10 – 9 Мом). Благодаря более высокой добротности и использованию двух ВЧ генераторов ускоритель ИЛУ-10 может работать на энергии несколько выше 5 МэВ. Ускоритель ИЛУ-10 имеет диапазон рабочей энергии 2,5–5 МэВ, мощность пучка до 40 кВт при энергии 5 МэВ и до 50 кВт в середине рабочего диапазона энергии.

Ускоряющая система ускорителей ИЛУ-10 и ИЛУ-6 представляет собой медный торои-

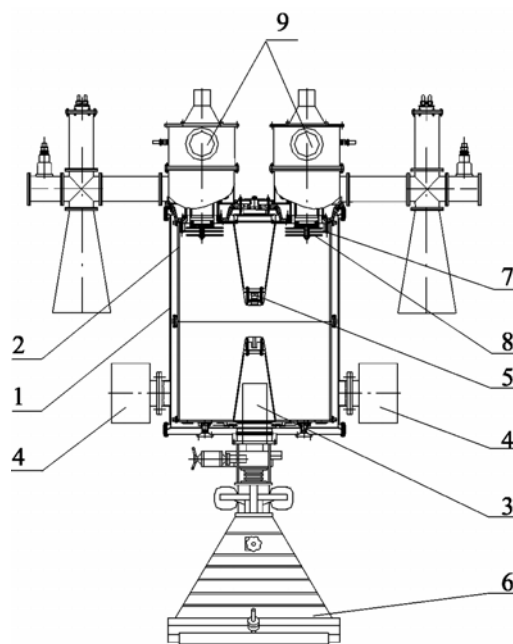


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-10:

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

дальный резонатор (см. рис. 1), помещенный внутрь вакуумного бака, сделанного из нержавеющей стали. Высокий вакуум внутри ускорителя обеспечивается работой магниторазрядных насосов.

ВЧ колебания в резонаторе возбуждаются при помощи двух ВЧ генераторов (у ИЛУ-6 – один ВЧ генератор). ВЧ энергия передается из генераторов в резонатор при помощи петли связи, соединенной с анодом лампы ВЧ генератора через разделительный вакуумный конденсатор.

Резонатор выполняется из двух частей, внутренние выступы которых образуют между собой ускоряющий промежуток. Триодная электронная пушка размещается в верхнем выступе. Нижний выступ, формирующий анодную часть ускоряющего промежутка, снабжен отверстием для выпуска пучка. Через это отверстие пучок ускоренных электронов проходит вниз в устройство выпуска пучка через магнитную линзу. Магнитная линза фокусирует пучок для минимизации потерь пучка внутри ускорителя и выпускного устройства. Выпускное устройство обеспечивает развертку пучка вдоль выпускного окна, закрытого тонкой титановой фольгой толщиной 50 мкм. Стандартная длина выпускного окна – 980 мм, ширина – 80 мм.

Ускоритель ИЛУ-8

Разработан в начале 1980-х гг. на основе ускорителя ИЛУ-6 для обработки тонких полимерных трубок, пленок, проводов и кабелей, его диапазон рабочей энергии 0,7–1 МэВ, мощность пучка до 20 кВт.

Основное преимущество ИЛУ-8 – его небольшие габариты и более высокая рабочая частота – 180 МГц. Благодаря небольшим габаритам и низкой максимальной энергии ускоритель может работать внутри местной биологической защиты. Этот ускоритель с местной биологической защитой может быть установлен в любом цеху, имеющем достаточную высоту (не менее 4 м). При желании его можно разместить и в маленьком бетонном бункере. Ускоритель ИЛУ-8 в местной защите показан на рис. 2.

Местная защита представляет собой стальной короб, разделенный на две части. В верхнем отделении размещаются вакуумный бак ускорителя, волновод обратной связи и волновод ввода ВЧ мощности, вентилятор обдува выпускных окон и форвакуумная система. В нижнем отделении размещаются устройство выпуска пучка и перематывающее устройство (которое обеспечи-

