

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мощные ускорители электронов
для промышленного применения

Р.А. Салимов

Описаны принцип действия и устройство основных систем мощных ускорителей электронов, предназначенных для применения в промышленности. Ускорители, работающие на основе высоковольтного выпрямителя, характеризуются высоким коэффициентом полезного действия, компактностью, унифицированностью основных узлов. Всего в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера изготовлено около 70 ускорителей, из них более 20 поставлено в дальнее зарубежье.

PACS numbers: 07.77.+p, 29.25.Bx, 29.27.-a, 29.90.+r

Содержание

1. Введение (197).
 2. Высоковольтный выпрямитель (198).
 3. Ускорительная трубка (198).
 4. Устройства выпуска электронного пучка из вакуума в атмосферу (199).
 5. Система управления (200).
 6. Параметры ускорителей серии ЭЛВ (200).
- Список литературы (201).

1. Введение

Радиационная химия — новая область производства, активно развивающаяся в последние десятилетия [1–3]. Использование ионизирующих излучений позволяет создавать технологии, либо альтернативные существующим, но более эффективные и экологически чистые, либо уникальные, не имеющие аналогов в химическом производстве. Электронный пучок не вносит в технологический процесс никаких загрязнений, а энергия излучения поглощается во всем объеме материала на длине пробега электронов, поэтому радиационно-химические процессы относятся к высококоррелябельным химическим производствам высокой чистоты.

Основными источниками ионизирующего излучения на сегодняшний день являются промышленные ускорители электронов [4], главные параметры которых — энергия ускоренных электронов и ток пучка. Чем выше энергия, тем больше количество взаимодействий элект-

ронов с атомами в поглощающем веществе. Ток пучка характеризует количество ускоренных электронов, взаимодействующих с веществом. Производство тока пучка на энергию электронов в пучке — мощность пучка электронов.

Из основных характеристик взаимодействия ускоренных электронов с веществом нужно отметить поглощенную дозу излучения и длину пробега электронов в веществе. Поглощенная доза (доза) — это энергия излучения, поглощенная в веществе и рассчитанная на единицу массы облучаемого вещества. Она измеряется в греях или радах: $1 \text{ Грей} = 1 \text{ Дж кг}^{-1} = 100 \text{ рад}$. Чем выше доза, тем большая энергия поглощается в веществе. Длина пробега характеризует расстояние, на которое ускоренный электрон проникает в вещество до полной его остановки и зависит от энергии электрона, плотности вещества и отношения заряда к атомному номеру элементов, входящих в облучаемое вещество. Характерное значение поглощенной дозы в радиационных технологиях $\sim 10\text{--}250 \text{ кГр}$, а длина пробега $\sim 0,1\text{--}10,0 \text{ мм}$.

Радиационная обработка может также вестись и на γ -установках, в которых используется распад радиоактивных изотопов (главным образом, ^{60}Co и ^{137}Cs). Основными преимуществами ускорителей электронов перед γ -источниками являются несопоставимо большая мощность генерируемого ими излучения, его высокая направленность и высокая равномерность облучения объекта, а также полная безопасность ускорителя в выключенном состоянии.

Начиная с 1971 г. Институт ядерной физики СО РАН разрабатывает и производит ускорители электронов типа ЭЛВ для применения их в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках [5–11]. Ускорители типа ЭЛВ построены с использованием унифицированных систем и узлов, что позволяет с минимальными затратами адаптировать их к конкретным требованиям технологического процесса, таким как диапазон энергий, мощность пучка ускоренных электронов, длина выпускного окна и т.п. Конструк-

Р.А. Салимов Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева 11, Российская Федерация
Тел. (3832) 39-47-40. Факс (3832) 34-21-63
E-mail: kuksanov@inp.nsk.su

Статья поступила 11 сентября 1999 г.

тивные и схемные решения предусматривают длительную непрерывную и круглосуточную работу ускорителей в условиях промышленного производства.

Ускорители серии ЭЛВ состоят из собственно ускорителя, помещенного в сосуд под давлением, вакуумной системы, выпускного устройства, системы управления, системы силового питания и газовой системы. Общий вид ускорителя показан на рис. 1. Внутри сосуда, заполненного электроизолирующим газом (элегазом), расположены первичная обмотка, высоковольтный выпрямитель со встроенной внутрь ускорительной трубкой, высоковольтный электрод и блок управления инжектором. Именно расположение ускорительной трубки внутри колонны высоковольтного выпрямителя делает

ускорители ЭЛВ наиболее компактными среди машин своего класса. К днищу котла прикреплены элементы вакуумной системы с выпускным устройством. Электроны, эмитированные катодом, расположенным на верхнем конце ускорительной трубки, на выходе из ускорительной трубки имеют полную энергию $-eU_0$. Пройдя сквозь элементы вакуумной системы, они попадают в выпускное устройство, где с помощью электромагнитов развертки равномерно распределяются по фольге и выводятся в атмосферу. Облучаемый материал транспортируется под рамкой выпускного окна.