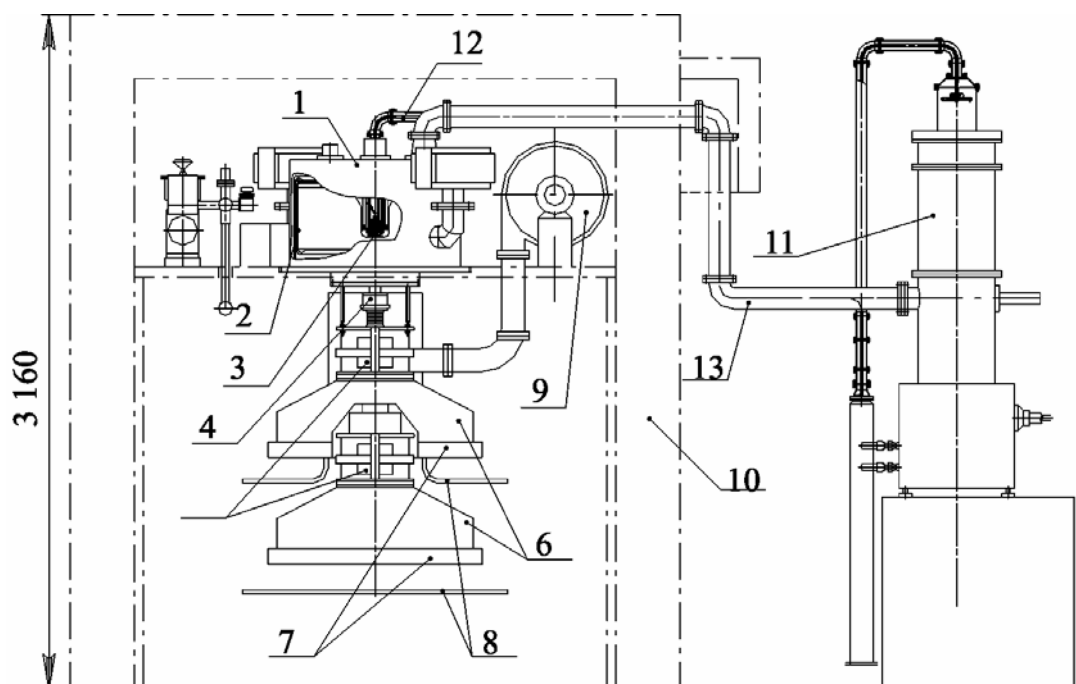


Рис. 2. Ускоритель ИЛУ-8 в местной биологической защите:

- 1 – вакуумный бак; 2 – резонатор; 3 – инжектор электронов; 4 – шибер; 5 – электромагниты развертки; 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

вает транспортировку длинномерных изделий под пучком). Устройство выпуска пучка для четырехстороннего облучения, показанное на рис. 2, включает в себя шиббер, электромагниты развертки, раструбы, окна для выпуска пучка, коллекторы пучка.

Для уменьшения габаритов конструкции ВЧ генератор выполнен в виде отдельной конструкции и размещен снаружи радиационной защиты. Связь ВЧ генератора с резонатором ускорителя осуществляется через 2 волновода – вывода сигнала обратной связи и ввода ВЧ мощности. Передняя откатная стена служит для доступа внутрь защиты. Толщина боковых стен защиты составляет 330 мм, толщина крыши – 240 мм, вес защиты – 76 т. В боковой стене защиты предусмотрены лабиринты для ввода и вывода облучаемой продукции – трубок, проводов, кабелей, иногда пленки.

Устройства выпуска пучка

Для ускорителей серии ИЛУ существует стандартный набор выпускных устройств, покрывающий основные технологические процедуры радиационных технологий. Стандартным выпускным устройством для ускорителей ИЛУ является линейная развертка с одним окном (рис. 3). Конструкция этой развертки достаточно проста и позволяет легко

регулировать ширину зоны облучения и распределение плотности пучка вдоль окна.

С ростом толщины стенки обрабатываемой трубы или толщины изоляции кабеля система двустороннего облучения с переворотом перестает обеспечивать приемлемую равномерность дозы внутри изделия. В этом случае ситуацию может спасти облучение продукции с четырех сторон.

Для радиационной обработки кабелей и труб очень удобна система облучения, в которой направления изгиба изделия при перемещении не меняются, изделие облучается на двух уровнях как минимум с двух сторон. При отсутствии изменения направлениягиба изделий не развивается так называемый твист – продольная нестабильность угла поворота длинномерного изделия.

В устройстве выпуска пучка для четырехстороннего облучения (рис. 4, 5) пучок электронов отклоняется на угол 45° на разных уровнях, что обеспечивает облучение перематываемого под выпускными окнами длинномерного изделия – трубки, провода, кабеля – с четырех сторон. Эта система выпуска является достаточно универсальной и позволяет реализовать двух- или четырехстороннее облучение или линейную развертку пучка простым переключением режима работы разворачивающих магнитов. Подпучковое перематывающее устройство

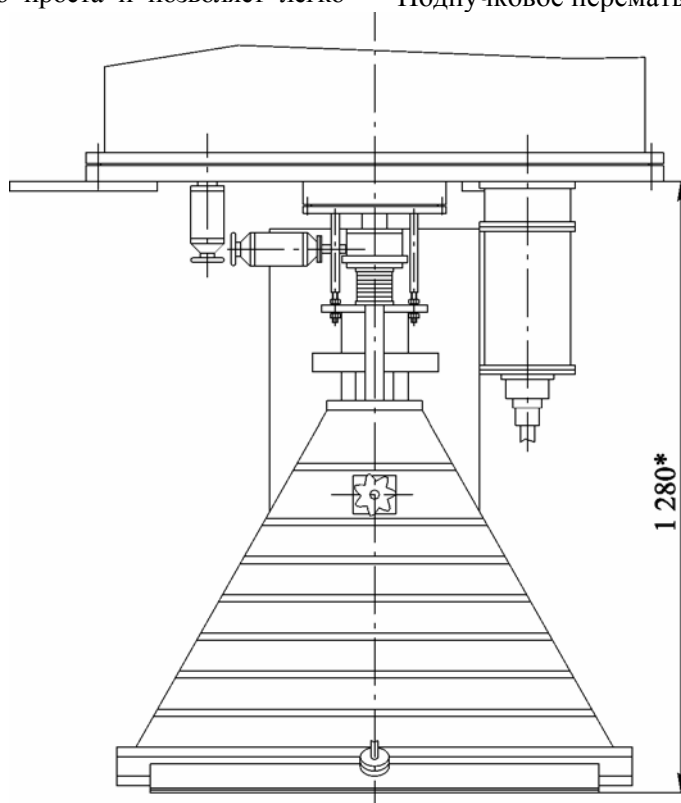


Рис. 3. Линейная развертка для ускорителей ИЛУ

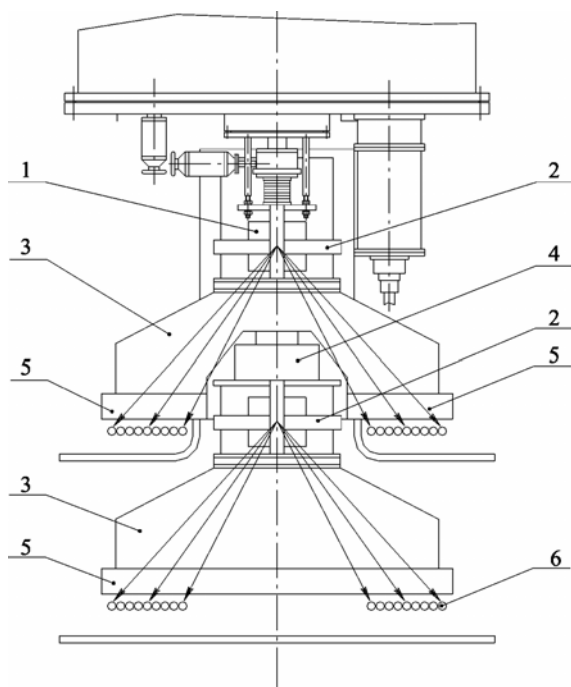


Рис. 4. Устройство выпуска пучка для четырехстороннего облучения:
1 – горловина развертки; 2 – отклоняющий электромагнит развертки; 3 – раструбы; 4 – фокусирующая линза; 5 – выпускные окна; 6 – облучаемое изделие

(см. рис. 5) не меняет направлениегиба длинномерной продукции, поэтому твист не развивается и обеспечивается хорошая равномерность распределения дозы внутри продукции.

Разработка технологического процесса обработки продукции подразумевает выбор того или иного типа выпускного устройства. Так, например, поворот пучка от вертикали на угол 90° позволяет существенно упростить конструкцию конвейерной системы подачи продукции для двухстороннего облучения.