2. Высоковольтный выпрямитель

Источник высокого напряжения представляет собой каскадный генератор с параллельной индуктивной связью, или, что то же самое, безжелезный трансформатор с секционированной вторичной обмоткой. Первичная обмотка генерирует переменный магнитный поток частотой 400–1000 Гц, который индуцирует в каждой из катушек секций вторичной обмотки напряжение до 30 кВ. Это напряжение выпрямляется выпрямителем каждой секции. Между собой выпрямительные секции соединяются последовательно по постоянному напряжению. Сверху колонна выпрямительных секций заканчивается высоковольтным электродом, внутри которого располагается блок управления инжектором.

Отметим, что в отличие от "обычных" трансформаторов центральный магнитопровод в нашей конструкции отсутствует. Данное обстоятельство, существенно упрощая конструкцию источника высокого напряжения, практически не сказывается на эксплуатационных характеристиках выпрямителя благодаря наличию качественной системы стабилизации.

Применение малоиндуктивных конденсаторов и межсекционных соединений, наличие демпфирующих сопротивлений обеспечивают надежную защиту элементов высоковольтного выпрямителя от перенапряжений при пробоях как вакуумной, так и газовой изоляции. Вообще говоря, пробой в ускорителях ЭЛВ — явление чрезвычайно редкое, однако при конструировании ускорителей (а этот принцип неуклонно выполняется и в настоящее время) мы исходили из того, что даже большое число пробоев (сотни и тысячи) не должно приводить к повреждениям высоковольтного выпрямителя.

Ускорители серии ЭЛВ с разными диапазонами энергии и мощности различаются числом выпрямительных секций и их схемой выпрямления.

Энергия электронов регулируется изменением напряжения первичной обмотки.

3. Ускорительная трубка

Ускорительная трубка, как уже отмечалось, расположена внутри высоковольтной колонны, что требует, во-первых, экранировки пучка электронов от переменных магнитных полей первичной обмотки, а также защиты самого высоковольтного выпрямителя от перенапряжений, которые могут возникнуть при вакуумных пробоях в ускорительной трубке. Экранировка от продольной составляющей магнитного поля достигается установкой на ускорительной трубке короткозамкнутых магнитных колец, а от поперечной составляющей — колец, изготовленных из трансформаторной стали. Особенность нашей