Общий вид конструкции системы поворота представлен на фото (рис. 6) [5]. Пучок, выходя из ускорителя, попадает в поворотный

канал, где поворачивается на 90° и сканируется вдоль вертикально расположенного протяженного конвертора, представляющего собой алюминиевую пластину с нанесенным на нее слоем вольфрама или тантала.

Все выпускные устройства для удобства эксплуатации могут разделяться по вакууму от ускорителя с помощью проходного вакуумного шибера диаметром 50 мм. Наличие шибера позволяет производить замену фольги выпускных окон без нарушения вакуума в ускорителе.

Любой из ускорителей типа ИЛУ может быть оснащен как выпускным устройством с линейной разверткой пучка, так и любым из вышеупомянутых выпускных устройств. При необходимости возможна разработка и других типов выпускных устройств, приспособленных к технологии заказчика.

Кроме этого, разработана и испытана оригинальная магнитная система, позволяющая облучать пучком электронов с энергией 5 МэВ (генерируемым ускорителем ИЛУ-10) полиэтиленовые трубы диаметром до 160 мм и толщиной стенок до 20 мм. Основная идея системы состоит в том, что реализован принцип кругового облучения, в котором облучающий электронный пучок доставляется по нормали к поверхности трубы [6]. Основным физическим принципом кругового облучения является идея создания знакопеременного магнитного поля в зоне облучения за раструбом ускорителя (рис. 7).

Применение ускорителей серии ИЛУ

1. Облучение проводов и кабельных изделий повышенной термостойкости с полиэтиленовой, хлорвиниловой и силиконовой электроизоляцией для использования в самолетостроении, космическом аппаратостроении, судостроении, радиоэлектронике,

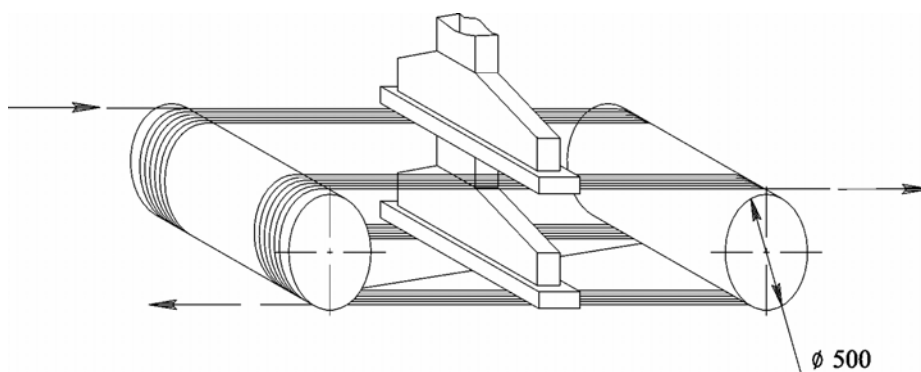


Рис. 5. Система перемотки для четырехстороннего облучения длинномерных изделий

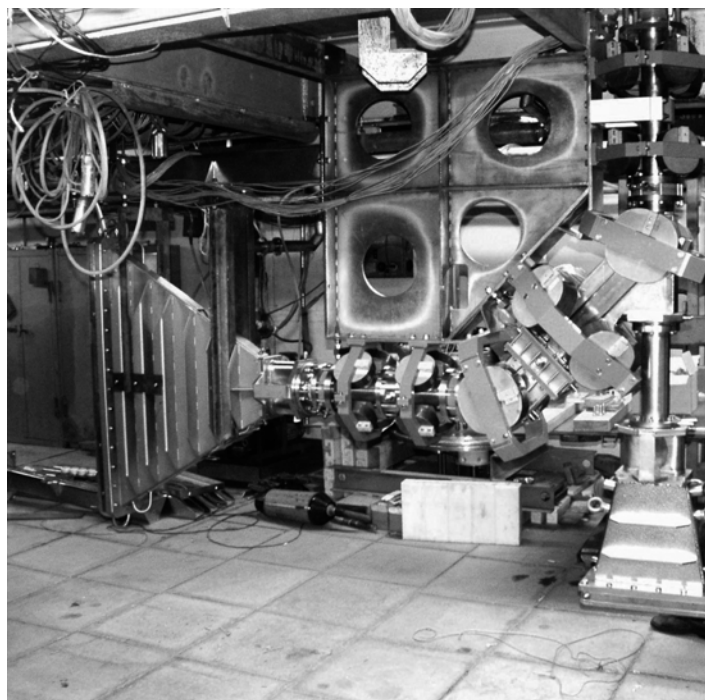


Рис. 6. Система поворота электронного пучка на 90° с последующей конверсией в тормозное излучение

атомной энергетике и других отраслях промышленности.

2. Облучение термоусаживаемых трубок, шлангов, манжет, пленок, ленты (в том числе с клеящим подслоем) для электромонтажа, защиты от коррозии магистральных и внутригородских трубопроводов для изоляции стыков труб и ремонта полимерных покрытий трубопроводов, упаковки машиностроительных изделий, строительных материалов и продуктов питания.

3. Облучение рулонных композиционных материалов и искусственных кож для спецодежды, чехлов, тентов, укрытий, кровли промышленных и коммунальных зданий, одежды, обуви, галантереи и др.

4. Облучение рулонных электроизоляционные материалов на основе силиконовых каучуков для электромонтажных работ.

5. Облучение термостойких труб для горячего водоснабжения и химически стойких труб для транспортировки агрессивных жидкостей.

6. Производство пенополиэтилена.

7. Стерилизации медицинских препаратов, растительного фармацевтического сырья и различных медицинских изделий разового пользования (шприцы, системы переливания крови и др.).

Кроме вышеперечисленных, существуют другие сферы применения ускорителей серии ИЛУ.

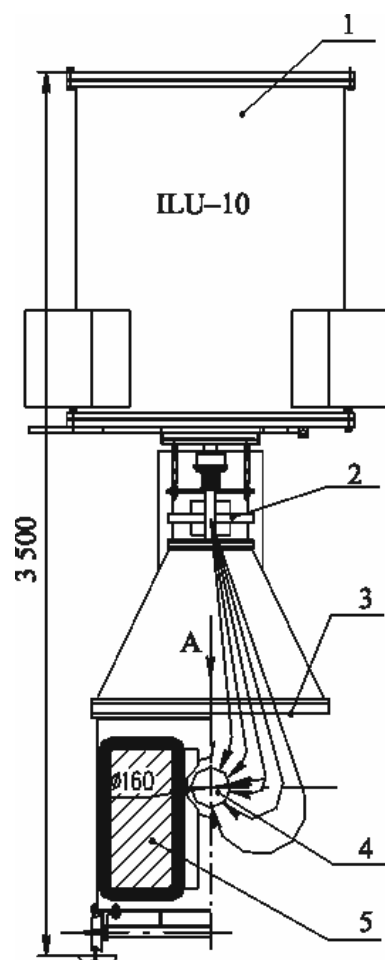


Рис. 7. Магнитная система для кругового облучения на ускорителе ИЛУ-10:

1 – ускоритель ИЛУ-10, 2 – сканирующий магнит, 3 – окно выпуска пучка, 4 – облучаемая труба, 5 – один из четырех поворотных магнитов

Список литературы

1 *Salimov R. A., Cherepkov V. G., Golubenko J. I. et al.* DC high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications // *Radiation Physics and Chemistry*. 2000. № 57. P. 661–665.

2 *Auslender V. L.* ILU-type electron accelerator for industrial technologies // *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research*. 1994. № В 89. P. 46–48.

3 *Ауслендер В. Л., Безуглов В. В., Брызгин А. А. и др.* Ускорители электронов серии ИЛУ и их использование в радиационно-технологических процессах // *Вопр. атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация*. 2004. Вып. 58. С. 78–85.

4 *Ауслендер В. Л., Брызгин А. А., Воронин Л. А. и др.* Ускорители электронов серии ИЛУ и их применение в промышленности и

медицине // *Сборник докладов Одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине*. СПб., 2005. С. 78–81.

5 *Ауслендер В. Л., Бехтенов Е. А., Брызгин А. А. и др.* Ахроматическая система поворота пучка электронов на 90 градусов в ускорителе ИЛУ-10 // *Сборник докладов Десятого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине*. СПб.; М.: ЦНИИАтоминформ, 2001.

6 *Бублей А. В., Куксанов Н. К., Долгополов В. Е. и др.* Запуск системы четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий // *Электротехника*. 2004. № 3. С. 24–29.

Материал поступил в редколлегию 14.09.2006