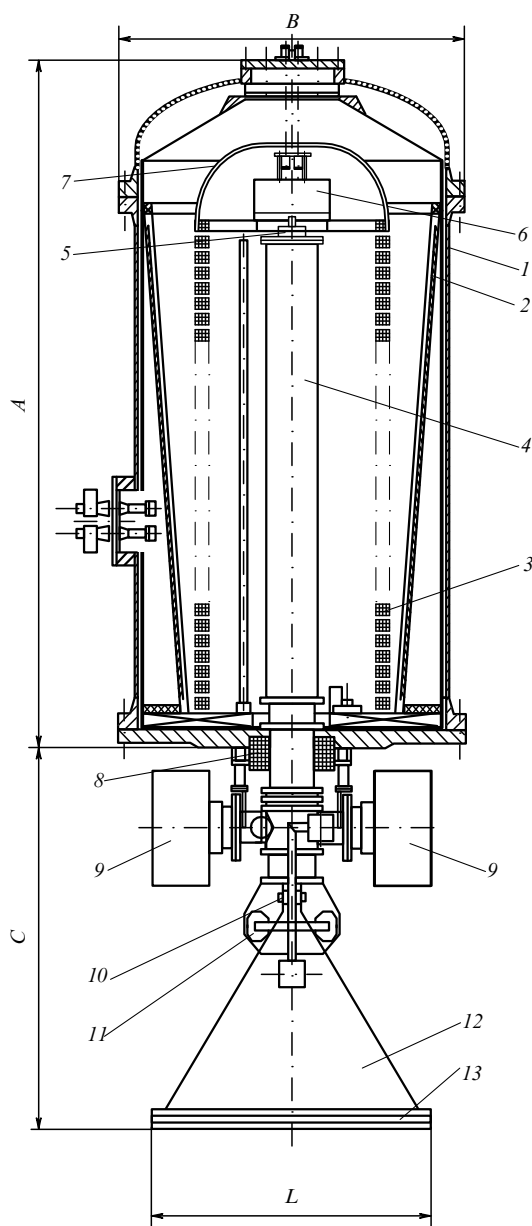


Рис. 1. Общий вид ускорителя типа ЭЛВ: 1 — сосуд, 2 — первичная обмотка, 3 — выпрямительная секция, 4 — ускорительная трубка, 5 — инжектор электронов, 6 — блок управления инжектором, 7 — высоковольтный электрод, 8 — магнитная линза, 9 — вакуумные насосы, 10, 11 — сканирующие электромагниты, 12 — выпускное устройство, 13 — титановая фольга выпускного устройства.

ускорительной трубки составляет ее большая апертура — 100 мм. Это улучшает вакуумные условия в трубке, особенно в районе катода. Благодаря этому также снижаются требования к точности сборки и юстировки как ускорительной трубки, так и инжектора электронов. В то же время большая апертура трубки способствует появлению вторичных частиц между участками ускорительной трубки, находящимися под высоковольтным и земляным потенциалом. Этот эффект минимизируется оптимизацией распределения потенциалов по электродам ускорительной трубки вблизи ее высоковольтного конца.

Максимальный рабочий градиент в трубке составляет 10 кВ см^{-1} , однако для режимов длительной непрерывной и круглосуточной работы его значение не превышает 8 кВ см^{-1} . Вследствие этого вакуумные пробои в ускорительных трубках практически отсутствуют.

Для проводки пучка без потерь сквозь вакуумную систему и выпускное устройство на нижнем конце ускорительной трубки установлена магнитная линза. Величина тока линзы при изменении энергии регулируется автоматически, без участия оператора.

4. Устройства выпуска электронного пучка из вакуума в атмосферу

Практически все технологические процессы с использованием мощных электронных ускорителей предполагают обработку изделий в воздухе или иной газовой среде при атмосферном давлении. Поэтому ускоренный в вакууме электронный пучок должен быть выведен в атмосферу. Кроме того, в зоне облучения должно быть создано оптимальное распределение плотности тока пучка. Для этих целей служат выпускные устройства.

Наиболее употребительным является выпуск электронов через охлаждаемую воздухом тонкую титановую фольгу (как показано на рис. 1). Величина тока электронного пучка часто лимитируется нагревом фольги выпускного окна вследствие ионизационных потерь в ней. Для большинства технологических процессов, а также для снижения локальных нагревов фольги требуется равномерное распределение тока пучка по площади выпускного окна. Это достигается заданием необходимой формы тока в катушках сканирующих электромагнитов.

Для обработки цилиндрических объектов (проводов, кабелей, труб) оптимально радиальное или близкое к радиальному направление движения электронов к объекту. Для этой цели нами разработаны магнитные системы, формирующие радиальную зону облучения, а также устройства, позволяющие облучать цилиндрические изделия с четырех сторон. Созданы также магнитные отражатели электронов, повышающие эффективность использования пучка. Все перечисленные системы нашли применение в радиационно-химических технологиях. Однако обладающий значительной мощностью электронный пучок может использоваться и как стерильный источник объемного ввода тепла в обрабатываемый объект.

Для этого разработаны устройства, выводящие в атмосферу сфокусированный электронный пучок. Плотность тока электронного пучка на выходе из этих устройств может достигать 10 А см^{-2} , а плотность мощности — 10 МВт см^{-2} , что не достижимо другими

известными способами. Пучок выводится через систему отверстий в диафрагмах. Отверстия прожигаются самим пучком, и их диаметр лежит в пределах 1–2 мм. Рабочий вакуум в ускорительной трубке обеспечивается непрерывно действующими насосами системы дифференциальной откачки. Разработано два варианта ускорителей с подобным выпускным устройством.

В первом пучок фокусируется двумя магнитными линзами. Этот вариант используется в ускорителях с максимальной мощностью до 100 кВт. Схематически выпускное устройство показано на рис. 2. Суть его работы заключается в следующем. Электронный пучок после выхода из ускорительной трубки фокусируется магнитной линзой. В кроссовере линзы расположена диафрагма. Далее, расширившись, пучок попадает во вторую линзу с еще меньшим фокусным расстоянием. В кроссовере этой линзы расположены две диафрагмы. Газ, натекающий сквозь отверстия в диафрагмах, эвакуируется вакуумными насосами. Максимальный выводимый ток пучка ограничивается пульсациями ускоряющего напряжения, которые приводят к увеличению отверстий в диафрагмах и допустимы на уровне 2–3%. Описываемым устройством для вывода сфокусированного электронного пучка могут быть укомплектованы ускорители типа ЭЛВ-2, ЭЛВ-3, ЭЛВ-4 и ЭЛВ-6.

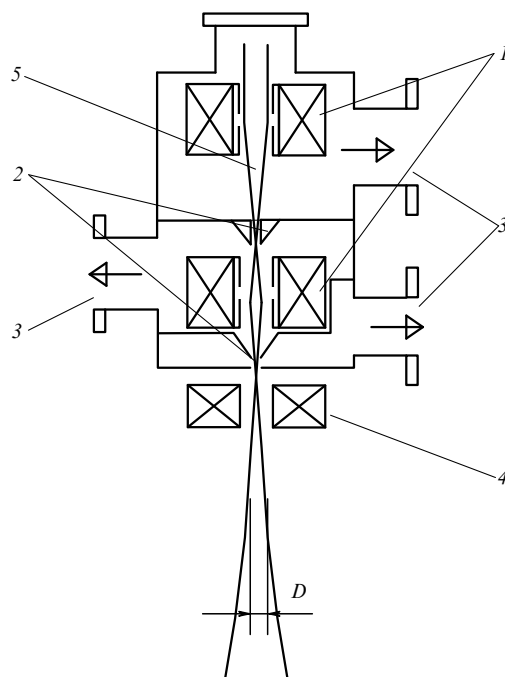


Рис. 2. Устройство для выпуска в атмосферу сфокусированного электронного пучка: 1 — магнитные фокусирующие линзы, 2 — диафрагмы, 3 — трубопроводы вакуумной откачки, 4 — сканирующие электромагниты, 5 — огибающая электронного пучка.

Для экспериментов, где не требуются максимальные высокие плотности мощности, устройство оборудовано электромагнитами сканирования в двух взаимно перпендикулярных направлениях, при этом пучок отклоняется непосредственно в воздухе. Система сканирования позволяет также в соответствии с требованиями технологии обеспечивать необходимую конфигурацию дозного поля.

В другом варианте ускорителя уменьшение диаметра пучка в выходных диафрагмах достигается компрессией пучка адиабатически нарастающим продольным магнитным полем. Этот метод использован в ускорителе мощностью 500 кВт. Основное преимущество адиабатической компрессии — малая чувствительность размера пучка к изменениям энергии электронов, что особенно важно при создании ускорителей мощностью в сотни киловатт, для которых проблема пульсаций и нестабильностей ускоряющего напряжения достаточно актуальна. Ускорительная трубка и выпускное устройство расположены на одной оси, а магнитное поле плавно нарастает от 100 Гс на катоде до 10000 Гс в районе выходных диафрагм. При этом размер пучка уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из напряженности магнитного поля. Продольное магнитное поле создается системой соленоидов и катушек. Для его увеличения непосредственно в районе выходных диафрагм применяется стальной концентратор. Максимальный выведенный в атмосферу ток для такой конструкции выпускного устройства составил 0,8 А.

5. Система управления

Система управления промышленным ускорителем в значительной степени определяет его эксплуатационные характеристики, такие как удобство управления, надежность, длительность непрерывной работы, ремонтпригодность.

На наших ускорителях оператор технологической установки общается с ускорителем с помощью персонального компьютера. Система управления ускорителем включает в себя комплекс аппаратных и программных средств, охватывающий все узлы ускорителя, требующие оперативного управления, контроля и диагностики. Многофункциональная система управления позволяет:

- автоматизировать процесс управления ускорителем. Алгоритмы, заложенные в программу управления ускорителем, берут на себя задачи подготовки ускорителя к работе (разгон преобразователя частоты, включение двигателя обдува фольги, включение разверток и, при необходимости, технологического оборудования), 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;

- 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;

- предоставляет обслуживающему персоналу широкий набор команд для предварительного задания режимов, тестирования и наладки ускорителя.

6. Параметры ускорителей серии ЭЛВ

Используя унифицированные основные элементы и узлы, мы создали ряд ускорителей, перекрывающих широкий диапазон энергий, токов и мощностей электронного пучка. В таблице приведены параметры разработанных в нашем институте ускорителей, которые мы готовы поставить потребителям (ускоритель ЭЛВ-12 находится в стадии изготовления).

Главное требование, предъявляемое к промышленным ускорителям, — их надежность. Высокая степень надежности ускорителей серии ЭЛВ была достигнута благодаря обобщению многолетнего опыта работы ускорителей в реальных условиях. Употребление во всей серии ускорителей ЭЛВ унифицированных узлов и элементов позволяет нам, изменяя только их число и схему соединений и сохраняя, по возможности, условия их работы, не снижать надежности ускорителей новых типов, используя тем самым опыт многолетней эксплуатации предыдущих моделей.

За последние более чем 25 лет в народное хозяйство СССР, а затем России было поставлено около 50 ускорителей типа ЭЛВ. Они применяются практически во всех радиационно-химических технологических процессах, получивших развитие в нашей стране. В страны дальнего зарубежья было экспортировано 22 ускорителя, в основном, за последние 10 лет: Китай — 10 ускорителей, Республика Корея — 5, Япония — 2, Польша — 2, Чехословакия — 1, Болгария — 1, Германия — 1. Эти ускорители используются, главным образом, для радиационного модифицирования различных полимерных изделий. Часть ускорителей работает в исследовательских центрах, а также в качестве опытных установок экологической направленности — радиационная очистка сточных вод и выбросных газов. В ближайшие

Тип ускорителя	Диапазон энергий E , МэВ	Максимальный ток пучка, мА	Мощность пучка, кВт	Размер*, мм			
				A	B	C	L
ЭЛВ-мини	0,2–0,4	50	20	500	450	600	980
ЭЛВ-3	0,5–0,7	100	50	2360	1345	2000	1500
ЭЛВ-4	1,0–1,5	40	50	2660	1345	1500	980
ЭЛВ-6	0,8–1,2	100	100	3870	1345	2000	1500
ЭЛВ-6М	0,6–0,9	200	150	3870	1345	2000	1500
ЭЛВ-8	1,0–2,5	50	100	3740	1345	1500	980
ЭЛВ-12	0,6–1,0	400	400	4300	1645	1800	1600×3

* Размеры A , B , C , L см. на рис. 1.

годы ожидается расширение рынка ускорителей для экологических применений, где потребуются установки мощностью в сотни киловатт. Именно для этих целей предназначены ускорители ЭЛВ-12.

Список литературы

1. Пикаев А К *Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы* (М.: Наука, 1985)
2. Пикаев А К *Современная радиационная химия. Радиолит газов и жидкостей* (М.: Наука, 1986)
3. Пикаев А К *Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты* (М.: Наука, 1987)
4. Свинын М П *Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей электронов для радиационной технологии* (М.: Энергоатомиздат, 1989)
5. Ауслендер В Л, Салимов Р А *Атомная энергия* **44** 403 (1978)
6. Вейс М Э и др., в кн. *8-е Совецание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 26–28 сентября 1995* (М.: ЦНИИАтоминформ, 1995) с. 31
7. Голубенко Ю И и др., в кн. *8-е Совецание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 26–28 сентября 1995* (М.: ЦНИИАтоминформ, 1995) с. 33
8. Голубенко Ю И и др., в кн. *8-е Совецание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 26–28 сентября 1995* (М.: ЦНИИАтоминформ, 1995) с. 33
9. Zimek Z, Salimov R A *Radiat. Phys. Chem.* **40** (4) 317 (1992)
10. Veis M E et al. *Radiat. Phys. Chem.* **35** (3) 658 (1990)
11. Cherepkov V G et al., in *Abstracts of the 10th International Meeting on Radiation Processing. Anaheim, California, USA, May 1997* p. 58

High energy electron accelerators for industrial applications

R.A. Salimov

*Budker Institute of Nuclear Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Academician Lavrentiev prosp. 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation
Tel. (7-3832) 39-47 40. Fax (7-3832) 34-21 63
E-mail: kuksanov@inp.nsk.su*

The principle of operation and the design of high-energy industrial electron accelerators are described. The accelerators using high-voltage DC rectifiers are highly efficient and compact and characterized by the unification of their main units. In total, more than 70 accelerators have been manufactured in the Budker Institute of Nuclear Physics, over 20 of them for export.

PACS numbers: **07.77. + p**, **29.25.Bx**, **29.27.–a**, **29.90. + r**

Bibliography — 11 references

Received 11 September 1999